

# 効用水準とエネルギー消費量に影響を与える 都市構造と交通特性に関する研究

Yanhong YIN<sup>1</sup>・溝上 章志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 熊本大学博士後期課程 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail: 095d9406@st.kumamoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail: smizo@gpo.kumamoto-u.ac.jp

持続可能性の概念は今後の都市開発における重要なパラダイムであり、それを達成する一つの有効な方法としてコンパクトシティ政策が注目されている。本研究では、交通サービスに加えて一般財の消費も含めた個人の効用関数を定義し、彼の現在の効用水準を維持するという条件の下でエネルギー消費量を最小化した場合、最適な財の消費パターンが実績消費パターンとどれほど異なっているかによって都市のコンパクト性を評価するモデルを提案する。このモデルを熊本都市圏の2時点、および長崎都市圏にも適用し、どのような都市構造や交通サービスが現在の効用水準を維持した上でのエネルギー消費量削減に貢献するかを実証的に明らかにする。

**Key Words :** *sustainable urban development, compact city, energy consumption*

## 1. はじめに

自動車中心社会の進展は我々の生活に多くの恩恵をもたらした半面、都市のスプロール化や公共交通の衰退による交通弱者の移動可能性の低下、中心市街地の空洞化などの問題が顕著になっており、従来の都市政策は大きな転換期を迎えている。また、化石燃料の枯渇や地球温暖化などの問題を受け、エネルギー消費量の削減の必要性が求められている。近年では、これらの問題を解決する手段のひとつとして、持続可能な都市形態の一つとしてのコンパクトシティが注目され、関連する多くの研究がなされている。例えば、単位トリップあたりのエネルギー消費量や環境負荷量といったマクロ指標の都市間比較や都市構造との関係性を分析したNewman & Kenworthy<sup>1)</sup>の研究は著名である。さらに、都市機能の集積圏域と集積密度の視点から都市構造のコンパクト性の評価を行った佐保<sup>2)</sup>らの研究や、類似の視点からの谷口ら<sup>3)</sup>、森本・小池<sup>4)</sup>などの研究がある。一方で、幾つかの典型的な都市・交通シナリオに対して、土地利用-交通統合モデルを適用した政策シミュレーションの結果から、環境負荷低減に寄与する都市や交通政策を帰納的に見出そうとした小島ら<sup>5)</sup>や中井・森本<sup>6)</sup>や紀伊ら<sup>7)</sup>の研究もある。

都市の発展はエネルギーの消費を伴う生産や都市活動によって支えられてきたことも事実であり、単にエネル

ギー消費量を削減するのではなく、現在の個々人の効用水準を低下させずに、いかに都市全体のエネルギー消費量や環境負荷量を削減させるかが問われている。このような中で、現在の交通モビリティ水準を維持しながらエネルギー消費量を最小化させる交通パターンを求めるミクロ経済モデルを提案し、それを達成するための都市構造や交通政策について検討した近成ら<sup>8)</sup>や土井ら<sup>9)</sup>の一連の研究は興味深い。

しかし、都市の諸活動は交通サービスだけでなく、その他の財の消費によって支えられている。また、たとえエネルギー消費量の削減政策が導入されても、少なくとも現況の効用水準が維持されなければ、その施策は支持されないであろう。つまり、交通サービスに加えて、一般財の消費も含めた個人の効用関数を定義し、彼の現在の効用水準を維持するという条件の下でエネルギー消費量を最小化した場合、その最適な消費パターンが実際の消費パターンと比較してどれほど異なるか検討する必要がある。さらに、この検討を異なる時点や異なる都市圏に適用することにより、どのような都市構造や交通サービス特性が、現在の効用水準を維持した上で都市のコンパクト化、ここでは都市全体のエネルギー消費量の削減に貢献するかを実証的に明らかにすることができるであろう。

一方で、複数の部門の生産や消費といった経済活動に

伴うエネルギー消費量やCO<sub>2</sub>排出量の変化を一般均衡フレームによって推計する一連の研究<sup>10)</sup>も行われている。しかし、これらの方法では産業連関表がベースデータとなることから、これが得られる県単位、あるいは全国規模のエネルギー消費量の分析には向いているが、本研究で対象としているような都市圏単位のコンパクト性の分析には適さない。

上記のような概念に沿った都市のコンパクト性評価モデルについては、すでに著者<sup>11)</sup>らによってそのプロトタイプが提案されており、熊本都市圏を対象にした2時点間比較が行われ、同一都市圏であっても時点間でコンパクト性の程度が異なることなどを明らかにした。

本研究では、

- 1) 各種入力データや原単位を精緻化してサブモデルの未知パラメータを再推定すること、
  - 2) 同一地域における2時点間比較だけでなく、熊本都市圏よりも可住地面積が狭いために人口密度が高く、公共交通機関の分担率も高い長崎都市圏にも本モデルを適用して、コンパクト性の地域間比較を行うこと、
  - 3) さらに、これらの結果より、どのような都市構造や交通環境が都市のコンパクト性をより高めるかを実証的に明らかにすること
- を目的としている。

本論は6章から構成されている。まず、2.でコンパクト性評価モデルの概要について簡潔に述べ、サブモデルの各種パラメータの推定方法と準備すべきデータや原単位については3.で詳細に説明する。4.では熊本都市圏と長崎都市圏への適用の結果を示す。さらに、5.では、この結果から得られる効用効率と都市構造や交通特性との関係分析より、都市のコンパクト性に影響を与える要因を抽出している。最後に、6.で本研究の結論と今後の課題について述べる。

## 2. コンパクト性評価手法の概要

### (1) コンパクト性評価モデルの概要

各個人は所得制約条件下で効用水準を最大化するように財の消費行動を行っているが、都市のコンパクト性を追求したとしても、現在の個人の効用水準を低下させることなく、いかに都市全体のエネルギー消費量を削減させるかが求められるであろう。そこで、現在の効用水準を維持しながら、都市全体のエネルギー消費量を最小化する財の需要量を求めるモデルを提案する。モデルの基本構造は金本ら<sup>12)</sup>のアイデアを参考にしたものであるが、彼らのポイント経済に対するモデルを空間に展開している点で新しい。

まず、以下の基本的仮定を導入する。

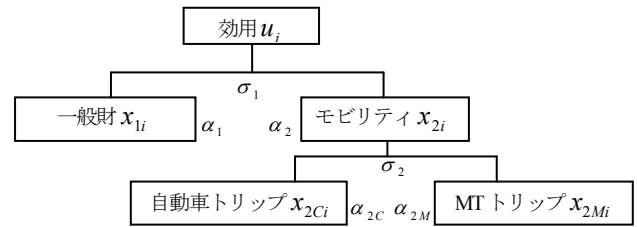


図-1 層化CES型効用関数の構造

- 1) ゾーン*i*に居住する代表的個人の消費は、交通サービス(モビリティ)とそれ以外の財(一般財)であり、その需要量は $x_{2i}$ 、 $x_{1i}$ である。
- 2) モビリティの消費量は自動車(C)と公共交通機関(M)によるトリップ数 $x_{2Ci}$ 、 $x_{2Mi}$ で表現される。
- 3) 現在、個人は各自の効用 $u_i(x_{1i}, x_{2Ci}, x_{2Mi})$ が最大となるような一般財の消費、および自動車と公共交通機関によるトリップを行っている。
- 4) ここではゾーンによって効用水準が異なることを許す閉鎖都市を仮定する。

現在の効用水準 $u_i^*(x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*)$ を維持しながら、都市全体のエネルギー消費量 $E$ を最小化する各財の需要量を求めるコンパクト性評価モデルは下記のように定式化される。

$$\min_{x_{1i}, x_{2Ci}, x_{2Mi}} E(x_{1i}, x_{2Ci}, x_{2Mi}) = \sum_i (e_1 x_{1i} + e_{2C} t_{2Ci} x_{2Ci} + e_{2M} t_{2Mi} x_{2Mi}) \cdot Pop_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } u_i(x_{1i}, x_{2Ci}, x_{2Mi}) = u_i^*(x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*) \quad \forall i \quad (2)$$

