

生活質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*

An Approach of Compact City from viewpoints of Quality of Life and Energy Consumption*

溝上章志**, 柿本竜治***, 圓山琢也****

By Shoshi MIZOKAMI**, Ryuji KAKIMOTO***, Takuya MARUYAMA****

1. はじめに

都市のコンパクト性を交通の面から定量的に評価する指標としては、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が用いられ、これらの都市間比較や都市構造との関係性を分析した研究は、著名な文献 1)をはじめ、その数は多い。また、土地利用-交通モデルを構築し、典型的な都市構造シナリオに基づいて政策シミュレーションを行う研究は、その結果から環境負荷低減に寄与する効果的な施策を見いだすことが可能である点で有用である。

都市の諸活動はエネルギーの消費を伴う交通サービスや財の消費によって支えられてきたことから、単にエネルギー消費量を削減するのではなく、現在の生活質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重要な研究課題である。

このような中で、現在の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規範的な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を検討している青山・中川らの一連の研究^{2), 3)}の研究は興味深い。本研究では彼らの研究を一般化、かつ発展させる。つまり、モビリティ水準を規定する交通サービスだけではなく、一般財の消費も含めた個人の効用を定義し、現在の彼らの生活の質を維持するという条件下でエネルギー消費量を最小化した解と実績値とを時点間や地域間で比較する。これによって、どのような都市構造や交通施策が、生活質を低下させることなく、都市全体のコンパクト化に貢献するかを考察するというものである。

一方で、都市のコンパクト化は、逆に交通渋滞や市街地密集による生活環境の悪化を招くという反論も主張されている。コンパクトシティという施策を実行可能なものにするには、エネルギー消費量の削減と相反する目的、たとえば総交通費用の削減を同時に解決する必要がある。そのために、コンパクト性評価指標として、エネルギー消費量とトレードオフの関係にあると思われる総交通費

用なども導入し、コンパクト性指標ベクトルを目的関数とした多目的最適化問題に拡張した。

2. コンパクト性評価モデルの定式化

(1) コンパクト性評価モデルの概要

コンパクト性評価モデルの定式化を行うに当たって、以下のような仮定を導入する。

- 1)ゾーン i に居住する代表的個人は、交通サービス（以後、モビリティと記す）とそれ以外の財（一般財と記す）を消費し、その需要量は x_{2i} , x_{1i} である。
- 2)モビリティの水準は自動車(C)と公共交通機関(M)によるトリップ数 x_{2Ci} , x_{2Mi} に依存する。
- 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。

このとき、現在の効用水準 $u_i^*(x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*)$ を維持しながら、コンパクト性の評価指標ベクトル \mathbf{E}_i を最適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。

$$\min_{x_{1i}, x_{2Ci}, x_{2Mi}} \mathbf{E}_i(x_{1i}, x_{2Ci}, x_{2Mi}) = \{E_{1i}, E_{2i}, \dots, E_{Ni}\} \quad (1)$$

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

E_{mi} はエネルギー消費量や総交通時間などのコンパクト性評価指標であり、 x_{1i}, x_{2Ci}, x_{2Mi} の関数である。

(2) 効用関数の定義

式(2)の現在の効用水準 $u_i^*(x_{1i}^*, x_{2Ci}^*, x_{2Mi}^*)$ を求めるために、効用関数を定義する。ゾーン i に住む代表的な個人の効用は、のような2層のNested構造で表され、段階ごとに2財間の代替弾力性を別個に設定できるという柔軟性を持つ層化CES型の効用関数⁴⁾を導入する。この上位、下位段階の関係はそれぞれ次式のようになる。

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

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

σ_1, σ_2 は、それぞれ上位段階と下位段階の代替の弾力性であり、各段階における2財間の代替性の程度を表す。また、 α_1 と α_2 , および α_{2C} と α_{2M} は、一般財とモビリティ、および自動車によるトリップ数と公共交通機関に

