

# 消費エネルギー削減の視点から見た都市圏のコンパクト化の効果と費用

相川 航平<sup>1</sup>・溝上 章志<sup>2</sup>・Yin Yanhong<sup>3</sup>・円山琢也<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 熊本大学博士前期課程 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)  
E-mail: 123d0088@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

<sup>3</sup>正会員 熊本大学特別研究院 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

<sup>4</sup>正会員 熊本大学 政策創造研究教育センター (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

近年、日本では自動車中心社会の進展によるエネルギー消費量の増加が問題となっている。この問題を解決する手段として、一人当たりのエネルギー消費量が少ない都市形態であるコンパクトシティの導入が提案されている。本研究では、コンパクトシティ政策を熊本都市圏に適用した場合、個人のエネルギー消費量を削減することが可能な都市形態、及び交通サービス体系はどのようなものかを分析することを目的とする。ここでは、熊本都市圏における2030年の都市圏人口をベースとして、人口集積タイプの異なる3つの都市構造シナリオを想定してエネルギー消費量の比較を行った結果、TOD型が最も有効であった。

**Key Words :** compact city, energy consumption, future prediction, level of utility, scenario analysis

## 1. はじめに

現在の日本では、自動車中心社会が進展したことにより、都市郊外部のスプロール化や、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みられるようになり、それに伴うエネルギー消費量の増加をどのように押さえるかが課題となっている。また、世界的にも、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迫られている。近年では、このような問題を解決する手段のひとつとして、一人当たりのエネルギー消費量が小さく持続可能な都市形態であるコンパクトシティが注目されており、多くの研究がなされている。例えば谷口<sup>1)</sup>は都市の構造的なコンパクト化政策だけでなく、居住者の行動特性を考慮したモビリティ・マネジメント方策を組み合わせることで実施することの意義を検討している。また、水本<sup>2)</sup>らは効果的な環境負荷低減に繋がる人口の集約方法をCO<sub>2</sub>排出量の視点から考案している。しかし、都市のコンパクトシティ化を検討する上で、これらの研究のようにコンパクトシティ化への過程を研究することも重要であるものの、それと平行してコンパクトシティとはどのような都市形態や交通サービスを持つものかについての検討も行うことが

必要不可欠である。魚路<sup>3)</sup>など、この検討を行っている既存研究もあるものの、多くの検討の余地が残っている。このような中、土井<sup>4)</sup>らは現在のモビリティ水準を維持しながらエネルギーを最小化する都市構造や交通政策を検討しており、非常に興味深い。

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。そのため、交通サービスに加えて、一般財から得られる効用も維持するという条件の下でエネルギーを最小化する都市構造や交通サービスを考える必要がある。この概念に沿ったコンパクト性の評価モデルについては、すでに著者ら<sup>5)</sup>の研究によって提案がされており、熊本都市圏を対象とした2時点間比較や、熊本都市圏と長崎都市圏の地域間比較などが行われている。その中で、時間点や地域点でコンパクト性の程度が異なることに加えて、エネルギー削減の施策によって都心周辺部及び幹線道路沿線部の単位エネルギー消費量あたりの効用水準が向上することを明らかにしており、その周辺に生活圏を集めるようなコンパクト化施策を行うことがより効率の良い都市の消費エネルギー量削減に繋がる可能性が示唆されている。

そこで本研究では、その可能性を踏まえつつ、熊本都市圏における将来の都市圏構造をベースとして

人口集積のタイプの異なる3つの都市圏構造シナリオを想定し、前述したコンパクト性評価モデルを使用してシナリオ分析をすることにより、将来どのような都市形態及び交通サービスすることで都市全体のエネルギー消費量を削減することが可能か分析を行う。

本論文は6章から構成されている。まず、第2章で設定した都市圏構造シナリオについて述べ、第3章では、コンパクト性を評価する方法を説明する。第4章では、第3章で説明した方法を用いて実証分析を行い、最後に第6章で本研究の結論と問題点について述べる。本論文は、すでに文献<sup>5)</sup>で発表されている理論と実証研究が基礎となっているが、1)熊本県における将来の都市圏構造シナリオを想定しての将来予測とその比較、2)シナリオごとの最小都市エネルギー消費量の算出及びコンパクト性の評価を行っている点が新しい。

## 2. 都市圏構造シナリオの設定

### (1) 都市圏構造シナリオの概要

既存研究によって開発されているコンパクト性評価モデル<sup>5)</sup>には、居住人口の変化に対応して交通需要の予測ができる機能が含まれている。そこでその機能を利用し、居住人口の集約方法を変化させることで熊本県の将来の都市形態及び交通サービスを表現する都市圏構造シナリオを3つ想定する。

また現在、少子高齢化などの問題から日本の人口は減少傾向にある。熊本県も例外ではなく、将来の全体人口の減少が予想されている。都市圏構造シナリオを想定するにあたり、この全体人口の変化を前提とする。人口のデータは、2030年における予測データを使用する<sup>6)</sup>。

想定するシナリオは、1997年（第3回熊本都市圏PT調査時）から2030年への人口趨勢シナリオであるシナ

リオA、都市の中心部に人口を集約するシナリオB、公共交通サービスの利便性の高い主要な交通拠点、及びその周辺に人口を集約するシナリオCの3つである。シナリオBの中心部は市街化区域とし、シナリオCの主要な交通拠点及びその周辺は、熊本市都市マスタープラン<sup>7)</sup>により提案されている都市構造に整合させて設定する。図-1にシナリオ想定の方法を表す概要図を示す。

### (2) 居住人口の集約方法

#### (i) シナリオA

現況と生活圏を変更しないため、都市圏全域の居住人口 $P_i$ が1997年から2030年の人口へ変動するだけというシナリオである。

#### (ii) シナリオB

2030年における居住人口を市街化区域内へ集約するというシナリオである。操作として(1)1997年における市街化区域内の各ゾーンの人口比率に比例させて集約する方法と、(2)市街化区域内の外側から中心に向けて同心円状に人口密度を高めていく方法の2つを行う。(1)は、ゾーンの人口比率がそのままそのゾーンの住みやすさや許容人口を表しているという仮定に基づいている。(2)では中心を下通りの鶴屋前（熊本市の中心）とし、そこから半径3、6、9、12、15kmの順に人口が40、24、18、12、6%になるように配分する。

#### (iii) シナリオC

2030年における居住人口を、公共交通サービスの利便性の高い主要な交通拠点、及びその周辺に集めるというシナリオである。交通拠点周辺としては、生活拠点と生活域を設定する。交通拠点、生活拠点は前述の通り、熊本市都市マスタープランに整合させて設定する。熊本市都市マスタープランでは、都心部から周辺へ諸機能が段階的に立地する市街地の構造を目指しており、熊本市を5つのエリアに分けて、各エリア毎に核となる地域を設定している。核として設定されているのは、交通機能が発達しており行政機関等も充実している都市核（エリアの中心）と、地域コミュニティの中心として住民の生活の拠点となっている生活核である。今回はこの都市核と生活核に対応させる形で交通拠点と生活拠点を設定することで、居住人口を公共交通サービスの利便性の高い主要な交通拠点、及びその周辺に集めるという操作を熊本都市圏においてより適切なものになるようにしている。しかし、このマスタープランは熊本市におけるものであるため、熊本県全体の居住人口をこの2つの拠点に集約するシナリオを想定す