ここで、 $e_1, e_{2C}, e_{2M}$ は、それぞれ一般財、および自動車と公共交通機関のエネルギー消費原単位(kcal/円、およびkcal/分)、 $t_{2C}, t_{2M}$ はそれぞれ自動車と公共交通機関によるゾーン*i*から全ゾーンへの平均所要時間、 $Pop_i$ はゾーン*i*の居住人口である。

### (2) 効用関数の定義

現在の効用水準 $u_i^*(x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*)$ を求めるために、効用関数を定義する。ゾーン*i*に住む代表的個人の効用関数には、2層のNested構造で表される層化CES型の効用関数を導入する(図-1参照)。このタイプは、段階ごとに2財間の代替弾性を別個に設定できるという柔軟性を持つ。この上位段階と下位段階の関係はそれぞれ次式ようになる。

$$u_i(x_{1i}, x_{2i}) = \left\{ \alpha_1 x_{1i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} + \alpha_2 x_{2i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} \right\}^{\sigma_1/(\sigma_1-1)} \quad (3)$$

$$x_{2i}(x_{2Ci}, x_{2Mi}) = \left\{ \alpha_{2C} x_{2Ci}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} + \alpha_{2M} x_{2Mi}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} \right\}^{\sigma_2/(\sigma_2-1)} \quad (4)$$

$\sigma_1, \sigma_2$ は、それぞれ上位段階と下位段階の代替の弾性であり、各段階における2財間の代替性の程度を表す。 $\alpha_1$ と $\alpha_2$ 、 $\alpha_{2C}$ と $\alpha_{2M}$ は、一般財とモビリティ、自動車トリップと公共交通機関トリップの分配パラメータであ

り、それぞれの段階での総支出額に対する各財への配分支出比率を表す。

このとき、式(3)と(4)の効用関数を所得制約

$$p_{1i}x_{1i} + p_{2Ci}x_{2Ci} + p_{2Mi}x_{2Mi} \leq I_i \quad (5)$$

の下で最大化する解  $x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*$  を求めることによって、現在の効用水準  $u_i^*(x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*)$  を算出することができる。  $p_{1i}$  は一般財1単位あたりの価格、  $p_{2Ci}, p_{2Mi}$  は自動車と公共交通機関によるゾーン  $i$  からのトリップの平均費用 (円/トリップ・日)、  $I_i$  はゾーン  $i$  に居住する1人1日あたりの所得 (円/人・日) である。

### (3) 現在の効用水準の算出

現在の効用水準を算出するには、段階的な解法を用いる。まず、個人は交通に支出可能な予算制約条件下でモビリティ水準の最大化行動を行っているから、下位段階の行動は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \max_{x_{2Ci}, x_{2Mi}} : x_{2i} &= \left\{ \alpha_{2C} x_{2Ci}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} + \alpha_{2M} x_{2Mi}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} \right\}^{\sigma_2/(\sigma_2-1)} \\ \text{s.t.} \quad p_{2Ci}x_{2Ci} + p_{2Mi}x_{2Mi} &\leq I_{2i} \end{aligned} \quad (6)$$

$I_{2i}$  は1人1日あたりの総交通費用 (円/人・日) である。この効用最大化問題の解である自動車と公共交通機関によるトリップ数とモビリティ水準の最適値  $x_{2mi}^*, x_{2i}^*$  については以下のような解析解が導かれる。

$$x_{2mi}^* = \left( \frac{\alpha_{2m}}{p_{2mi}} \right)^{\sigma_2} \frac{I_{2i}}{\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2}} \quad (m=C, M) \quad (7)$$

$$x_{2i}^* = (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2})^{1/(\sigma_2-1)} \cdot I_{2i} \quad (8)$$

一方、上位段階では、個人は所得制約下での効用最大化を行っているから、その行動は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \max_{x_{1i}, x_{2i}} : u_i &= \left\{ \alpha_1 x_{1i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} + \alpha_2 x_{2i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} \right\}^{\sigma_1/(\sigma_1-1)} \\ \text{s.t.} \quad p_{1i}x_{1i} + p_{2i}x_{2i} &\leq I_i \end{aligned} \quad (9)$$

一般財とモビリティの需要関数は、この最適化問題の解として、次式のように解析的に表される。

$$x_{ki}^* = \left( \frac{\alpha_k}{p_{ki}} \right)^{\sigma_1} \frac{I_{2i}}{\alpha_1^{\sigma_1} p_{1i}^{1-\sigma_1} + \alpha_2^{\sigma_1} p_{2i}^{1-\sigma_1}} \quad (k=1, 2) \quad (10)$$

式(7), (8), (10)より、ゾーン  $i$  発の交通機関  $m$  による最適なトリップ数は以下となる。

$$\begin{aligned} x_{2mi}^* &= \left( \frac{\alpha_{2m}}{p_{2mi}} \right)^{\sigma_2} \alpha_2^{\sigma_1} (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2})^{\frac{\sigma_2-\sigma_1}{1-\sigma_2}} \\ &\cdot \left\{ \alpha_1^{\sigma_1} p_{1i}^{1-\sigma_1} + \alpha_2^{\sigma_1} (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2})^{\frac{1-\sigma_1}{1-\sigma_2}} \right\}^{-1} \cdot I_i \end{aligned} \quad (11)$$

これらを式(3)と式(4)に代入することによって、現在の

効用水準  $u_i^*(x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*)$  が得られる。ただし、  $p_{1i}$  はニューメーラールとして、以後  $p_{1i} = 1$  とする。

### (4) 都市エネルギー消費量を最小にする解

問題(1)と(2)の解と上記より、都市全体のエネルギー消費量を最小化する各財の需要量は下記ようになる。

$$\begin{aligned} x_{1i}^{**} &= \left[ \alpha_1 + \alpha_2 \left( \frac{e_{2C} t_{2Ci}}{e_1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_1-1)} \right. \\ &\cdot \left. \left\{ \alpha_{2C} + \alpha_{2M} \left( \frac{e_{2C} t_{2Ci}}{e_{2M} t_{2Mi}} \frac{\alpha_{2M}}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{\sigma_1-1}{\sigma_2-1}} \right]^{\frac{\sigma_1}{1-\sigma_1}} u_i^* \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} x_{2Ci}^{**} &= \left[ \alpha_1 \left( \frac{e_{2C} t_{2Ci}}{e_1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_1-1)} \right. \\ &\cdot \left\{ \alpha_{2C} + \alpha_{2M} \left( \frac{e_{2C} t_{2Ci}}{e_{2M} t_{2Mi}} \frac{\alpha_{2M}}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{(\sigma_1-1)(\sigma_2-\sigma_1)}{\sigma_1(\sigma_2-1)}} \\ &+ \alpha_2 \left\{ \alpha_{2C} + \alpha_{2M} \left( \frac{e_{2C} t_{2Ci}}{e_{2M} t_{2Mi}} \frac{\alpha_{2M}}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{\sigma_2(\sigma_1-1)}{\sigma_1(\sigma_2-1)}} \left. \right]^{\frac{\sigma_1}{1-\sigma_1}} u_i^* \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} x_{2Mi}^{**} &= \left[ \alpha_1 \left( \frac{e_{2M} t_{2Mi}}{e_1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_{2M}} \right)^{(\sigma_1-1)} \right. \\ &\cdot \left\{ \alpha_{2M} + \alpha_{2C} \left( \frac{e_{2M} t_{2Mi}}{e_{2C} t_{2Ci}} \frac{\alpha_{2C}}{\alpha_{2M}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{(\sigma_1-1)(\sigma_2-\sigma_1)}{\sigma_1(\sigma_2-1)}} \\ &+ \alpha_2 \left\{ \alpha_{2M} + \alpha_{2C} \left( \frac{e_{2M} t_{2Mi}}{e_{2C} t_{2Ci}} \frac{\alpha_{2C}}{\alpha_{2M}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{\sigma_2(\sigma_1-1)}{\sigma_1(\sigma_2-1)}} \left. \right]^{\frac{\sigma_1}{1-\sigma_1}} u_i^* \end{aligned} \quad (14)$$

