

CUE 型土地利用・交通モデルを用いた都市内人口分布の最適化手法^{*1}

Optimization Method for Population Distribution Using Land-Use and Transport Model of CUE Type^{*1}

富田安夫^{*2}・寺嶋大輔^{*3}

By Yasuo TOMITA ^{*2}・Daisuke TERASHIMA^{*3}

1. はじめに

我が国の都市は、経済停滞、人口減少・少子高齢化の急速な進展、政府の財源不足、中心市街地の衰退、地球環境問題の深刻化、過度の自動車利用による環境問題など様々な問題に直面している。このような中、都市構造のコンパクト化によって、以下のような効果が期待できる。1)市街地が減少すればインフラ整備・維持管理費の節約が可能である。2)中心市街地が活性化されれば、既存インフラの有効利用にもなる。3)活動間の近接性が高まることによって交通移動距離も減少する。4)市街地密度の向上は公共交通の成立条件を高め、公共交通サービスの拡大につながることから、高齢者などの交通弱者の交通手段確保にもなる。5)公共交通未整備地域への市街地拡大を抑制することによって、自動車への過度の依存も抑制される。

このように都市のコンパクト化による多くの利点はあるものの、目指すべき都市構造（コンパクトさの程度）の不明確さや、コンパクト化による効果の大きさに対する疑問が指摘されている¹⁾²⁾。そこで、従来より、都市のコンパクト化に関する実態分析として、都市のコンパクト性の程度に関する分析^{3)~7)}や都市構造と交通エネルギー消費の関連性分析^{8)~11)}などの研究がなされてきている。しかし、これらの研究では都市構造の誘導に関する分析はなされていない。一方、都市構造の誘導に関する研究としては、土地利用・交通モデルを用いた研究^{12)~14)}を挙げることができるが、評価指標が交通エネルギー消費量などの単一指標に限られていること、また、政策の組み合わせ（政策パッケージ）に関する最適化まではなされていないなどの限界を有している。

そこで、本研究では、武藤・上田ら¹⁵⁾による CUE モデル(Computable Urban Economics Model)を用いて、社会的総余剰を目的関数とする土地利用・交通モデルを提案し、最適な都市内人口分布を求める手法を提供することを目的とする。

なお、本モデルは、近年、研究が積極的に進められている均衡制約付き数理最適化問題(MPEC: Mathematical Problem with Equilibrium Constraints)の一種であり、このようなモデルの解法アルゴリズムには3つの方法、すなわち、1)非線形感度分析による方法、2)簡単な制約付き数理最適化問題に変換して解く方法、3)発見的方法によって解く方法、がある¹⁶⁾。本研究は、3)に属する方法である Fowkes ら¹⁷⁾の方法を一部変更して用いている。この他にも、遺伝的アルゴリズムを用いた方法¹⁸⁾が提案されているが、本研究のように目的関数の凸性が仮定できる場合には、Fowkes らによる方法の方が効率的であると判断した。

2. 都市内人口分布の最適化手法

(1) モデルの前提条件

本研究では、代表的な土地利用・交通モデルのひとつである武藤・上田による CUE モデルを、社会的総余剰（目的関数）の最大化モデルとして拡張する。本手法の主な前提条件は、次のとおりである。

- 1) 都市圏の人口は与件とする。
- 2) 対象とする活動主体は、世帯、ディベロッパー、地主、政府（自治体）とし、ディベロッパー以外の企業行動は対象外とする。
- 3) 各活動主体の行動規範として、世帯は所得制約下の効用最大化行動を、ディベロッパー及び地主は、利潤最大化行動を仮定する。
- 4) 政府（自治体）はひとつであり、その財政は収支均衡しているものと仮定する。

*1 キーワーズ：最適人口分布、土地利用・交通モデル、CUE モデル

*2 正会員 工博 神戸大学工学部建設学科助教授

(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 Phone: 078-881-6014

E-mail: tomita@kobe-u.ac.jp)