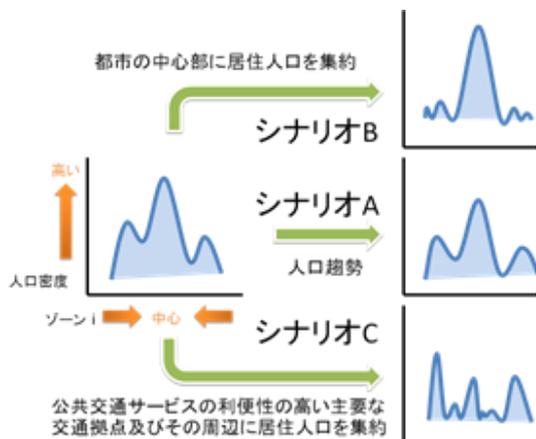


図-1 シナリオ想定の方法概要図

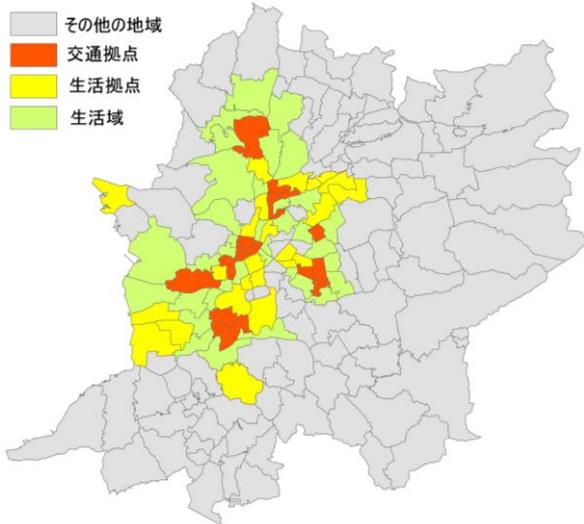


図-2 交通拠点及びその周辺のゾーン

るのは妥当ではない。そこで、新たに居住人口を集約するゾーンとして、交通拠点を囲む形で生活域を設定する。人口を集約する方法としては、2030年における居住人口を交通拠点と生活拠点の各ゾーンの1997年における人口比率に比例させて配分し、残りの人口を生活域の各ゾーンの人口が等しくなるように配分するという方法をとる。ここで、交通拠点と生活拠点に重みを持たせるため、これらの拠点の1997年における人口比率は1.5倍して集約を行う。図-2に設定した交通拠点及びその周辺のゾーンを示す。

### 3. コンパクト性評価手法の概要

ここでは、各シナリオのコンパクト性を評価する手法について説明する。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。都市のコンパクト性を追求する際、各シナリオで個人が満たしている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重要である。そこでコンパクト性の評価には、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モデルを使用する<sup>45)</sup>。3.1で予算制約下での効用最大化問題から各シナリオの個人の効用 $u_{si}$ の算出方法を説明し、3.2では3.1で算出した効用水準を維持する条件下での都市エネルギー消費量の最小値 $E^{**}$ の算出方法を説明する。

#### (1) 予算制約下での効用最大化に基づく需要関数及び都市エネルギー消費量の算出

##### (i) 仮定

本モデルでは、シナリオ $s$ のゾーン $i$ に居住する代表

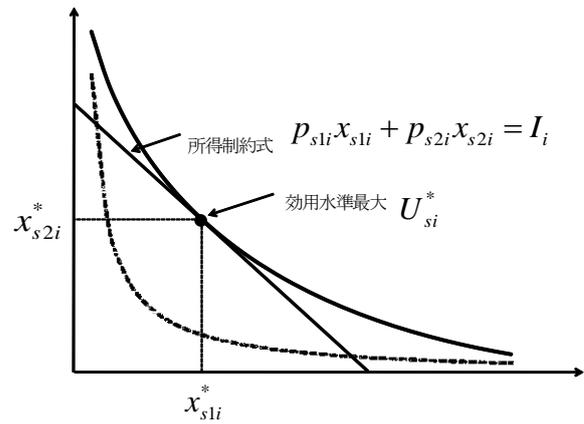


図-3 効用水準最大化問題

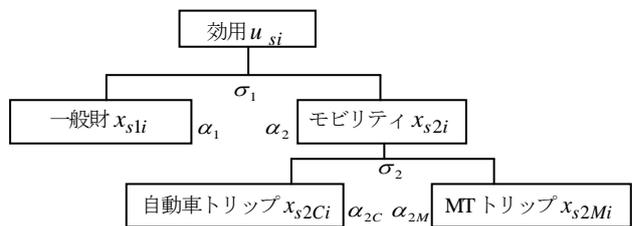


図-4 層化CES型効用関数の構造

的個人は、自動車(C)によるトリップ $x_{s2Ci}$ と公共交通機関(M)によるトリップ $x_{s2Mi}$ 、及びその他の一般財 $x_{s1i}$ の3つの財を消費する。また、自動車によるトリップ $x_{s2Ci}$ と公共交通機関によるトリップ $x_{s2Mi}$ により交通サービスの水準 $x_{s2i}$ が決まると仮定する。図-3は財が一般財と交通サービス水準の場合の効用水準最大化問題を図示したものである。効用水準の無差別曲線と所得制約式の接点によって、シナリオ $s$ の効用水準が表されている。

##### (ii) 効用関数

ゾーン $i$ に居住する代表的個人は、自動車と公共交通機関からなる交通サービスとその他の一般財の消費によって効用を得ている。シナリオ $s$ でのこれらの需要量を求めるために、ここでは図-4のようなNested形態を採用し、各段階における2財間の代替の弾力性を別個に設定できるようなCES型効用関数<sup>8)</sup>を使用する。

2段階目では自動車トリップ数と公共交通機関トリップ数から交通サービス水準を、1段階目では一般財と交通サービスの消費量から効用水準が求められる構造になっている。これらをCES型効用関数で表して定式化すると、1段階と2段階はそれぞれ以下ようになる。

$$u_{si}(x_{s1i}, x_{s2i}) = \left\{ \alpha_1 x_{s1i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} + \alpha_2 x_{s2i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} \right\}^{\sigma_1 / (\sigma_1-1)} \quad (1)$$

$$x_{s2i}(x_{s2Ci}, x_{s2Mi}) = \left\{ \alpha_{2C} x_{s2Ci}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} + \alpha_{2M} x_{s2Mi}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} \right\}^{\sigma_2 / (\sigma_2-1)} \quad (2)$$