これらを式(1)に代入することによって、現在の効用水準を維持する条件下での都市の総エネルギー消費量の最小値  $E^{**} = E(x_{1i}^{**}, x_{2Ci}^{**}, x_{2Mi}^{**})$  が得られる。

## 3. モデル適用のための未知パラメータの推定

### (1) 代替の弾力性 $\sigma_1, \sigma_2$ の推定

自動車と公共交通機関のトリップ数の自己価格弾力性  $\varepsilon_{2CC}, \varepsilon_{2MM}$  と交差弾力性  $\varepsilon_{2CM}, \varepsilon_{2MC}$  から、代替の弾力性  $\sigma_1, \sigma_2$  の推定を行う。

ゾーン別の交通機関別トリップ数  $x_{2mi}$  の自己価格弾力性  $\varepsilon_{2CCi}, \varepsilon_{2MMi}$  と交差弾力性  $\varepsilon_{2CMi}, \varepsilon_{2MCi}$  は、それぞれ下記のように表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2mni} &= \frac{\partial x_{2mi} / x_{2mi}}{\partial p_{2mi} / p_{2mi}} \\ &= -\sigma_2 + (\sigma_2 - \sigma_1) \frac{p_{2mi} x_{2mi}}{I_{2i}} + (\sigma_1 - 1) \frac{p_{2mi} x_{2mi}}{I_i} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2mni} &= \frac{\partial x_{2mi} / x_{2mi}}{\partial p_{2mi} / p_{2mi}} \\ &= (\sigma_2 - \sigma_1) \frac{p_{2ni} x_{2ni}}{I_{2i}} + (\sigma_1 - 1) \frac{p_{2ni} x_{2ni}}{I_i} \end{aligned} \quad (16)$$

したがって、交通機関別トリップ数の自己価格弾力性と交差弾力性が得られさえすれば、上記の中から適切に2つの式を選んだ連立方程式から $\sigma_1, \sigma_2$ を推定することができる。ここでは、

$$W_{2Ci} = \exp(\xi + \gamma p_{2Ci}) / \{\exp(\xi + \gamma p_{2Ci}) + \exp(\gamma p_{2Mi})\} \quad (17)$$

なる集計ロジット型交通機関分担率モデルを後述するようにして特定化し、得られた一般化費用にかかるパラメータ $\gamma$ より、

$$\varepsilon_{2mni} = \frac{\partial W_{2mi} / W_{2mi}}{\partial p_{2mi} / p_{2mi}} = \gamma \cdot p_{2mi} \cdot (1 - W_{2mi}) \quad (m=C, M) \quad (18)$$

$$\varepsilon_{2mni} = \frac{\partial W_{2mi} / W_{2mi}}{\partial p_{2ni} / p_{2ni}} = -\gamma \cdot p_{2ni} \cdot W_{2ni} \quad (m, n=C, M, m \neq n) \quad (19)$$

から成る $\sigma_1, \sigma_2$ に関する連立方程式の解として推定した。ただし、本来なら $\varepsilon_{2mni}$ はゾーン*i*ごとに求められるが、ここではそのゾーン平均値をとって一組の $\varepsilon_{2C}, \varepsilon_{2M}$ を求め、それに対応する $\sigma_1, \sigma_2$ を推定した。

## (2) 分配パラメータ

分配パラメータは、各段階における総支出額に対する2財への分配支出比率を表すパラメータである。これらの分配パラメータは、式(6)、および式(9)の最大化問題の最適性の1階の条件から、本来、

$$\alpha_{2mi} = \frac{p_{2mi} x_{2mi}^{1/\sigma_2}}{p_{2Ci} x_{2Ci}^{1/\sigma_2} + p_{2Mi} x_{2Mi}^{1/\sigma_2}} \quad (m = C, M) \quad (20)$$

$$\alpha_{ki} = \frac{p_{ki} x_{ki}^{1/\sigma_1}}{p_{1i} x_{1i}^{1/\sigma_1} + p_{2i} x_{2i}^{1/\sigma_1}} \quad (k = 1, 2) \quad (21)$$

のようにゾーン*i*ごとに得られる。しかし、ここでもゾーン平均値をとって一組の $\alpha_1$ と $\alpha_2$ 、 $\alpha_{2C}$ と $\alpha_{2M}$ を求めている。

## (3) データの収集、および準備

上記の未知パラメータを推定するためには、事前に下記の実績データが必要である。以下に、本論で使用したデータの収集、および加工方法について詳細に説明する。なお、後で詳細に説明するように、本モデルの適用対象地域は熊本市圏と長崎市圏である。

### a) 交通機関別トリップ数 $x_{2Ci}, x_{2Mi}$

一人一日当たりの交通機関別トリップ数 $x_{2Ci}, x_{2Mi}$ (トリップ/人・日)は、パーソントリップ(以後、PT

表-1 両都市圏のPT調査の概要

|              | 熊本(1984) | 熊本(1997) | 長崎(1996) |
|--------------|----------|----------|----------|
| 市町村数         | 21       | 17       | 10       |
| ゾーン数         | 161      | 177      | 88       |
| 人口(人)        | 874,049  | 970,380  | 726,112  |
| 自動車保有率(台/千人) | 351      | 569      | 442      |
| 総トリップ数(万)    | 209      | 227      | 168      |

表-2 エネルギー消費原単位

|                                 | 熊本(1984) | 熊本(1997) | 長崎(1996) |
|---------------------------------|----------|----------|----------|
| 一般消費財 $e_1$<br>(kcal/円)         | 3.044    | 3.639    | 3.512    |
| 自動車トリップ $e_{2C}$<br>(kcal/分)    | 143.055  | 137.653  | 250.642  |
| 公共交通機関トリップ $e_{2M}$<br>(kcal/分) | 11.249   | 14.498   | 16.098   |

と記す)調査の一日当たりの交通機関別OD交通量を発ゾーン別に集計し、発ゾーンの居住人口で除したものである。交通目的としては業務、通勤・通学、買い物とそれぞれからの帰宅トリップだけを使用した。なお、居住ゾーンをベースとした分析を行うために、帰宅トリップは着ゾーン別に集計している。PTデータ<sup>13), 14)</sup>の詳細を表-1に示す。ここでは、熊本市圏の時点間の比較を容易にするため、1997年のPTに合わせて1984年の161ゾーンを177ゾーンに分割した。

### b) 平均所要時間 $t_{2Ci}, t_{2Mi}$

ゾーン*i*からの交通機関別平均所要時間 $t_{2Ci}, t_{2Mi}$ は、それぞれ利用者均衡配分、確率的配分法を用いて算出したOD間所要時間 $t_{2Cij}, t_{2Mij}$ を交通機関別OD交通量(トリップ)で加重平均して発ゾーン別に求めている。

### c) 交通機関別一般化費用 $g_{2Ci}, g_{2Mi}$ と費用 $p_{2Ci}, p_{2Mi}$

自動車の費用 $p_{2Cij}$ は、利用者均衡配分によって算出したOD間の走行速度(km/h)からOD別の走行経費原単位(円/km・台)を求め<sup>15)</sup>、この走行経費原単位を用いて次式から算出した。

OD別自動車費用 $p_{2Cij}$ (円/トリップ) = 走行経費原単位(円/km・台) × OD間距離(km) / 平均乗車人員(トリップ/台)

また、自動車の一般化費用 $G_{2Cij}$ は、次式のように時間価値によって所要時間を貨幣換算した値を費用に加算している。

OD別自動車一般化費用 $G_{2Cij}$ (円/トリップ) = OD別自動車費用 $p_{2Cij}$ (円/トリップ) + 時間価値(円/分) × 自動車のOD間所要時間(分)