*3 学生員 修(工) 神戸大学大学院自然科学研究科

- 5) インフラ費は人口あるいは市街地面積に比例するものと仮定する。
 6) 都心部のインフラは余裕があるものと仮定する。

(2) 目的関数

目的関数は社会的総余剰とし、これを次式に示すように、世帯の等価変分 (EV)、自動車による地球環境負荷の変化 (ENV)、開発利益としての総地代の変化 (R) によって定義する。((1.b)式の誘導は補論を参照)

なお、政策実施による地代増分 (R) と、これによる EV の減少分は相殺しあう関係にあるが、政策の実施によって、交通費用の節約、インフラ費用の節約、環境負荷の軽減などの効果の発生によって社会的総余剰は増加することになる。本モデルはこれらの効果を最適化するものである。

$$a(\mathbf{X}) = EV(\mathbf{X}) - ENV(\mathbf{X}) + R(\mathbf{X}) \rightarrow \max \quad (1.a)$$

$$\text{ここで, } EV(\mathbf{X}) = \sum_i I_{i0} \frac{V_{i1}(\mathbf{X})N_{i1}(\mathbf{X}) - V_{i0}N_{i0}}{V_{i0}} \quad (1.b)$$

$$ENV(\mathbf{X}) = \sum_k (l_{k1}(\mathbf{X}) - l_{k0}) \cdot d_k \cdot m^{-1} \cdot c \cdot \gamma \quad (1.c)$$

$$R(\mathbf{X}) = \sum_i (g_{i1}(\mathbf{X}) \cdot G_{i1}(\mathbf{X}) - g_{i0} \cdot G_{i0}) \quad (1.d)$$

ここで a : 社会的総余剰, EV : 総等価変分, ENV : CO₂ 排出による地球環境負荷の増加, R : 総地代の増加, $\mathbf{X}$: 政策変数ベクトル, I_{ih} : ゾーン i の状態 h における所得, V_{ih} : ゾーン i の状態 h における間接効用, N_{ih} : ゾーン i の状態 h における世帯数, l_{kh} : リンク k の状態 h における交通量, d_k : リンク k の距離, m : 単位燃料あたり走行距離 (燃費), c : 単位燃料あたり CO₂ 排出量, γ : 単位 CO₂ 排出量あたり環境費用額, g_{ih} : ゾーン i の状態 h における地代, G_{ih} : ゾーン i の状態 h における土地面積, h : 状態 ($h=0$: モデル適用前, 1 : 適用後), ただし Y, d_k, m, c, γ は外生変数。

(3) 本研究における CUE 型土地利用・交通モデル

本研究では、土地利用・交通モデルとして、武藤・上田らによる CUE モデルを用いている。ただし、本モデルでは、企業立地を対象外としていること、土地供給モデルの違いなど、厳密には武藤・上田らの CUE モデルとは一致していない。

a) 住宅立地モデル

① 居住者立地モデル

世帯の直接効用関数 (U) を住宅広さ、余暇時間、合成財消費量、自由トリップによって定義し、世帯の予算

制約下における効用最大化行動を定式化すると次式となる。

$$V_i = \max_{Z_i, A_i, S_i, X_i} [U_i(Z_i, A_i, X_i, S_i)] \quad (2.a)$$

$$\text{s.t. } pZ_i + r_i A_i + (s + q_i) X_i + wS_i = w \left\{ \Omega - \frac{\sum_j N_{ij} T_{ij}}{N_i} \right\} \quad (2.b)$$

ここで, i : 居住ゾーン, V_i : ゾーン i の間接効用 ((1.b)式の V_{i1} と同一である), $U(\cdot)$: 直接効用関数, Z_i : ゾーン i の居住者の合成財消費量, A_i : ゾーン i の居住者の住宅床面積, X_i : ゾーン i の居住者の自由目的トリップ数, S_i : ゾーン i の居住者の余暇時間, p : 製造業財価格, r_i : ゾーン i の単位床面積あたり賃料, s : 自由目的 1 トリップあたりサービス業財消費額, q_i : 1 自由目的トリップあたり移動費用, w : 賃金率, Ω : 利用可能時間, N_{ij} : 地域 i に居住し地域 j で就業する世帯数, T_{ij} : 地域 i と地域 j 間の交通所要時間, N_i : 地域 i の世帯数 ((1.b)式の N_{i1} と同一である), ただし, p, s, w, Ω は外生変数