*キーワード：コンパクトシティ，エネルギー消費，QoL

**正員，工博，熊本大学大学院自然科学研究科（熊本県熊本市黒髪2-39-1，TEL:096-342-3541，E-mail: smizo@gpo.kumamoto-u.ac.jp）

***正員，博（学），熊本大学政策創造研究教育センター

****正員，博（工），熊本大学政策創造研究教育センター

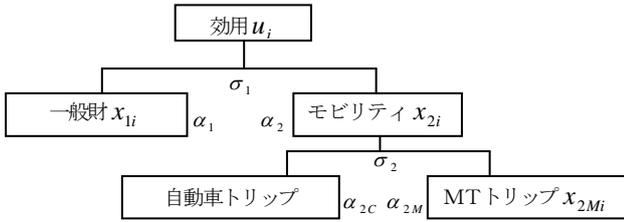


図-1 層化 CES 型効用関数の構造

よるトリップ数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。式(3)と(4)で定義された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} は一般消費財 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一般化費用 (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

上記の効用関数を用いて現在の効用水準を算出する。まず、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で定義される下位段階の問題の必要条件より、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}^* は以下となる。

$$x_{2mi}^* = \left(\frac{\alpha_{2m}}{p_{2mi}} \right) \frac{I_{2i}}{\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2}} \quad (6)$$

$$x_{2i}^* = (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2})^{1/(\sigma_2-1)} \cdot I_{2i} \quad (7)$$

I_{2i} は 1 人 1 日あたりの総交通費用 (円/人・日) である。

一方、所得制約下での効用最大化行動によって定式化される上位段階の問題の必要条件よりでは、一般消費財とモビリティの需要関数は次式で表される。

$$x_{ki}^* = \left(\frac{\alpha_k}{p_{ki}} \right) \frac{I_{2i}}{\alpha_1^{\sigma_1} p_{1i}^{1-\sigma_1} + \alpha_2^{\sigma_1} p_{2i}^{1-\sigma_1}} \quad (8)$$

ただし、 p_{1i} はニュメレルとして $p_{1i} = 1$ とする。

以上より、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。

$$x_{2mi}^* = \left(\frac{\alpha_{2m}}{p_{2mi}} \right)^{\sigma} \alpha_2^{\sigma_1} (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2})^{\frac{\sigma_2-\sigma_1}{1-\sigma_2}} \cdot \left\{ \alpha_1^{\sigma_1} p_{1i}^{1-\sigma_1} + \alpha_2^{\sigma_1} (\alpha_{2C}^{\sigma_2} p_{2Ci}^{1-\sigma_2} + \alpha_{2M}^{\sigma_2} p_{2Mi}^{1-\sigma_2})^{1-\sigma_2} \right\}^{-1} \cdot I_i \quad (9)$$

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。

(4) コンパクト性の評価指標

一般財と自動車と公共交通機関によるトリップの消費によって発生するエネルギー消費量 E_{1i} 、およびトレドオフ関係にあると考えられる総交通時間 E_{2i} をコンパクト性の評価指標とする。これらは下記で定式化される

$$E_{1i} = e_1 x_{1i} + e_2 t_{2Ci} x_{2Ci} + e_3 t_{2Mi} x_{2Mi} \quad (12)$$

$$E_{2i} = p_{2Ci} x_{2Ci} + p_{2Mi} x_{2Mi} \quad (13)$$

ここで、 e_1, e_2, e_3 は一般財、自動車と公共交通機関のエネルギー消費原単位 (kcal/人・分、kcal/人・分) である。また、 t_{2Ci}, t_{2Mi} は自動車と公共交通機関によるゾーン i から目的地ゾーンまでの平均所要時間である。

消費者の効用最大化行動の結果である現在の効用水準を維持するという条件下で、これらの目的関数ベクトルを最適化したときのエネルギー消費量や総交通時間とこれらの実績値とを比較することによって、ゾーン別のコンパクト性の評価が可能となる。また、時点間の解の比較を行うことによって、コンパクト性の経時変化を分析することができる。さらに、いくつかの都市圏に本モデルを適用することによって、コンパクト性の水準と都市構造や交通サービス水準などとの関係を分析することも可能である。