公共交通機関の費用 $p_{2Mij}$ と一般化費用 $G_{2Mij}$ については、それぞれ確率的配分法を用いて算出した費用(分)と一般化費用(分)に時間価値(円/分)をかけて求めた。さらに、算出された交通機関別一般化費用 $G_{2Cij}, G_{2Mij}$ と費用 $p_{2Cij}, p_{2Mij}$ を交通機関別OD交通量

(トリップ) で加重平均し、発ゾーン別に交通機関別一般化費用  $G_{2Ci}, G_{2Mi}$  と費用  $p_{2Ci}, p_{2Mi}$  とした。ここで、時間価値 (円/分・人) については、自動車は  $\omega_C^{1984} = 23.79$ ,  $\omega_C^{1996,1997} = 38.11$  を、公共交通機関は  $\omega_M^{1984} = 24.79$ ,  $\omega_M^{1996,1997} = 40.00$  を使用している<sup>16)</sup>。

d) 所得  $I_i$

所得統計は市町村単位でしか公開されておらず、ゾーン単位では得られない。一般に、地価水準の高い土地を取得できるのは当該地主の所得水準が高いためと考えると良い。そこで、ゾーン  $i$  に居住する1人1日あたりの所得  $I_i$  (円/人・日) は、両市の可処分所得の市内合計を地価公示から得られる住宅用途の土地の公示地価に比例して配分した。

e) エネルギー消費原単位  $e_1, e_{2C}, e_{2M}$

一般財の消費支出は1世帯当たりの総消費支出から交通・自動車等関係費を除いたものとする。一般財のエネルギー消費原単位  $e_1$  (kcal/円) は、家庭部門の1世帯当たりのエネルギー消費量 (kcal/世帯・月) を一般財の消費支出 (円/世帯・月) で除して求めた<sup>17)</sup>。自動車・公共交通機関のエネルギー消費原単位  $e_{2C}, e_{2M}$  (kcal/分) は、内々交通を除いた交通機関別OD交通量 (トリップ) で加重平均した速度 (km/分) にエネルギー消費原単位 (kcal/km) をかけて求めた<sup>18)</sup>。

エネルギー消費原単位の推定結果を表-2に示す。自動車のエネルギー消費原単位は1984年の方が1997年よりやや高く、公共交通機関のエネルギー消費原単位は1984年の方が低い。また、長崎都市圏では、自動車のエネルギー消費原単位が熊本都市圏の約2倍となっている。これらは、エネルギー消費原単位がkm単位でなく時間単位であるためであり、たとえ同じ距離であっても交通混雑が激しく所要時間が大きい時点や都市の方が相対的に時間単位のエネルギー原単位は高くなる。このことから、熊本都市圏では1997年の方が1984年より、長崎都市圏の方が熊本都市圏より自動車を利用しづらい環境にあるといえる。

(4) パラメータの推定結果とその考察

a) 交通機関別分担モデルの推定

自己価格弾力性値  $\varepsilon_{2mmi}$  と交差価格弾力性値  $\varepsilon_{2mmi}$  を求めるために必要な交通機関別分担モデルの未知パラメータを表-3に示す。ここで、都心ダミーとは熊本都市圏

では都心環状線の内側、長崎都市圏ではPT調査のゾーンの内、都心地区と設定されたゾーンであり、自動車側の変数である。なお、推定には現況の公共交通機関分担率の実績値が  $W_{2mi} = 0$  であるゾーンは除外した。重相関係数はそれほど高いとはいえないものの、全ての説明変数の符号条件は論理的であり、統計的有意性も高い。両時点、両都市圏のモデルで、一般化費用が高いほど効用は低くなり、発ゾーンが都心ほど自動車の効用は低くなる事が分かる。

b) 代替弾力性、及び支出分配パラメータの推定

パラメータの推定結果を表-4に示す。熊本都市圏における2時点間と、熊本都市圏と長崎都市圏の比較について箇条書きで考察を行う。

- 1) 熊本都市圏では両年とも  $\alpha_{2C} > \alpha_{2M}$  より、交通に対する支出に占める自動車への支出比率のほうが公共交通機関への支出比率よりも大きくなっている。
- 2)  $\alpha_{2C}^{1984} < \alpha_{2C}^{1997}$  より、1984年よりも1997年の方が上記1)の傾向が強くなっていることが分かる。
- 3)  $\alpha_2^{1984} > \alpha_2^{1997}$  より、交通サービスに対する消費比率は1984年と比較して1997年の方が小さくなった。
- 4) 両年とも  $\sigma_1 < \sigma_2$  より、価格比の変化1%当たりに対する2財の需要比率の変化は、自動車と公共交通機関間の方が一般財と交通サービス間より大きい。
- 5)  $\sigma_2^{1984} > \sigma_2^{1997}, \sigma_1^{1984} > \sigma_1^{1997}$  より、1984年の方が1997年よりそれぞれの価格が変化した際の需要比率の変化が大きい。
- 6) 1997年の熊本都市圏では、 $\alpha_{2C}^{1997} > \alpha_{2M}^{1997}$  より、交通に対する支出において自動車への支出比率のほうが公共交通機関の支出比率よりも大きくなっているのに対し、長崎都市圏では  $\alpha_{2C}^{1996} < \alpha_{2M}^{1996}$  となっており、熊本都市圏と比較して自動車と公共交通機関の支出比率が逆になっていることが分かる。

表-3 交通機関別分担モデルの推定結果

|                | 熊本(1984)           |      | 熊本(1997)           |       | 長崎(1996)           |      |
|----------------|--------------------|------|--------------------|-------|--------------------|------|
|                | 推定値                | t値   | 推定値                | t値    | 推定値                | t値   |
| 定数項            | 1.349              | 9.35 | 2.176              | 16.91 | 0.529              | 3.32 |
| 都心ダミー          | -0.876             | 4.61 | -1.113             | 6.25  | -0.800             | 3.23 |
| 一般化費用 $\gamma$ | $-5.0 \times 10^4$ | 7.78 | $-3.1 \times 10^4$ | 7.60  | $-5.2 \times 10^4$ | 6.79 |
| 重相関 $R$        | 0.67               |      | 0.68               |       | 0.65               |      |
| データ数           | 156                |      | 171                |       | 87                 |      |

表-4 各種パラメータの推定結果

| 都市圏      | $\varepsilon_{CC}$ | $\varepsilon_{MM}$ | $\varepsilon_{CM}$ | $\varepsilon_{MC}$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_{2C}$ | $\alpha_{2M}$ |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| 熊本(1984) | -0.035             | -1.212             | 0.133              | 0.289              | 0.926      | 1.364      | 0.971      | 0.029      | 0.544         | 0.456         |
| 熊本(1997) | -0.017             | -1.048             | 0.064              | 0.256              | 0.788      | 1.123      | 0.998      | 0.002      | 0.726         | 0.274         |
| 長崎(1996) | -0.060             | -0.896             | 0.238              | 0.188              | 0.699      | 1.174      | 0.999      | 0.001      | 0.401         | 0.599         |

7) 両都市圏とも  $\sigma_1 < \sigma_2$  より、価格比の変化に対する需要比率の変化は自動車と公共交通機関間の方が一般財と交通サービス間より大きい。  $\sigma_2$  については長崎  $\sigma_2^{1996} >$  熊本  $\sigma_2^{1997}$  より、長崎都市圏の方が自動車と公共交通機関の価格が変化した際の需要比率の変化が大きいのに対し、  $\sigma_1$  については長崎  $\sigma_1^{1996} <$  熊本  $\sigma_1^{1997}$  より、熊本都市圏の方が一般財と交通サービス間の価格が変化した際の需要比率の変化が大きい。

#### 4. コンパクト性評価手法の適用

提案した都市のコンパクト性評価モデルを熊本都市圏の1984年（第2回熊本都市圏PT調査時）と1997年（第3回熊本都市圏PT調査時）の2時点に適用し、エネルギー消費量や後述するエネルギー効率性などのコンパクト性を示す指標の経時変化を分析する。また、熊本都市圏と長崎都市圏の異なる2都市に適用し、どのような都市構造や交通サービスが都市のコンパクト性に影響を与えるかを分析する。