$\sigma_1, \sigma_2$  は、それぞれ1段階目と2段階目の2財間の代替弾力性である。代替弾力性とは、2財間の価格比の変化1%当たりに2財の需要比率が何%変化するかを表すパラメータであり、各段階における2財間の代替性の程度を表す。また、 $\alpha_1$ と $\alpha_2$ 、および $\alpha_{2C}$ と $\alpha_{2M}$ は一般財と交通サービス、および自動車によるトリップ数と公共交通機関によるトリップ数を分配するパラメータであり、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。

### (iii) 効用水準の算出

式(1)、(2)の効用関数は、シナリオ $s$ の2段階での自動車と公共交通機関の発ゾーン別トリップ数 $x_{s2Ci}, x_{s2Mi}$ と、1段階での一般財の消費と交通サービス水準 $x_{s1i}, x_{s2i}$ の関数で表されている。効用水準の算出は、下位の段階から行っていく。

交通サービス水準が式(2)のようなCES型効用関数のとき、2段階の交通に消費可能な予算制約条件下での交通サービス水準最大化問題は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \max_{\{x_{s2Ci}, x_{s2Mi}\}} \quad & x_{s2i} = \left\{ \alpha_{2C} x_{s2Ci}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} + \alpha_{2M} x_{s2Mi}^{(\sigma_2-1)/\sigma_2} \right\}^{\sigma_2/(\sigma_2-1)} \quad (3) \\ \text{s.t.} \quad & p_{2sCi} x_{s2Ci} + p_{2sMi} x_{s2Mi} \leq I_{2i} \quad (4) \end{aligned}$$

ここでは、シナリオ $s$ の自動車と公共交通機関による発ゾーン別1人1日当たりのトリップ数 $x_{s2Ci}, x_{s2Mi}$

(trip/人・日)が変数である。 $p_{2sCi}, p_{2sMi}$ はそれぞれ自動車と公共交通機関による発ゾーン別の1トリップあたりの交通費用(円/trip)であり、 $I_{2i}$ はゾーン $i$ に居住する1人1日当たりの総交通費用(円/人・日)である。最適性の1階の条件、及び予算制約式(4)より、自動車と公共交通機関によるトリップの需要関数は以下の式になる

$$x_{s2mi} = \left( \frac{\alpha_{2m}}{p_{s2mi}} \right)^{\sigma_2} \frac{I_{2i}}{\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{s2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{s2Mi}^{1-\sigma_2}} \quad (5)$$

これを式(3)に代入することにより、交通サービス水準最大化問題の解が得られる。

$$x_{s2i} = (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{s2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{s2Mi}^{1-\sigma_2})^{1/(\sigma_2-1)} \cdot I_{2i} \quad (6)$$

2段階目で交通機関別トリップ数 $x_{s2mi}$ と交通サービス水準 $x_{s2i}$ が得られたとき、1段階の所得制約条件下での効用水準最大化問題は以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \max_{\{x_{s1i}, x_{s2i}\}} \quad & u_{si} = \left\{ \alpha_1 x_{s1i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} + \alpha_2 x_{s2i}^{(\sigma_1-1)/\sigma_1} \right\}^{\sigma_1/(\sigma_1-1)} \quad (7) \\ \text{s.t.} \quad & p_{1i} x_{s1i} + p_{2i} x_{s2i} \leq I_i \end{aligned}$$

ここでは、交通サービス水準とその他の一般財の需要 $x_{s2i}, x_{s1i}$ が変数であり、 $p_{s2i}, p_{s1i}$ はそれぞれ交通サービス水準とその他の一般消費財の1単位当たりの価格である。 $I_i$ はゾーン $i$ に居住する1人1日当たりの所得(円/人・日)であり、シナリオの変化にかかわらず一定である。2段階目と同様にして解くと、効用水準を最大にするような交通サービスと一般消費財の需要関数は以下ようになる。

$$x_{ski}^* = \left( \frac{\alpha_k}{p_{ski}} \right)^{\sigma_1} \frac{I_i}{\alpha_1^{\sigma_1} p_{s1i}^{1-\sigma_1} + \alpha_2^{\sigma_1} p_{s2i}^{1-\sigma_1}} \quad (8)$$

式(5)、(6)、(7)、(8)より、シナリオ $s$ の $i$ ゾーン発の交通手段 $m$ のトリップ数の最適解は以下ようになる。

$$\begin{aligned} x_{s2mi}^* = & \left( \frac{\alpha_{2m}}{p_{s2mi}} \right)^{\sigma_2} \alpha_2^{\sigma_1} (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{s2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{s2Mi}^{1-\sigma_2})^{\frac{\sigma_2-\sigma_1}{1-\sigma_2}} \\ & \left\{ \alpha_1^{\sigma_1} p_{s1i}^{1-\sigma_1} + \alpha_2^{\sigma_1} (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{s2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{s2Mi}^{1-\sigma_2})^{\frac{1-\sigma_1}{1-\sigma_2}} \right\}^{-1} I_{si} \\ & (m=C, M) \quad (9) \end{aligned}$$

これらの解を式(3.1)に代入することで、シナリオ $s$ におけるゾーン $i$ 別の効用水準 $u_{si}^* = u_{si}(x_{s1i}^*, x_{s2Ci}^*, x_{s2Mi}^*)$ が算出される。ただし、一般消費財 $p_{1i}$ はニューメレル財として $p_{1i} = 1$ とする。

### (iv) 都市エネルギー消費量の算出

一般財、自動車トリップと公共交通機関トリップの消費による都市全体の総エネルギー消費量 $E_s$ を原単位によって以下のように定義する。

$$E_s = \sum_i E_{si} \cdot Pt_{si} = \sum_i (e_1 x_{s1i} + e_{s2C} t_{s2Ci} x_{s2Ci} + e_{s2M} t_{s2Mi} x_{s2Mi}) \cdot Pt_{si} \quad (10)$$

ここで、 $E_{si}$ はシナリオ $s$ の $i$ ゾーンの都市エネルギー消費量(kcal/人・日)、 $Pt_{si}$ は $i$ ゾーンの居住人口(人)、 $x_{s1i}$ は一般財の需要量(円/人・日)、 $x_{s2Ci}, x_{s2Mi}$ はそれぞれ自動車と公共交通機関によるトリップ数(trip/人・日)、 $e_1, e_{s2C}, e_{s2M}$ はそれぞれ一般財、自動車・公共交通機関のエネルギー消費原単位(kcal/円, kcal/trip・分)、 $t_{s2Ci}, t_{s2Mi}$ はそれぞれ自動車と公共交通機関による $i$ ゾーンからの平均所要時間(分)である。所要時間を用いたのは、自動車や公共交通機関によるトリップ数の過度な増加によって引き起こされる渋滞の影響を考慮するためである。この式に(3.9)の解を代入することで、シナリオ $s$ における都市エネルギー消費量 $E_s$ が算出される。