3. 未知パラメータの推定

(1) データの収集、および作成方法

本モデルを適用する熊本都市圏は、母都市である熊本市の人口が 67 万人、都市圏人口は 100 万人である。図-2に示すように、熊本都市圏の DID 地区の面積は年々、拡大しているのに対して、人口密度は低下しており、スプロール化が進行している。交通関連の基礎データとなるパーソントリップ調査が実施された 1984 年と 1997 年の 2 時点において、上記で提案したモデルを適用し、(a) 両時点での総エネルギー消費量や総交通費用の実績値と最適値との比較、および (b) 両時点間でのこれらの経時変化について検討を行う。

まず、効用関数の推定のために使用したデータの収集、作成方法を以下に解説する。

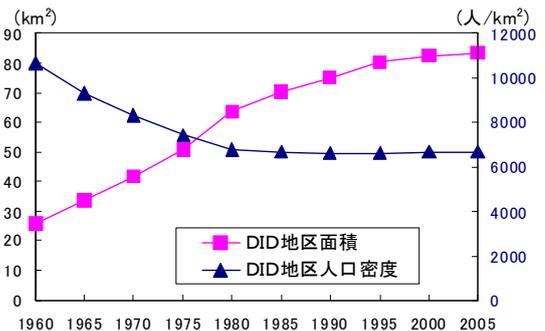


図-2 K都市圏のDIDの面積と人口密度の推移

- 1) 1人1日あたりの自動車と公共交通機関によるトリップ数 x_{2Ci} , x_{2Mi} (トリップ/人・日) は、パーソントリップ調査の1日あたりの利用交通機関別のトリップをゾーン別に集計し、居住人口で除したものである。
- 2) 自動車と公共交通機関によるゾーン i からの平均所要時間 t_{2Ci} , t_{2Mi} は、それぞれ利用者均等配分、確率配分を用いて算出したOD間所要時間を交通機関別のOD交通量で加重平均して求めた。
- 3) 自動車と公共交通機関の1トリップあたりの発ゾーン別一般化費用 p_{2Ci} , p_{2Mi} は、2) で求めたOD間所要時間に、走行速度に対する走行費用原単位を考慮した自動車、公共交通機関の各年の時間価値をかけて求めた。
- 4) 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、K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。
- 5) 一般財の消費量 x_{1i} は、 I_i からゾーン i に居住する1人1日あたりの交通費用を引いて求める。

(2) 効用関数のパラメータの推定

代替の弾力性 σ_1, σ_2 は、自動車と公共交通機関利用需要の自己価格弾力性 $\varepsilon_{2Ci}, \varepsilon_{2Mi}$ が得られさえすれば推定することができる。ここでは、推定した集計ロジック型交通機関分担率モデルの自己弾力性値を用いた。本来なら ε_{2mi} 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 σ_1, σ_2 を推定した。分配パラメータ α_1 と α_2 , α_{2C} と α_{2M} についても、ゾーン平均値をとって一組の α_1 と α_2 , α_{2C} と α_{2M} を求めた。