##### (1) 対象地域の実態

熊本都市圏におけるDIDの面積と人口密度の推移を図

-2に示す。DID面積は年々拡大しているのに対し、人口密度の減少が進行している。図-3には、1984年から1997年の2時点の人口の増加率を示す。郊外部で大きな人口増加が見られ、スプロール化の進行が確認できる。

図-4と図-5は、両年の自動車と公共交通機関利用者の内の自動車利用者比率である。1984年でも大半のゾーンで自動車利用比率は75%を超えているものの、都心部の自動車利用比率は比較的低い。しかし、1997年には郊外部では95%を超え、都心部でも幾つかのゾーンを除いて、自動車利用比率が75%を超えている。

熊本都市圏との都市間比較を行う長崎都市圏（1996年

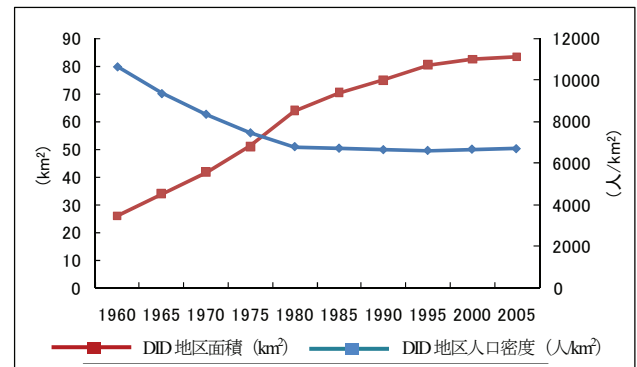


図-2 熊本都市圏 DID 面積と人口密度の推移

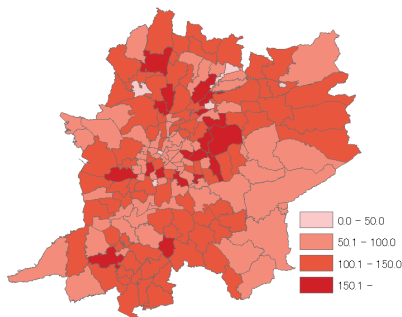


図-3 熊本都市圏の人口増加率

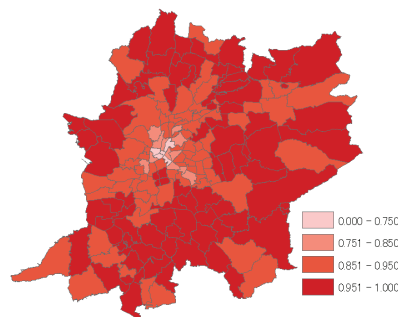


図-4 自動車利用比率（1997年）

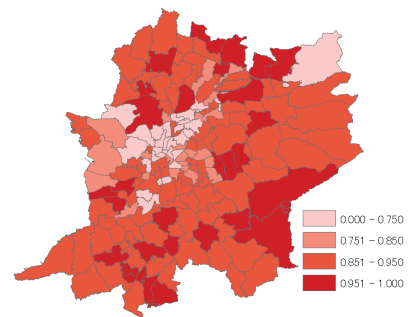


図-5 自動車利用比率（1984年）

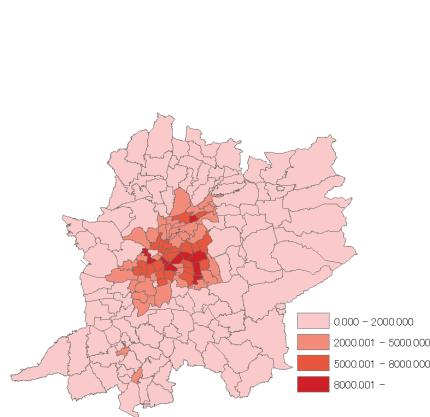


図-6 人口密度（1997年熊本都市圏）

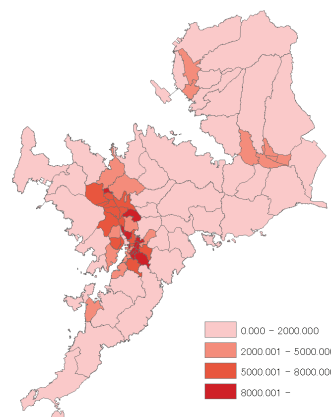


図-7 人口密度（1996年長崎都市圏）

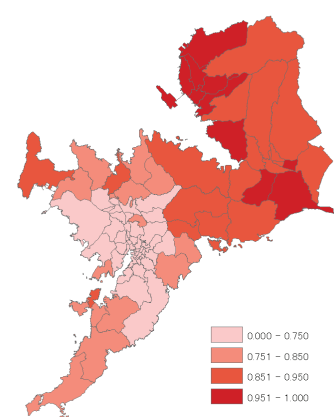


図-8 自動車利用比率（1996年長崎都市圏）

第3回長崎都市圏PT調査時)の人口密度を、熊本市圏のそれと合わせて図-6と図-7に示す。人口の空間的集積度が高いのは熊本市圏よりも長崎都市圏である。長崎都市圏の自動車利用率を図-8に示す。熊本市圏と比較すると、長崎都市圏は周辺の大村市や諫早市を除いて自動車利用率はかなり低い。特に中心部で顕著である。

(2) 分析のフロー

コンパクト性評価指標の分析は図-9のフローに従っ

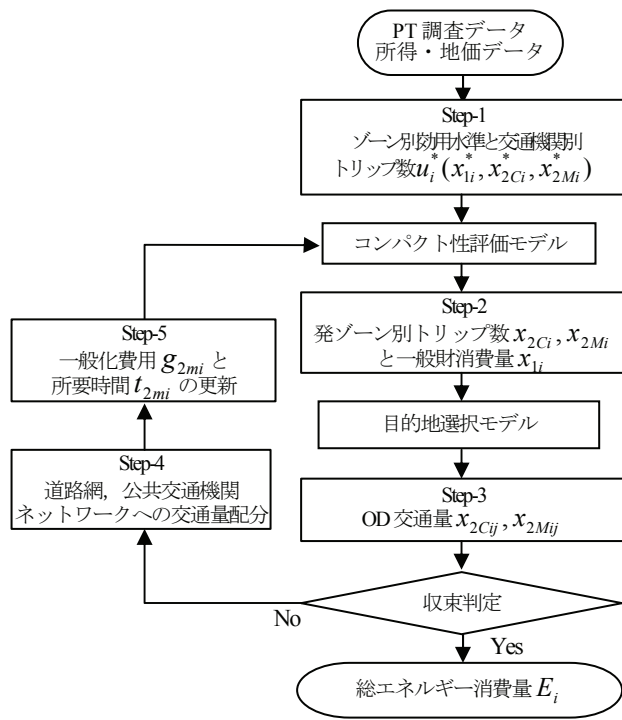


図-9 コンパクト性評価の分析フロー

て行う。以下、各ステップを概説する。

Step-1：式(10), (11)よりゾーン別の交通機関別トリップ数、および式(3), (4)より現在の効用水準を算出する。

Step-2：式(1)と(2)によるコンパクト性評価モデルを用いて、最適時の発ゾーン別交通機関別トリップ数  $x_{2Ci}$ ,  $x_{2Mi}$  と一般財の需要  $x_{li}$  を算出する。

Step-3：後述する目的地選択モデルによって目的地選択確率を算出し、交通機関別OD交通量を求める。

Step-4：交通機関別OD交通量を、自動車は利用者均衡配分法、公共交通機関は確率的配分法で、それぞれ道路、および公共交通機関ネットワークへ配分する。

Step-5：配分結果より一般化費用と所要時間  $t_{2Ci}, t_{2Mi}$  を更新し、再度、コンパクト性評価モデルを解く。これらのステップを交通機関別OD交通量が収束するまで繰り返す。これまでの経験では、実用的な収束判定基準であれば10回程度の繰り返しで収束する。