### (2) 都市エネルギー消費量の最小化問題

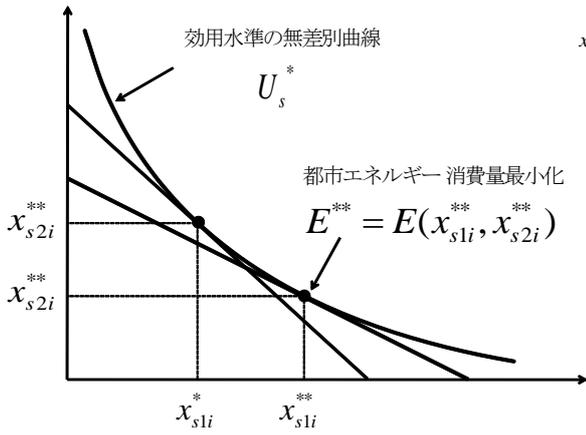


図5 エネルギー消費量最小化問題

(i) コンパクト性評価モデルについて

図-5は、一般財と交通サービス水準の2財の場合のエネルギー消費量最小化問題を図示したものである。都市エネルギー消費量最小時の需要量は、シナリオ*s*における効用水準の無差別曲線上で都市エネルギー消費量が最小となる点 $(x_{s1i}^{**}, x_{s2i}^{**})$ で表されている。

この時、シナリオ*S*の効用水準を制約条件として都市全体の総エネルギー消費量を最小化するコンパクト性評価モデルは以下ようになる。

$$\min_{\{x_{s1i}, x_{s2i}, x_{s2Mi}\}} E_{si} = \sum_i E_{si} \cdot P_{tsi} \quad (11)$$

$$= \sum_i (e_1 x_{s1i} + e_{s2C} t_{s2Ci} x_{s2Ci} + e_{s2M} t_{s2Mi} x_{s2Mi}) \cdot P_{tsi} \quad (12)$$

$$s.t. \quad u_{si}(x_{s1i}, x_{s2Ci}, x_{s2Mi}) = u_{si}^* \quad (12)$$

これを解くことにより、シナリオ*s*における消費エネルギー最小時の一般財の需要量、交通機関別のトリップ数の需要関数が導出される。

(ii) 都市エネルギー消費量を最小にする機関別交通量の算出

式(11), (12)のエネルギー消費量最小化問題のラグランジュ関数は

$$L = \sum_i E_{si} \cdot P_{tsi} + \sum_i \lambda_{si} \left\{ u_{si}^* - u_{si}(x_{s1i}, x_{s2Ci}, x_{s2Mi}) \right\} \quad (13)$$

となるが、式(3.11), (3.12)はゾーン*i*について独立であるので、最適性の条件は*i*ごとに以下ようになる。

$$\frac{\partial L}{\partial x_{s1i}} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial x_{s2Ci}} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial x_{s2Mi}} = 0 \quad (14)$$

これよりゾーン*i*ごとに独立して一般財の需要量 $x_{s1i}^{**}$ 、交通機関別のトリップ数 $x_{s2Ci}^{**}, x_{s2Mi}^{**}$ の需要関数が導出される。

$$x_{s1i}^{**} = \left[ \alpha_1 + \alpha_2 \left( \frac{e_{s2C} t_{s2Ci}}{e_1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_1-1)} \right]^{1-\sigma_1} \left\{ \alpha_{2C} + \alpha_{2M} \left( \frac{e_{s2C} t_{s2Ci}}{e_{s2M} t_{s2Mi}} \frac{\alpha_{2M}}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{\sigma_1-1}{\sigma_1} \frac{\sigma_1}{\sigma_1-1}} u_{si}^* \quad (15)$$

$$x_{s2Ci}^{**} = \left[ \alpha_1 \left( \frac{e_{s2C} t_{s2Ci}}{e_1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_1-1)} \left\{ \alpha_{2C} + \alpha_{2M} \left( \frac{e_{s2C} t_{s2Ci}}{e_{s2M} t_{s2Mi}} \frac{\alpha_{2M}}{\alpha_{2C}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{\sigma_1-1}{\sigma_1} \frac{\sigma_1}{\sigma_1-1}} \right]^{1-\sigma_1} u_{si}^* \quad (16)$$

$$x_{s2Mi}^{**} = \left[ \alpha_1 \left( \frac{e_{s2M} t_{s2Mi}}{e_1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_{2M}} \right)^{(\sigma_1-1)} \left\{ \alpha_{2M} + \alpha_{2C} \left( \frac{e_{s2M} t_{s2Mi}}{e_{s2C} t_{s2Ci}} \frac{\alpha_{2C}}{\alpha_{2M}} \right)^{(\sigma_2-1)} \right\}^{\frac{\sigma_1-1}{\sigma_1} \frac{\sigma_1}{\sigma_1-1}} \right]^{1-\sigma_1} u_{si}^* \quad (17)$$

これらの解を式(11)に代入することで、シナリオ*S*において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 $E_s^{**} = E(x_{s1i}^{**}, x_{s2Ci}^{**}, x_{s2Mi}^{**})$ が得られる。

4. 実証分析

(1) シナリオ毎の人口集約結果

シナリオ A, シナリオ B の方法(1)(以下シナリオ B(1)), シナリオ B の方法(2)(以下シナリオ B(2)), シナリオ C によって集約化された人口によるゾーン別の人口密度をそれぞれ図-6, 図-7, 図-8, 図-9に示す。

(2) 使用データ

以下に、本章で使用した初期データ及びデータの作成方法を説明する。

(i) 交通機関別初期トリップ数 $x_{2Ci}, x_{2Mi}$

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、PT 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て求めた。PT データの詳細を表-1に示す<sup>9)</sup>。

(ii) 交通機関別トリップ数 $x_{s2Ci}, x_{s2Mi}$

シナリオ*s*の総交通機関別トリップ数 $x_{s2Ci}, x_{s2Mi}$  (トリップ/人・日)は、(イ)で求めた一人一日当たりの交通機関別トリップ $x_{2Ci}, x_{2Mi}$ にシナリオ*s*におけるゾーン*i*の居住人口 $P_{si}$ をかけて求めた。シナリオ A の居住人口 $P_{Ai}$ は、PT 調査の人口に 2030 年で予測された人

表-1 PT 調査の概要

対象地域	17市町村 (177ゾーン)
対象地域の人口 (人)	970,380
自動車保有率 (台/1000人)	569
総トリップ数 (万トリップ)	227

表-2 効用関数パラメータ

$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_{2C}$	$\alpha_{2M}$
0.788	1.123	0.998	0.002	0.726	0.274