上式によって求められる間接効用関数を用いて、世帯の居住ゾーン選択確率 (Q_i) を集計ロジットモデルによって定式化すると次式となる。

$$Q_i = \frac{GA_i \exp(\alpha V_i)}{\sum_j GA_j \exp(\alpha V_j)} \quad (3)$$

この居住ゾーン選択確率を用いれば、ゾーン別世帯数は次式となる。(ただし都市圏内の総世帯数を $\bar{N}$ とする)

$$N_i = \bar{N} \cdot Q_i \quad (4)$$

② ディベロッパーの建物床供給モデル

ディベロッパーの生産関数 (建物床供給関数) を土地と建設資材によって定義し、ディベロッパーの利潤最大化行動を定式化すれば次式となる。

$$\Pi_i = \max [r_i AS_i - \min(g_i G_i + JK_i)] \quad (5.a)$$

$$\text{s.t. } AS_i = AS(G_i, K_i) \quad (5.b)$$

ここで, Π_i : ゾーン i の開発主体の利潤, r_i : ゾーン i の単位床面積あたり賃料, AS_i : ゾーン i の住宅床供給量, g_i : ゾーン i の住宅用土地地代, G_i : ゾーン i の住宅用土地面積, J : 資材価格 (外生変数), K_i : ゾーン i の資材投入量

③ 地主の土地供給モデル

地主の土地供給関数を、土地地代 (g_i) を説明変数とし、供給上限を供給可能面積 (GA_i) とするロジット式によって定式化すれば次式となる。

$$GS_i = \frac{1}{1 + \exp(-\theta g_i)} GA_i \quad (6)$$

ここで、 GS_i : ゾーン*i*の住宅用土地供給量、 θ : パラメータ、 GA_i : ゾーン*i*の開発可能面積 (外生変数)

④建物市場および土地市場の需給均衡条件

建物市場および土地市場の均衡条件式は次式のとおりである。

$$\text{建物市場} : N_i \cdot A_i = AS_i \quad (7.a)$$

$$\text{土地市場} : G_i = GS_i \quad (7.b)$$

b) 交通モデル

交通モデルは、発生・集中モデル、分布モデル、分担モデル、配分モデルからなる標準的な四段階モデルとする。交通目的は通勤、通学、業務、自由、帰宅とする。ただし、従業者分布は与件であることから、業務の分布交通には現況値を用い、配分モデルのみ適用する。

①発生・集中モデル

発生・集中モデルには表-1に示す説明変数を用いた原単位あるいは回帰式を用いる。

表-1 発生・集中モデルの説明変数

目的	発生モデル	集中モデル
通勤	世帯数	従業者数
通学	世帯数	世帯数
自由	世帯数	従業者数, 世帯数
帰宅	従業者数, 世帯数	世帯数

②分布モデル

分布モデルには重力モデルを用いる。(ただし、予測結果が発生・集中量に一致するようにフレーター法により調整する。)

$$x_{ij}^p = k^p \frac{(O_i^p)^{\alpha^p} (D_j^p)^{\beta^p}}{(T_{ij}^p)^{\gamma^p}} \quad (8)$$

ここで、 x_{ij}^p : 目的*p*の*ij*間トリップ数、 T_{ij}^p : 目的*p*の*ij*間一般化費用、 $\alpha^p, \beta^p, \gamma^p, k^p$: 目的*p*のパラメータ