表-5 目的地選択モデルの推定結果

|          |       | 自動車                |         |      | 公共交通機関              |        |      |
|----------|-------|--------------------|---------|------|---------------------|--------|------|
|          |       | 推定値                | t値      | R    | 推定値                 | t値     | R    |
| 熊本(1984) | 都心ダミー | -0.129             | (4.2)   |      | 0.111               | (4.2)  |      |
|          | 従業員人口 | $5.50 \times 10^6$ | (2.0)   | 0.91 | $3.26 \times 10^5$  | (16.5) | 0.55 |
|          | 一般化費用 | -0.003             | (209.8) |      | $-1.95 \times 10^4$ | (27.9) |      |
| 熊本(1997) | 都心ダミー | -0.443             | (17.7)  |      | 0.016               | (0.6)  |      |
|          | 従業員人口 | $2.96 \times 10^5$ | (16.0)  | 0.93 | $1.73 \times 10^5$  | (9.9)  | 0.39 |
|          | 一般化費用 | -0.002             | (287.8) |      | $-1.08 \times 10^4$ | (18.5) |      |
| 長崎(1996) | 都心ダミー | -1.473             | (29.1)  |      | 0.116               | (15.1) |      |
|          | 従業員人口 | $9.91 \times 10^5$ | (16.7)  | 0.88 | $8.10 \times 10^5$  | (8.4)  | 0.57 |
|          | 一般化費用 | -0.003             | (131.7) |      | $-2.45 \times 10^4$ | (38.8) |      |

表-6 熊本市圏における2時点間の比較

|                   | 1997                  |                              | 1984                  |                              |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|
|                   | 実績                    | 最小時                          | 実績                    | 最小時                          |
| エネルギー比率           |                       |                              |                       |                              |
| 総エネルギー消費量(kcal/日) | $3.21 \times 10^{10}$ | $2.90 \times 10^{10}$ (0.90) | $1.77 \times 10^{10}$ | $1.39 \times 10^{10}$ (0.79) |
| 総費用(円/日)          | $7.51 \times 10^9$    | $7.78 \times 10^9$ (1.04)    | $4.21 \times 10^9$    | $4.50 \times 10^9$ (1.07)    |
| 総交通費用(円/日)        | $1.90 \times 10^8$    | $1.35 \times 10^8$ (0.71)    | $2.30 \times 10^8$    | $2.17 \times 10^8$ (0.94)    |
| 一般財消費エネルギー        | $2.66 \times 10^{10}$ | $2.78 \times 10^{10}$ (1.04) | $1.21 \times 10^{10}$ | $1.30 \times 10^{10}$ (1.08) |
| 自動車トリップによる消費エネルギー | $5.36 \times 10^9$    | $7.98 \times 10^8$ (0.15)    | $5.36 \times 10^9$    | $4.00 \times 10^8$ (0.08)    |
| MTトリップによる消費エネルギー  | $1.28 \times 10^8$    | $3.49 \times 10^8$ (2.73)    | $1.72 \times 10^8$    | $4.92 \times 10^8$ (2.86)    |

表-7 熊本都市圏と長崎都市圏の2地点間の比較

|                   | 熊本都市圏 1997            |                             | 長崎都市圏 1996            |                             |
|-------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                   | 実績                    | 最小時                         | 実績                    | 最小時                         |
| エネルギー比率           |                       |                             |                       |                             |
| 総エネルギー消費量(kcal/日) | $3.21 \times 10^{10}$ | $2.90 \times 10^{10}(0.90)$ | $2.02 \times 10^{10}$ | $1.69 \times 10^{10}(0.84)$ |
| 総費用(円/日)          | $7.51 \times 10^9$    | $7.78 \times 10^9(1.04)$    | $4.55 \times 10^9$    | $4.83 \times 10^9(1.06)$    |
| 総交通費用(円/日)        | $1.90 \times 10^8$    | $1.35 \times 10^8(0.71)$    | $2.57 \times 10^8$    | $3.89 \times 10^8(1.51)$    |
| 一般財消費エネルギー        | $2.66 \times 10^{10}$ | $2.78 \times 10^{10}(1.04)$ | $1.51 \times 10^{10}$ | $1.56 \times 10^{10}(1.03)$ |
| 自動車トリップによる消費エネルギー | $5.36 \times 10^9$    | $7.98 \times 10^8(0.15)$    | $4.78 \times 10^9$    | $4.28 \times 10^8(0.09)$    |
| MTトリップによる消費エネルギー  | $1.28 \times 10^8$    | $3.49 \times 10^8(2.73)$    | $3.50 \times 10^8$    | $9.15 \times 10^8(2.62)$    |

(3) 目的地選択モデルの推定

コンパクト性評価モデルから得られる発ゾーン別交通機関別トリップ数から交通機関別OD交通量を予測するために必要な交通機関別目的地選択モデルを推定する。ここでは、 $j$ ゾーンの都心ダミー  $D_j$  と従業人口  $Z_j$ 、ゾーン間の一般化費用  $g_{2Cij}$ 、 $g_{2Mij}$  を説明変数とした集計ロジットモデルを用いた。

推定結果を表-5に示す。全てのケースで従業人口が多く、一般化費用が低いゾーンほど効用は高い。説明変数の符号条件は論理的であり、熊本(1997)の公共交通機関に対する都心ダミーを除いて統計的有意性は高い。自動車についてはいずれも重相関係数が0.8以上となり、高い適合度を示しているが、公共交通機関については重相関係数が0.4~0.6であり、必ずしも適合性の高いモデルが推定されているわけではない。

(4) 現況とエネルギー最小時の比較

a) 熊本都市圏における2時点間の比較

熊本都市圏における2時点の都市エネルギー消費量の最小値と実績値とを比較したものを表-6に示す。ここでは、総エネルギー消費量の大きさを実績値の数値を基準として円グラフの直径で表している。また、円グラフ内には一般財、自動車と公共交通機関トリップによる消費エネルギーの比率も示している。まずは、熊本都市圏における2時点間の比較を行った結果について、以下に箇条書きで考察の結果を示す。

- 1) 1997年の総エネルギー消費量と総費用の実績値は、それぞれ1984年の1.84(=3.21/1.77)倍、1.79(=7.51/4.21)倍と増加している。
- 2) 消費エネルギーうち、一般財の消費エネルギーは1984年の2.20(=2.66/1.21)倍と倍増しているが、自動車と

公共交通機関トリップエネルギーは、それぞれ1.00(=5.36/5.36)倍、0.74(=1.28/1.72)倍とほとんど変化しないか、あるいは減少している。

3) 2時点とも、一般財の消費エネルギーと公共交通機関トリップによる消費エネルギーを増加させ、自動車トリップによるエネルギーを減少させることにより、現在の効用水準を維持したままで都市全体の総エネルギー消費量を最小化することができる。その時、総交通費用は減少させることができるが、総費用は増加する。この増加分がコンパクト化政策によって追加的に必要なコストとなる。本来なら、公共交通機関の整備費用や施策導入費用についても費用に計上する必要がある。ここでは、総エネルギー消費量を最小にすることによって発生する総走行時間の増加や一般財の追加的な消費支出分だけを追加的費用として考察した。

4) 実績値に対する最小時の総エネルギー消費量の比率は、1997年は0.90(=2.90/3.21)、1984年は0.79(=1.39/1.77)であり、1997年の方が大きい。この結果は、DID地区の人口密度が1997年よりも高く、よりコンパクトな都市構造であったと考えられる1984年の方がコンパクト性の程度が低かったことを意味する。

5) これは事前の予想に反する。これは、1984年に比較して1997年には交通以外の財のエネルギー消費原単位が2割も増加していること(表-2参照)、交通混雑の悪化の影響で分単位の交通によるエネルギー消費量が増加したことなどのために、現況のエネルギー消費量が最適な状況から乖離してきたためと考えられる。さらに、人口密度はDIDにおいては1984年直近の6,701人/km<sup>2</sup>の方が1997年直近の1995年6,593人/km<sup>2</sup>よりも大きいものの、熊本市域、および都市圏全域では、それぞれ2,235人/km<sup>2</sup>、819人/km<sup>2</sup>と2,418人/km<sup>2</sup>、909人/km<sup>2</sup>と、1984年の