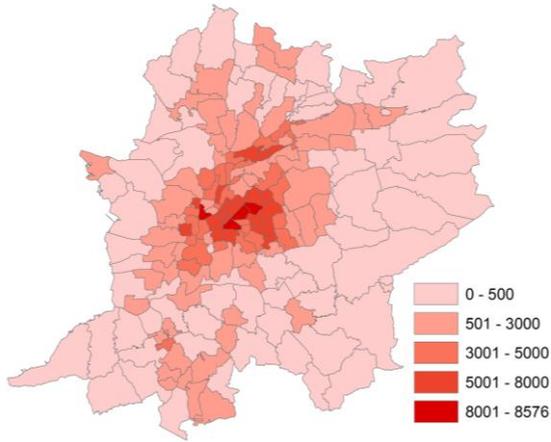


図-6 シナリオ A の人口密度

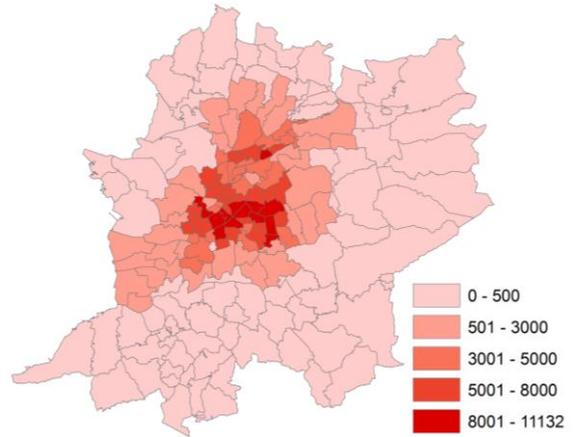


図-7 シナリオ B(1) の人口密度

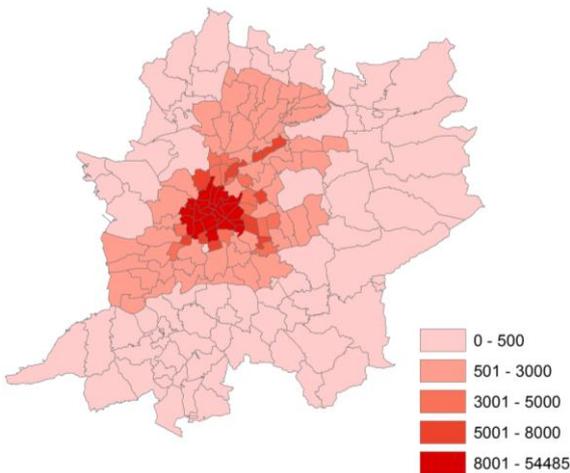


図-8 シナリオ B(2) の人口密度

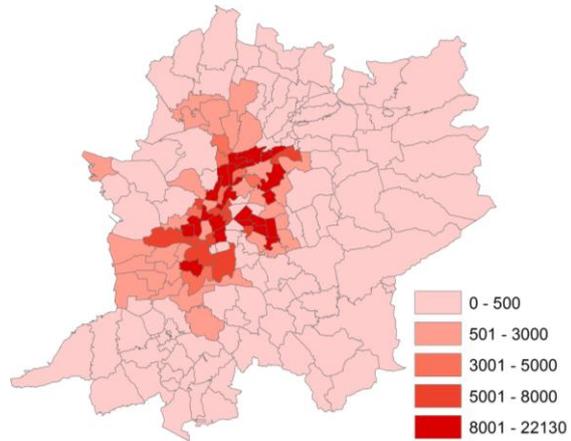


図-9 シナリオ C の人口密度

口変化率を乗じて求め<sup>9)</sup>、シナリオ B、C の居住人口  $P_{B_i}$ 、 $P_{C_i}$  は、それぞれの設定する方法でシナリオ A の総人口である  $P_A$  を配分して求めた。

(iii) パラメータ  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_{2C}$ 、 $\alpha_{2M}$

効用関数で使用するパラメータは表-2 のものを用いた<sup>9)</sup>。

(iv) 平均所要時間  $t_{s2Ci}$ 、 $t_{s2Mi}$

シナリオ  $s$  のゾーン  $i$  からの交通機関別平均所要時間  $t_{s2Ci}$ 、 $t_{s2Mi}$  (分) は、それぞれ JICA STRADA の利用者均衡配分、トランジット配分 (確率的配分法) を用いて算出した OD 間所要時間  $t_{s2Cij}$ 、 $t_{s2Mij}$  を交通機関別 OD 交通量 (トリップ) で加重平均し、発ゾーン別に求めた。

(v) 交通機関別一般化費用  $G_{s2Ci}$ 、 $G_{s2Mi}$  と費用  $P_{s2Ci}$ 、 $P_{s2Mi}$

自動車の費用  $p_{s2Cij}$  は、JICA STRADA を用いて算出した OD 間の走行速度 (km/h) によって OD 別の走行経費原単位 (円/km・台) を求める<sup>9)</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  $p_{s2Cij}$  (円/トリップ)

$$= \text{走行経費原単位 (円/km・台)} \times \text{OD 間距離 (km)} \\ \div \text{平均乗車人員 (トリップ/台)}$$

自動車の一般化費用  $G_{s2Cij}$  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たして求めた。

OD 別自動車一般化費用  $G_{s2Cij}$  (円/トリップ)

$$= \text{OD 別自動車費用 } p_{s2Cij} \text{ (円/トリップ)} + \text{時間価値} \\ \text{(円/トリップ・分)} \times \text{自動車の OD 間所要時間 (分)}$$

公共交通機関の費用  $p_{s2Mij}$  と一般化費用  $G_{s2Mij}$  は、それぞれ JICA STRADA のトランジット配分 (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/トリップ・分) をかけて求めた。ここで算出した交通機関別一般化費用  $G_{s2Cij}$ 、 $G_{s2Mij}$  と費用  $p_{s2Cij}$ 、 $p_{s2Mij}$  を交通機関別 OD 交通量 (トリップ) で加重平均し、発ゾーン別に機関別一般化費用  $G_{s2Ci}$ 、 $G_{s2Mi}$  と費用  $p_{s2Ci}$ 、 $p_{s2Mi}$  を求めた。ここで、時間価値 (円/分・人) については、自動車は