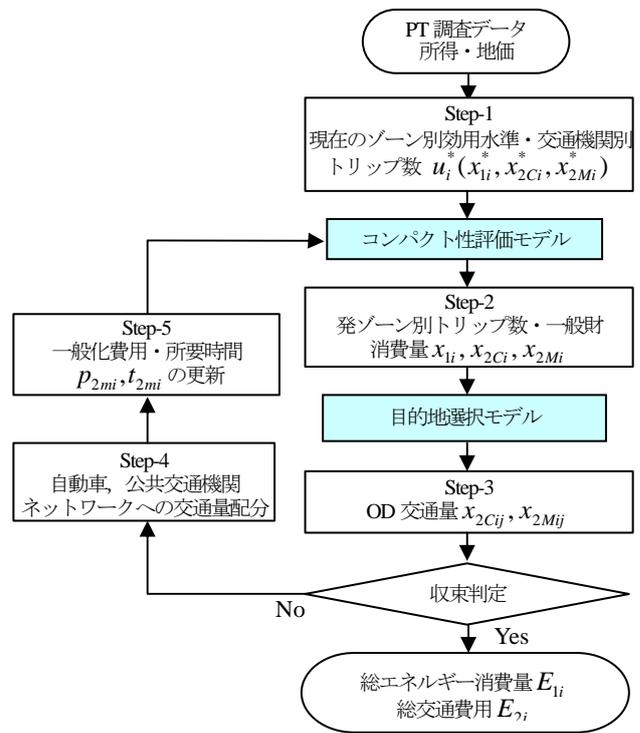


図-3 コンパクト性評価の分析フロー

4. K都市圏における実証分析

(1) コンパクト性評価の結果

多目的最適化問題で定式化されているコンパクト性評価モデルを解くためには、目的関数ベクトルを何らかの方法でスカラー化最適化問題に変換する必要がある。ここでは、各目的関数にそれぞれ重み $\beta_1, \beta_2 = 1 - \beta_1$ を付けて加重和する線形加重最適化を用いた。

コンパクト性評価指標の分析は図-3のフローに従って行う。2回のパーソントリップ調査時において、効用水準を制約条件としてコンパクト性評価ベクトル目的関数を最適化したときの総エネルギー消費量と総交通費用、およびそのときの実績値を図-4に示す。円グラフでは、その大きさでK都市圏の母都市であるK市全人口で集計した総エネルギー消費量を表している。また、それぞれの内訳は一般財、および自動車と公共交通機関のトリップによるエネルギーの消費比率を表す。さらに、多目的関数ベクトルをスカラー化するパラメータ β_1, β_2 を 1.0:0.0 から 0.85:0.15 に変化させた結果も併せて示した。

まず、目的関数ベクトルを総エネルギー消費量だけにした場合の結果について、箇条書きで考察を概説する。

1)1997年の総エネルギー消費量と総交通費

	実績	最適時	
		$\beta_1 : \beta_2 = 1 : 0$	$\beta_1 : \beta_2 = 0.85 : 0.15$
1984			
総エネルギー消費量	7.13×10^9	6.77×10^9 (0.949)	6.96×10^9 (0.976)
総交通費用	3.84×10^8	4.97×10^8 (1.29)	3.85×10^8 (1.00)
1997			
総エネルギー消費量	1.08×10^{10}	1.06×10^{10} (0.981)	1.07×10^{10} (0.991)
総交通費用	8.40×10^8	1.10×10^9 (1.31)	9.01×10^8 (1.07)

注) 総エネルギー消費量、総交通費用の単位は、それぞれ kcal/日、円である。
()内は実績に対する比率を示す。

図-4 コンパクト性評価指標の実績値と最適値

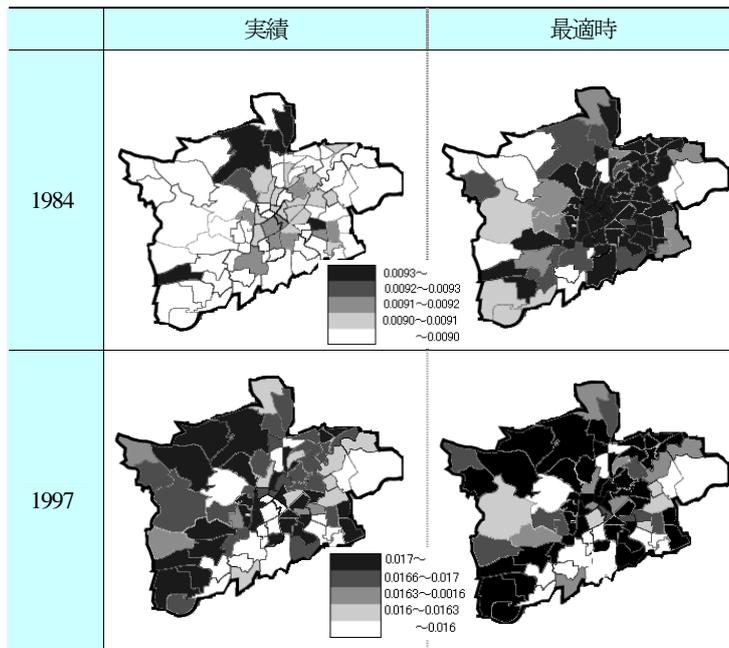


図-5 ゾーン別エネルギー効率性指標の空間分布

用の実績値は、1984年の1.51倍、2.19倍になっている。
2)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実績から削減することが可能である。一方で、総交通費用は増加する。