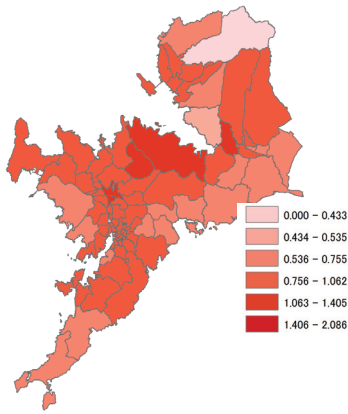


図-10 1996年長崎都市圏  $\Delta EU_i^{**}$

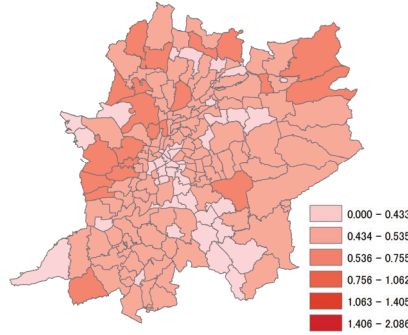


図-11 1997年熊本都市圏  $\Delta EU_i^{**}$

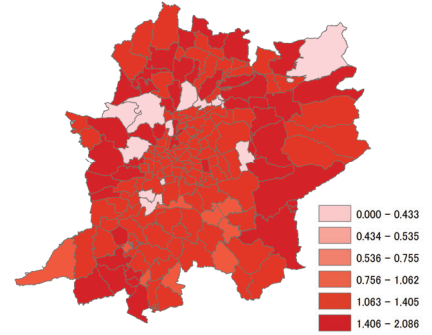


図-12 1984年熊本都市圏  $\Delta EU_i^{**}$

方が1997年よりも小さいためと考えられる。

#### b) 熊本都市圏と長崎都市圏間の都市間比較

熊本都市圏と長崎都市圏における都市エネルギー消費量の最小値と実績値の比較結果を表-7に示す。以下に箇条書きで考察の結果を示す。

- 1) 両都市とも、一般財の消費エネルギーと公共交通機関トリップによるエネルギーの消費を増加させ、自動車トリップによるエネルギー消費を減少させることにより、現在の効用水準を維持したままで総エネルギー消費量を減少させることができる。しかし、総費用は増加せざるを得ない。
- 2) 実績値と比較して、エネルギー消費最小時の総交通費用は熊本都市圏では減少するが、長崎都市圏では逆に増加する。これは、熊本都市圏では現況より総交通費用を削減できるエネルギー消費量を最小にする消費パターンが可能であるが、長崎都市圏では今以上に混雑が進んで総交通費用が増加してしまうことを意味している。
- 3) 実績値に対する最小時の総エネルギー消費量の比率は、熊本都市圏が 0.90 (=2.90/3.21) と、長崎都市圏の 0.84 (=1.69/2.02) よりもやや大きくなった。
- 4) この結果からは、長崎都市圏の方が熊本都市圏よりもコンパクト性が大きいのではないかと当初の予想とは逆の結果になった。確かに、DIDの人口密度については、長崎都市圏は1996年直近の1995年 8,312人/km<sup>2</sup>に対して、熊本都市圏は1997年直近の1995年 6,593人/km<sup>2</sup>で長崎都市圏の方がかなり大きい。また、長崎都市圏には長崎市以外にも大村市や諫早市などの人口集積地を含んでおり、都市圏全体の人口密度は、熊本都市圏が 909人/km<sup>2</sup>に対して、長崎都市圏は 1,272人/km<sup>2</sup>と 40%も多い。しかし、市域の人口密度は、長崎市(1996)が 1,804人/km<sup>2</sup>、熊本市(1997)が 2,418人/km<sup>2</sup>で熊本市の方が 30%以上も高い。これらのことから、熊本都市圏では単一中心であり、人口密度が高い居住域が比較的狭いのと比較して、長崎都市圏では長崎市以外に比較的人口規模の大

きい市が2つもあり、DID以外での居住域が広がっているためと考えられる。

### 5. 都市のコンパクト性に影響を与える要因

#### (1) エネルギー効率の空間分布比較

現況とエネルギー最小時の効用1単位当たりに必要なエネルギー消費量を、時点間、および都市間で比較するために、

$$EU_i = E_i / u_i^* \quad (22)$$

$$EU_i^{**} = E_i^{**} / u_i^* \quad (23)$$

のようなエネルギー効率性指標  $EU_i$ 、 $EU_i^{**}$  を定義する。また、両者の差で定義したエネルギー効率性差

$$\Delta EU_i^{**} = EU_i - EU_i^{**} \quad (24)$$

が大きいほど、現況のエネルギー消費効率は最小時と乖離が大きく、改善の余地があるゾーンであるといえる。

長崎都市圏、および熊本都市圏の2時点のエネルギー効率性差  $\Delta EU_i^{**}$  の空間分布を図-10、および図-11と図-12に示す。熊本都市圏の2時点と比較すると、1997年と1984年とも、都心部だけでなく、鉄道や幹線道路の沿線でエネルギー効率性差は相対的に小さくなっている。時点間で比較すると、エネルギー効率性差のレンジは1984年の方が1997年よりも大きい。この理由として、1997年のエネルギー消費量が1984年の1.61倍であるのに対して、効用水準は2.50倍となっており、エネルギー消費量の増加以上に効用水準が増加しているためと考えられる。一方、長崎都市圏では、エネルギー効率性差のレンジが1994年の熊本都市圏と比較してかなり大きく、都市圏内での格差も大きいことが分かる。一方で、都心部や鉄道と幹線道路の沿線ではエネルギー効率性差は小さい。

## (2) エネルギー効率性差とゾーン特性との関連分析

ここでは、式(22)の現況のエネルギー効率性指標値  $EU_i$ 、および式(24)に示したエネルギー効率性差  $\Delta EU_i^{**}$  とゾーン特性や交通特性を示す各種指標との相関関係を分析することにより、どのような都市構造や交通サービスを有する都市がエネルギーの消費効率を高めてくるかを明らかにする。

ゾーン特性を表す指標としては、PTのCゾーン別の密度指標（人口密度、産業別従業者密度など）や土地利用指標（用途地域、産業別従業者比率など）、交通特性を表す指標としてはモビリティ指標（道路密度や平均バス運行頻度など）やアクセシビリティ指標（都心までの距離や所要時間など）などがあるが、ここではこれらの指標を説明変数として準備し、相関分析を行った後、重回帰分析を行った。

相関分析の結果を表-8に示す。現況のエネルギー効率性指標  $EU_i$  に対しては、ゾーン特性の人口密度との相関はかなり高く、交通特性のバス停数や都心までの距離なども比較的高い相関を持つ。エネルギー効率性差  $\Delta EU_i^{**}$  についても、人口密度の相関は他に比較すると高い。

しかし、人口密度だけで両者を説明することはできないので、その他の変数も用いてステップワイズ法による重回帰分析を行った。その結果を表-9に示す。現況のエネルギー効率性指標  $EU_i$  を説明するモデルは、 $F$ 値も修正済み $R^2$ も高く、説明力のあるモデルが推定されている。パラメータの符号は論理的であり、 $t$ 値も概ね高いことから、これらの都市構造や交通サービスを表す指標が都市のコンパクト性の程度に影響していることが分かる。 $\Delta EU_i^{**}$  については、アクセシビリティ指標である都心までの距離を説明変数に入れると公共交通平均費用との重共線性のために両者の $t$ 値がかなり低下するため、後者だけを説明変数として導入した。 $F$ 値は高く、修正済み $R^2$ も概ね高いモデルが推定されている。また、パラメータの符号は論理的であり、 $t$ 値も高い。人口や3次産業従業者の集積、公共交通サービス水準の改善といった施策がエネルギー効率性をより高めることになりうるこ