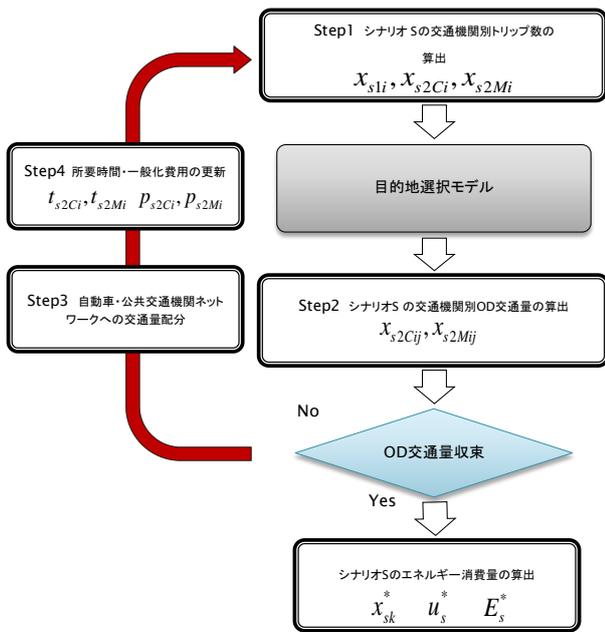


図-10 都市エネルギー消費量算出のフロー

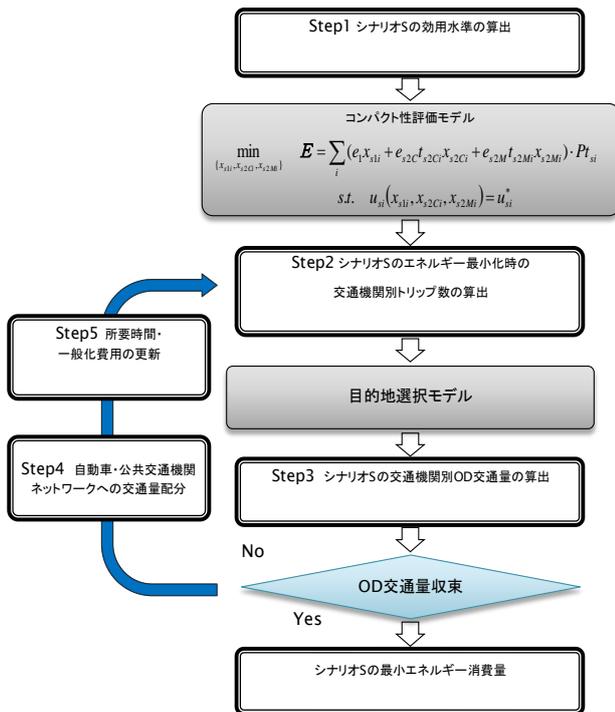


図-11 最小都市エネルギー消費量算出のフロー

$\omega_C^{1997} = 38.11$  を、公共交通機関は  $\omega_M^{1997} = 40.00$  を使用した<sup>5)</sup>。

(vi) 所得  $I_i$

発ゾーン別の所得  $I_i$  (円/人・日) は、市町別に集計された所得をゾーン別に分配するため、ゾーン別の路線価に比例して配分されたものを使う<sup>5)</sup>。

(vii) エネルギー消費原単位  $e_1, e_{s2C}, e_{s2M}$

一般財の消費支出は 1 世帯当たりの総消費支出から交

表-3 エネルギー消費原単位

財	原単位
一般消費財 $e_1$ (kcal/人・円)	3.639
自動車トリップ $e_{s2C}$ (kcal/人・分)	137.653
公共交通機関トリップ $e_{s2M}$ (kcal/人・分)	14.498

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) で除して求められたものを使う<sup>5)</sup>。自動車・公共交通機関のエネルギー消費原単位  $e_{s2C}, e_{s2M}$  (kcal/トリップ・分) は、シナリオ S の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/トリップ・km) をかけて求められたものを使う<sup>5)</sup>。使用するエネルギー消費原単位を表-3 に示す。

(3) 将来の都市エネルギー消費量算出のフロー

シナリオ  $s$  の都市エネルギー消費量を算出するフローを図-10 に示す。

**Step-1:** (2) (ii) で述べた方法により、交通機関別トリップ数を算出する。

**Step-2:** 目的地選択モデルによって、交通機関別 OD 交通量を求める。

**Step-3:** 交通機関別 OD 交通量を自動車は利用者均衡配分、公共交通機関は確率配分でそれぞれのネットワークに配分する。

**Step-4:** 配分結果より、所要時間  $t_{s2Ci}, t_{s2Mi}$  と一般化費用  $P_{s2Ci}, P_{s2Mi}$  を更新し、3 章で説明した効用関数より再度交通機関別トリップ数を算出する。

これらのステップを交通機関別 OD が収束するまで繰り返す。

(4) 将来の最小都市エネルギー消費量算出のフロー

シナリオ  $s$  の最小都市エネルギー消費量を算出するフローを図-11 に示す。

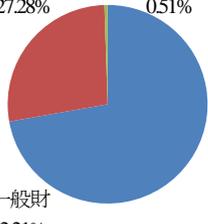
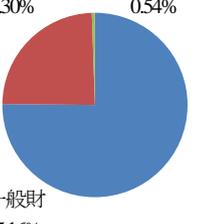
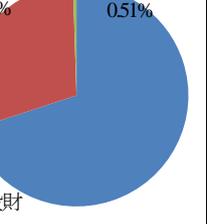
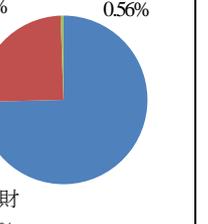
**Step-1:** 効用関数及び(3)で算出された交通機関別トリップ数より、効用水準を算出する。

**Step-2:** 式(15)(16)(17)より、エネルギー消費量を最小化するの交通機関別トリップ数  $x_{s2Ci}, x_{s2Mi}$  と一般財の需要  $x_{s1i}$  を算出する。

**Step-3:** 目的地選択モデルによって、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

表-5 シナリオ毎の都市エネルギー消費量の比較

	シナリオ A		シナリオ B(1)		シナリオ B(2)		シナリオ C	
エネルギー比率	自動車 27.28%	公共交通機関 0.51%	自動車 24.30%	公共交通機関 0.54%	自動車 29.57%	公共交通機関 0.51%	自動車 24.19%	公共交通機関 0.56%
								
総エネルギー消費量(kcal/日)	3.26×10 <sup>10</sup>		3.21×10 <sup>10</sup>	0.982	3.58×10 <sup>10</sup>	1.096	3.15×10 <sup>10</sup>	0.965
総費用(円/日)	6.80×10 <sup>9</sup>		6.92×10 <sup>9</sup>	1.017	7.19×10 <sup>9</sup>	1.056	6.80×10 <sup>9</sup>	0.999
総交通費用(円/日)	3.29×10 <sup>8</sup>		3.02×10 <sup>8</sup>	0.917	3.13×10 <sup>8</sup>	0.948	2.85×10 <sup>8</sup>	0.863
一般財消費エネルギー(kcal/日)	2.36×10 <sup>10</sup>		2.41×10 <sup>10</sup>	1.022	2.50×10 <sup>10</sup>	1.061	2.37×10 <sup>10</sup>	1.006
自動車トリップによる消費エネルギー(kcal/日)	8.90×10 <sup>9</sup>		7.79×10 <sup>9</sup>	0.875	1.06×10 <sup>10</sup>	1.188	7.62×10 <sup>9</sup>	0.856
MTトリップによる消費エネルギー(kcal/日)	1.67×10 <sup>8</sup>		1.73×10 <sup>8</sup>	1.036	1.81×10 <sup>8</sup>	1.085	1.76×10 <sup>8</sup>	1.057
一般財の総消費量(円/日)	6.48×10 <sup>9</sup>		6.62×10 <sup>9</sup>	1.022	6.26×10 <sup>9</sup>	0.967	6.51×10 <sup>9</sup>	1.006
自動車の総交通量(トリップ/日)	1.76×10 <sup>6</sup>		1.71×10 <sup>6</sup>	0.972	1.73×10 <sup>6</sup>	0.984	1.64×10 <sup>6</sup>	0.933
MTの総交通量(トリップ/日)	8.83×10 <sup>4</sup>		9.99×10 <sup>4</sup>	1.132	1.09×10 <sup>5</sup>	1.234	1.02×10 <sup>5</sup>	1.161
自動車の総所要時間(分)	8.09×10 <sup>7</sup>		7.94×10 <sup>7</sup>	0.982	9.53×10 <sup>7</sup>	1.179	7.84×10 <sup>7</sup>	0.969
MTの総所要時間(分)	9.45×10 <sup>7</sup>		8.45×10 <sup>7</sup>	0.894	8.27×10 <sup>7</sup>	0.874	8.15×10 <sup>7</sup>	0.861