3)自動車トリップによるエネルギー消費比率を減らす代わりに、1984年には公共交通機関トリップの消費比率を、1997年には一般財と公共交通機関トリップの消費比率を増加させることによって、総エネルギー消費量を削減することが可能である。

4)最適化による総エネルギー消費量の削減効果は、1997年は1.9%であり、1984年の5.1%に比較して小さい。一方、総交通時間の増加率は、1997年は31.0%であり、1984年の29.4%に比較して大きい。

次に、目的関数ベクトルに総エネルギー消費量に加えて総交通費用を導入した場合の結果について考察する。

5)総エネルギー消費量の実績値からの削減率は、 $\beta_1 : \beta_2 = 1.0 : 0.0$ のときの削減率よりも小さいものの、1984年が2.4%、1997年は0.9%となる。一方、総交通費用の増加率はそれぞれ、0.3%、7.3%である。

このように、総エネルギー消費量と同時に総交通費用を目的関数ベクトルに導入して多目的最適化を行った場合、実績値よりも総エネルギー消費量を削減させ、かつ総エネルギー消費量だけを目的関数とした場合よりも総交通費用が小さく、実績からあまり増加させないような解を得ることができる。その効果は1997年よりも1984の方が大きかった。

(2) エネルギー効率性指標

ゾーンごとの単位エネルギー消費量あたりの効用水準であるエネルギー効率性指標 $EU_i = U_i / E_i$ は、現在の

効用水準を維持するために必要なエネルギーの消費量を示し、その値が大きいほどエネルギー消費効率性が高いゾーンといえる。図-5にゾーン別に算出された年次ごとの実績、および最適時のエネルギー効率性値を示す。これより、下記のこと

1) 1984年、1997年いずれの時点でも、実績のエネルギー効率性が高いのは都心部や鉄道沿線のゾーンである。

2) 元々はエネルギー効率性が小さいゾーンでも、総エネルギー消費量を最小化するような施策によってエネルギー効率性を向上させることができる。その効果が大きいのは都心周辺部、および鉄道や幹線道路沿線部である。

3) 事前の想定に反して、1997年よりも1984年の方が、最適化によってエネルギー効率性指標値を改善する可能性が高かった。

5. おわりに

本研究では、交通サービスだけでなく一般財の消費も考慮した効用関数を定義し、現在の効用水準を維持した上で、コンパクト性評価指標ベクトル目的関数を最適化するような一般財の消費量や交通パターンを求める評価方法を提案した。熊本都市圏への適用の結果、交通サービスの消費の代替として一般財の消費を増加させたり、自動車トリップを公共交通機関トリップに転換させたりするような施策によって、現在よりも総エネルギー消費量が少ないコンパクト化が可能であること、その際、総交通時間を実績値からあまり増加させずに総エネルギー消費量を削減させることも可能あることが分かった。

今後は、どのような都市構造や交通サービス形態がコンパクトな都市を形成できるかを明らかにするためには、本モデルをそれらが異なる他の都市圏にも適用し、都市間比較を行うことが求められる。

【参考文献】

- 1) Newman, P. & Kenworthy, J. (1999), Sustainability and Cities : Overcoming Automobile Dependence; Island Press, Washington DC.
- 2) 近成 純・青山吉隆・中川大・松中亮治 (2003), 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.
- 3) 土井俊祐, 青山吉隆, 中川大, 柄谷友香, 近成 純 (2006), 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.
- 4) 金本良嗣・蓮池勝人・藤原徹(2006), 政策評価マイクロモデル, 東洋経済新報社.