とを示している。

## 6. おわりに

本論文では、自動車と公共交通機関によるトリップから成る交通サービスに加えて、一般財も含めた個人の効用関数を定義し、現在の効用水準を維持するという条件の下でエネルギー消費量を最小化した場合の解と実績値とを比較することによって、都市のコンパクト性を評価するミクロ経済モデルを提案した。このモデルを熊本都市圏における2時点間、および同一時点の熊本都市圏と長崎都市圏に適用し、どのような都市構造や交通サービスが都市のコンパクト化に寄与するかについて分析を行った。以下に結論と今後の課題を列挙する。

- 1) 交通サービスに対する消費を一般財の消費に転換させたり、自動車トリップを公共交通機関トリップに転換させることによって、現在の効用水準を維持したまま都市の総エネルギー消費量を減少させることが可能である。
- 2) 熊本都市圏では、郊外化が進み、自動車分担率も増加した1997年の方が、1984年に比べて都市の総エネルギー消費量の削減可能性が高いと予想していたが、1984年の方が1997年より削減可能性がやや高いという結果となった。これは自動車など、要素ごとのエネルギー効率性が飛躍的に向上したためと思われる。
- 3) 長崎都市圏と熊本都市圏の比較でも、コンパクトな都市構造をしていると思われる長崎都市圏の方が熊本都市圏よりエネルギー消費量の削減可能性が、若干ではあ

表-8 エネルギー効率性指標との相関分析

| 特性    | 指標         | 説明変数     | $EU_i$ | $\Delta EU_i^{**}$ |
|-------|------------|----------|--------|--------------------|
| ゾーン特性 | 密度指標       | 人口密度     | -0.59  | -0.54              |
|       | 土地利用指標     | 3次産業従業比率 | -0.19  | -0.29              |
| 交通特性  | モビリティ指標    | 道路密度     | 0.49   | 0.38               |
|       |            | バス停数     | -0.43  | -0.33              |
|       | アクセシビリティ指標 | 平均バス運行頻度 | -0.41  | -0.34              |
|       |            | 公共交通平均費用 | -0.37  | -0.31              |
|       |            | 都心までの距離  | 0.45   | 0.36               |

表-9 エネルギー効率性と都市・交通特性の関係

| 特性    | 指標         | 説明変数              | $EU_i$              |        | $\Delta EU_i^{**}$  |        |
|-------|------------|-------------------|---------------------|--------|---------------------|--------|
|       |            |                   | パラメータ               | $t$ 値  | パラメータ               | $t$ 値  |
|       |            | 定数項               | 13.5                | (9.53) | 0.338               | (7.62) |
| ゾーン特性 | 密度指標       | 人口密度(千人 $km^2$ )  | $-8.42 \times 10^2$ | (8.13) | $-2.59 \times 10^3$ | (7.71) |
|       | 土地利用指標     | 3次産業従業比率(指数)      | -8.62               | (5.91) | -0.326              | (7.28) |
| 交通特性  | モビリティ指標    | 公共交通平均費用(千円/トリップ) | 0.707               | (1.26) | $2.00 \times 10^2$  | (3.61) |
|       | アクセシビリティ指標 | 都心までの距離(km)       | 0.0151              | (1.81) | -                   | -      |
|       |            | $F$ 値             | 39.6                |        | 45.6                |        |
|       |            | 修正済み $R^2$        | 0.49                |        | 0.44                |        |

るが高いという結果となった、長崎都市圏における現況の自動車分担率はかなり小さいものの、自動車トリップのエネルギー消費原単位が熊本都市圏よりもかなり大きく推計されているためと考えられる。

4) 2)でもエネルギー原単位の推計値の影響が大きいことから、今後は異なる年時、異なる地域での精緻なエネルギー消費原単位の推計が必要であろう。

5) 熊本都市圏でも長崎都市圏でも、都心部と公共交通機関軸や幹線道路の沿線ゾーンでは、現況とエネルギー最小時のエネルギー効率の差が小さい。また、人口密度といった密度指標や3次産業従業者比率といった土地利用指標が高いほど、公共交通平均費用といったモビリティ指標が高いほど、エネルギー効率性差は小さいことから、人口や3次産業の集積、公共交通サービス水準の向上がエネルギー効率性をより高める施策となりうる事が明らかになった。

#### 参考文献

- 1) Newman, P. and Kenworthy, J.: *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Island Press, Washington DC, 1999.
- 2) 佐保 肇：中小都市における都市構造のコンパクト性に関する研究，第 33 回日本都市計画学会学術研究論文集，pp.73-78, 1998.
- 3) 谷口 守，村上威臣，森田哲夫：個人行動データを用いた都市特性と自動車利用者の関連分析，日本都市計画学会学術研究論文集，No.34, pp.967-972, 1999.
- 4) 森本章倫，小池弘隆：公共交通のエネルギー消費の効率性と都市特性に関する研究，日本都市計画学会学術研究論文，No.35, pp.511-516, 2000.
- 5) 小島 浩，吉田 朗，森田哲夫：交通・環境負荷を小さくする都市構造と交通施策に関する研究，日本都市計画学会都市計画論文集，No.38-3, pp.553-558, 2003.
- 6) 中井秀信，森本章倫：コンパクトシティ政策が民生・交通部門のエネルギー消費量に与える影響に関する研究，土木

学会論文集 D, Vol.64, No.1, pp.1-10, 2008.

- 7) 紀伊雅敦，鈴木徹也，谷下雅義，土井健司：人口減少下での持続可能な都市交通に関するヴィジョンモデルの試み，土木学会論文集 D, Vol.65, No.3, pp.303-316, 2009.
- 8) 近成 純，青山吉隆，中川 大，松中亮治：京阪神都市圏におけるモビリティ水準と交通エネルギー消費の変化に関する研究，日本都市計画学会都市計画論文集，No.38-3, pp.547-552, 2003.
- 9) 土井俊祐，青山吉隆，中川 大，柄谷友香，近成 純：モビリティを考慮した都市交通エネルギー施策に関する研究，土木計画学研究論文集，No.23, pp.887-894, 2006.
- 10) 上田孝行，武藤慎一，森杉壽芳：自動車交通による外部不経済抑制政策の国民経済的評価－静学的応用一般均衡（CGE）と動学的応用一般均衡（DCGE）の比較分析－，運輸政策研究，Vol.1, No.1, pp.39-53, 1998.
- 11) 溝上章志：効用水準とエネルギー消費の視点から見た都市のコンパクト性評価法，日本都市計画学会都市計画論文集，No.43-3, pp.127-132, 2008.
- 12) 金本良嗣，蓮池勝人，藤原徹：政策評価マイクロモデル，東洋経済新報社，2006.
- 13) 熊本県都市計画課，熊本都市圏総合都市交通体系調査報告書，1999.
- 14) 長崎都市圏総合都市交通計画協議会，長崎都市圏パーソントリップ調査報告書，1997.
- 15) 国土交通省道路局，時間価値原単位および走行経費原単位（平成 15 年価格）の算出方法，pp.92, 2003.
- 16) 国土交通省道路局，時間価値原単位および走行経費原単位（平成 15 年価格）の算出方法，pp.27, pp.41, 2003.
- 17) (財)省エネルギーセンター：EDMC/エネルギー・経済統計要覧，pp.80-81, 2004.
- 18) (財)省エネルギーセンター：EDMC/エネルギー・経済統計要覧，pp.116-117, 2004.

(2011.2.25 受付)

## A MODEL TO EVALUATE ENERGY EFFICIENCY FROM THE VIEWPOINT OF INDIVIDUAL QUALITY OF LIFE

Yanhong YIN and Shoshi MIZOKAMI

This study attempts to better understand the relationship between energy consumption, individual quality of life and urban structure. Three main parts are included in this paper. In section two, a model is developed to estimate the real and minimum energy consumption on maximum individual utility level. Then we applied the model to Kumamoto and Nagasaki metropolitan regions to estimate the related individual energy consumption. In section three we analyzed the relationship between energy efficiency and compact city characteristics from density, diversity and accessibility aspect. In section four, eight policy scenarios related to gasoline tax increasing and mass-transit fare reduction is simulated to estimate the effects on energy consumption. Finally the paper discusses the results and gives conclusions.