分、公共交通機関は確率配分でそれぞれのネットワークに配分する。

Step-5: 配分結果より所要時間 $t_{s2Ci}, t_{s2Mi}$ と一般化費用 $P_{s2Ci}, P_{s2Mi}$ を更新し、再度エネルギー最小化モデルを解く。

これらのステップを交通機関別 OD が収束するまで繰り返す。

(5) 目的地選択モデル

(3)(4) で述べた繰り返し計算を行う際、交通機関別目的地選択モデルにより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。ここでは、 $j$ ゾーンの都心ダミー $D_j$ と従業員人口 $Z_{sj}$ 、ゾーン間の一般化費用 $G_{s2Cij}, G_{s2Mij}$ を説明変数とした集計ロジットモデルを用いる。目的地選択モデルで使用するパラメータは表-4のものを用いる<sup>5)</sup>。

表-4 目的地選択モデルパラメータ

	自動車	公共交通機関
都心ダミー $a$	-0.443	0.016
従業員人口 $b$	2.96×10 <sup>5</sup>	1.73×10 <sup>5</sup>
一般化費用 $c$	-0.002	287.81

(6) シナリオ間の都市エネルギー消費量の比較

シナリオ毎の都市エネルギー消費量を比較したものを表-5に示す。

ここでは、総エネルギー消費量の大きさをシナリオ A 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エネルギーの消費比率も同時に示している。

以下に比較を行った結果の考察を箇条書きで述べる。

1) シナリオ A に比べ、総エネルギー消費量はシナリオ B(1)が 0.982 倍、シナリオ B(2)が 1.096 倍、シナリオ C が

表-6 シナリオ毎の比較

	シナリオ A			シナリオ B(1)		
	将来予測	最小時 (予測に対する比率)		将来予測	最小時	
エネルギー比率	自動車 27.21% 公共交通機関 0.51% 一般財 72.21%	自動車 4.38% 公共交通機関 1.51% 一般財 94.07%		自動車 24.30% 公共交通機関 0.54% 一般財 75.16%	自動車 4.22% 公共交通機関 1.49% 一般財 95.65%	
総エネルギー消費量(kcal/日)	$3.26 \times 10^{10}$	$2.57 \times 10^{10}$	0.788	$3.21 \times 10^{10}$	$2.61 \times 10^{10}$	0.815
総費用(円/日)	$6.80 \times 10^9$	$6.84 \times 10^9$	1.005	$6.92 \times 10^9$	$6.97 \times 10^9$	1.006
総交通費用(円/日)	$3.29 \times 10^8$	$1.95 \times 10^8$	0.591	$3.02 \times 10^8$	$1.92 \times 10^8$	0.635
一般財消費エネルギー(kcal/日)	$2.36 \times 10^{10}$	$2.42 \times 10^{10}$	1.027	$2.41 \times 10^{10}$	$2.47 \times 10^{10}$	1.023
自動車トリップによる消費エネルギー(kcal/日)	$8.90 \times 10^9$	$1.13 \times 10^9$	0.127	$7.79 \times 10^9$	$1.09 \times 10^9$	0.139
MTトリップによる消費エネルギー(kcal/日)	$1.67 \times 10^8$	$3.88 \times 10^8$	2.329	$1.73 \times 10^8$	$3.83 \times 10^8$	2.220
一般財の総消費量(円/日)	$6.48 \times 10^9$	$6.26 \times 10^9$	1.027	$6.62 \times 10^9$	$6.26 \times 10^9$	1.023
自動車の総交通量(トリップ/日)	$1.76 \times 10^6$	$8.62 \times 10^5$	0.491	$1.71 \times 10^6$	$9.10 \times 10^5$	0.533
MTの総交通量(トリップ/日)	$8.83 \times 10^4$	$1.99 \times 10^5$	2.258	$9.99 \times 10^4$	$2.14 \times 10^5$	2.144
自動車の総所用時間(分)	$8.09 \times 10^7$	$2.12 \times 10^7$	0.262	$7.94 \times 10^7$	$2.11 \times 10^7$	0.265
MTの総所用時間(分)	$9.45 \times 10^7$	$9.80 \times 10^7$	1.035	$8.45 \times 10^7$	$8.77 \times 10^7$	1.038

0.965 倍となっている。シナリオ C が最もエネルギー消費量の削減につながることで、シナリオ B(2)は削減には繋がらず、むしろ増大させることがわかる。

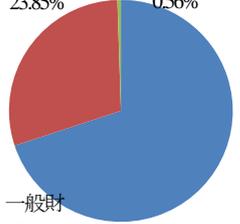
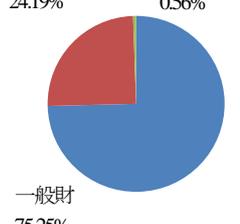
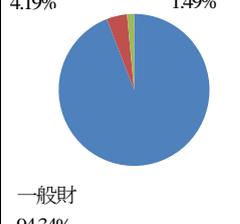
2) 総交通費用はいずれのシナリオでも減少しているなかで、総費用はシナリオ C のみ 0.999 倍と若干減少し、他のシナリオは増加している。これは、全シナリオで一般化費用は増大しているなかで、シナリオ C は総交通費用の減少分がその増加分を上回ったためである。

3) いずれのシナリオでも自動車トリップは減少し、公共交通機関トリップは増加している。これは、郊外に比べて公共交通機関を利用しやすい環境の中心部に人口を集約させたことにより、交通手段の転換が行われたためだと考えられる。特にシナリオ C がその趣旨のために乗り換えの量が多いと予想していたが、自動車トリップの減少率はシナリオ C が最大となっているものの、公共交通機関トリップの増加率はシナリオ B(2)が最大とな

った。

4) 総所要時間は、自動車についてはシナリオ B(1), C がそれぞれ 0.982 倍、0.969 倍と減少しているのに対し、シナリオ B(2)のみ 1.179 倍と増加している。これは、シナリオ B(2)の中心部において人口を大きく集約させたことにより、過剰な渋滞が発生しているためと考えられる。公共交通機関についてはどのシナリオも総所要時間は減少している。

5) 3), 4)の理由から、自動車トリップによる消費エネルギーは総所要時間が大きく増加したシナリオ B(2)のみ増加し、他のシナリオでは減少している。公共交通機関トリップによる消費エネルギーについてはトリップ数の増加が総所要時間の減少よりも大きいためいずれのシナリオでも増加する。また、一般財消費エネルギーはいずれのシナリオでも増加となった。

	シナリオ B(2)			シナリオ C		
	将来予測	最小時		将来予測	最小時	
エネルギー比率	自動車 23.85% 公共交通機関 0.56% 一般財 75.59% 	自動車 3.00% 公共交通機関 1.55% 一般財 94.37% 		自動車 24.19% 公共交通機関 0.56% 一般財 75.25% 	自動車 4.19% 公共交通機関 1.49% 一般財 94.34% 	
総エネルギー消費量(kcal/日)	$3.58 \times 10^{10}$	$2.69 \times 10^{10}$	0.752	$3.15 \times 10^{10}$	$2.57 \times 10^{10}$	0.817
総費用(円/日)	$7.19 \times 10^9$	$7.24 \times 10^9$	1.008	$6.80 \times 10^9$	$6.85 \times 10^9$	1.008
総交通費用(円/日)	$3.13 \times 10^8$	$1.95 \times 10^8$	0.624	$2.85 \times 10^8$	$1.84 \times 10^8$	0.647
一般財消費エネルギー(kcal/日)	$2.50 \times 10^{10}$	$2.57 \times 10^{10}$	1.026	$2.37 \times 10^{10}$	$2.43 \times 10^{10}$	1.024
自動車トリップによる消費エネルギー(kcal/日)	$1.06 \times 10^{10}$	$0.82 \times 10^9$	0.077	$7.62 \times 10^9$	$1.08 \times 10^9$	0.141
MTトリップによる消費エネルギー(kcal/日)	$1.81 \times 10^8$	$8.62 \times 10^5$	2.326	$1.76 \times 10^8$	$8.62 \times 10^5$	2.129
一般財の総消費量(円/日)	$6.26 \times 10^9$	$6.26 \times 10^9$	1.126	$6.51 \times 10^9$	$6.26 \times 10^9$	1.024
自動車の総交通量(トリップ/日)	$1.73 \times 10^6$	$8.77 \times 10^5$	0.507	$1.64 \times 10^6$	$8.70 \times 10^5$	0.531
MTの総交通量(トリップ/日)	$1.09 \times 10^5$	$2.41 \times 10^8$	2.210	$1.02 \times 10^5$	$2.15 \times 10^8$	2.097
自動車の総所用時間(分)	$9.53 \times 10^7$	$1.98 \times 10^7$	0.208	$7.84 \times 10^7$	$2.07 \times 10^7$	0.277
MTの総所用時間(分)	$8.27 \times 10^7$	$8.55 \times 10^7$	1.029	$8.15 \times 10^7$	$8.45 \times 10^7$	1.039

### (7) シナリオ毎のエネルギー-最小時の比較

シナリオ毎に都市エネルギー消費量と最小都市エネルギー消費量を比較した結果を表-6に示す。以下に比較を行った結果について箇条書きで考察を行う。

- 1) 将来予測に対する最小時の総エネルギー消費量の比は、それぞれ 0.788 倍, 0.815 倍, 0.812 倍, 0.817 倍となっており、シナリオ C が最小解との差が最も小さい。この結果によりシナリオ C がコンパクトな都市構造に最も近いことがわかる。
- 2) いずれのシナリオでも、一般財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消費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。
- 3) そのためには、一般財の総消費量と公共交通機関のトリップ数を増大させて、自動車のトリップ数を減少させる必要がある。またこれにより、自動車の総所要時間

は減少し、公共交通機関の総所要時間は増大する。

### 5. おわりに

本論文では、熊本都市圏における将来の生活圏をベースに、人口集積のタイプが異なる 3 つの都市圏構造シナリオを想定し、コンパクト性評価モデルを用いたシナリオ分析を行って、エネルギー消費量の視点からコンパクト性の評価を行った。これにより、将来どのような都市形態及び交通サービスにすることで都市全体のエネルギー消費量を削減することが可能か分析をした。以下に結論と今後の課題を列挙する。

- (1) 人口を公共交通サービスの利便性の高い主要な交通拠点とその周辺に集約することにより、大幅なエネルギー消費量の削減をすることが可能である。さらに、総費用も削減することができる。
- (2) 人口を都市中心部一極に集める構造でもエネルギー

消費量を削減することが可能である。しかし、その効果は(1)の場合よりも低い上に、総費用が増加する。

(3) また、都市中心部への過度な人口集約は交通渋滞を発生させ、逆にエネルギー消費量の増大を引き起こす。

(4) (1),(2),(3)のいずれの場合でも、自動車トリップを公共交通機関トリップに転換させたり、交通サービスの消費を一般財の消費に転換することで、効用水準を現状の水準に維持したままエネルギー消費量を減少させることが可能である。

(5) 上記の(1)の場合が将来予測時に対するエネルギー最小時の総エネルギー消費量の差が最も小さくなっており、コンパクトな都市構造に最も近いことがわかった。

(6) 以上より、どのような都市形態及び交通サービスすることで都市全体のエネルギー消費量を削減することが可能かを明らかにすることができた。しかし、より具体的な都市構造及び交通サービスを検討するためには、エネルギー消費量に対して影響を及ぼす要因やその程度などをより詳細に分析する必要がある。

#### 参考文献

1. 谷口守：コンパクトシティとモビリティ・マネジメント，国際交通安全学会誌，No4-3，pp44-51，2006
2. 水本齊，森本章倫：都市の集約の違いが CO<sub>2</sub> 排出量に与える影響に関する研究，土木計画学・論文集，Vol.44，No.323，pp1-6，2011
3. 魚路学，村橋正武：地方都市活性化のための都市構造のあり方に関する研究，日本都市計画学会・都市計画論文集，No.39，pp3-8，2004
4. 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，pp887-894，2006
5. 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，pp127-132，2008
6. 国立社会保障・人口問題研究所，結果表 I 将来の市区町村別人口および指数
7. 熊本市都市マスタープランー都市空間の将来像(案)，[http://www.city.kumamoto.kumamoto.jp/Content/Web/Upload/file/Bun\\_26793\\_226tosikuukanmosyouraizou.pdf](http://www.city.kumamoto.kumamoto.jp/Content/Web/Upload/file/Bun_26793_226tosikuukanmosyouraizou.pdf)
8. 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
9. 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

## EFFECT OF COMPACT CITY ON ENERGY CONSUMPTION : AN ANALYSIS BASED ON URBAN STRUCTURE

Kouhei AIKAWA, Yin Yanhong, Shoshi MIZOKAMI and Takuya MARUYAMA

This paper examines the effect of compact city on energy consumption by checking three kinds of urban structures. The individual energy consumption can be estimated based on his consumption behaviors explained by the demand of composite goods and mobility goods. We also developed the index of energy consumption efficiency, ratio of utility to energy consumption. This model is applied to compare the effect of compact city on energy consumption efficiency in different urban structure of Kumamoto metropolitan region. The highest energy consumption efficiency is shown in the result of scenario that 90% population and all concentrated in the Kumamoto city. Results show that increasing the population density of the core city is much more effective than improving the population density of the whole region to improve energy consumption efficiency.