③分担モデル

分担モデルは自動車と鉄道のみを対象とし、これ以外の交通手段については現況の分担率を用いて除いている。モデル式には次式の集計ロジットモデルを用いる。

$$x_{ij}^{p,m} = x_{ij}^p \frac{\exp[\lambda^p T_{ij}^{p,m} + \zeta_m^p]}{\sum_m \exp[\lambda^p T_{ij}^{p,m} + \zeta_m^p]} \quad (9)$$

ここで、 $T_{ij}^{p,m}$: 目的*p*のゾーン*i*とゾーン*j*との間の交通手段

*m*の一般化費用、 x_{ij}^p : 目的*p*のゾーン*i*とゾーン*j*との間の交通機関 (自動車または鉄道) 利用トリップ数、 $x_{ij}^{p,m}$: 目的*p*のゾーン*i*とゾーン*j*との間の交通手段 *m* (*m*=1:自動車 2:鉄道) のトリップ数、 λ^p : 目的*p*のパラメータ、 ζ_m^p : 目的*p*の鉄道ダミー変数

④配分モデル

道路交通の配分は、道路容量を考慮した分割配分法を用いる。道路ネットワークは、主要地方道以上によって構成する。鉄道交通の配分は、最小一般化費用の経路への一括配分とする。鉄道ネットワークはすべて鉄道網によって構成する。

(4)インフラ費節約および所得補助政策に伴う世帯の予算制約式の修正

a) インフラ費節約

都市がコンパクト化されれば、郊外部の市街地は削減され、政府の支出するインフラ費が節約される。政府の収支均衡を前提とすれば、インフラ費の節約分は世帯所得に還元される。(ただし、都心部のインフラには余裕があり、人口増加に伴うインフラの追加費用はないものと仮定している。)

このようなインフラ費の削減額は、人口および市街地面積とインフラ費とが比例関係にあるものと仮定すれば次式によって求められる。(ただし、この式については今後、精緻化の必要がある。)

$$f = \sum_{i \in H_s} \left(F_i \frac{\bar{N}_i - N_i}{\bar{N}_i} \right) \quad (10)$$

ここで *f* : 都市圏全体のインフラ費節約額、*H_s* : 郊外ゾーン集合、*F_i* : 現況のゾーン*i*のインフラ費、 $\bar{N}_i$: 現況のゾーン*i*の世帯数 ((1.b)式の *N_{i0}*に同じ変数である)

b) 所得補助政策

ゾーン*i*の居住世帯に、 δ_i 円/世帯の所得補助を行うことによって、ゾーン*i*の世帯所得は上昇する。一方、政府の収支均衡の仮定により、この財源を都市圏内の全世帯が平均的に負担するものとすれば、この負担分は次式となる。

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_i [N_i \cdot \delta_i] \quad (11)$$

c) 予算制約式の修正

以上のようなインフラ費の節約額および所得補助政策に伴う世帯予算への影響を整理すると、予算制約式は次式となる。

$$pZ_i + (1 - \delta_i)r_i A_i + (s + q_i)X_i + wS_i = w \left[\Omega - \frac{\sum_j N_{ij} T_{ij}}{N_i} \right] + \frac{f}{N} + \delta_i - \sigma \quad (12)$$

ここで、 δ_i : ゾーン i に立地する世帯に対する所得補助額 ($\delta_i > 0$) σ : 所得補助財源のための負担額

3. 計算方法

モデルの計算方法として、戦略交通モデルを対象として提案された Fowkes ら²⁾による方法を一部変更した方法を用いる。本研究の方法を模式的に示したものが図-1である。まず、ランダムに選んだ複数の政策に対して、CUE モデルを適用する。この計算結果を用いて、多変数の2次曲面による目的関数の近似式を求める。推定された近似式から最適政策(近似解)を求める。この得られた近似解の近傍(前回よりシミュレーションの政策範囲を狭めた領域)において、さらに、同様の操作を繰り返す、順次、近似解を改善する。このような方法が適用できるためには目的関数が凸関数であることが必要であるが、本研究における政策分析においてはこの条件が成立しているものと考えられる。本研究の方法の Fowkes らの方法との相違点は、目的関数の近似式を、一変数の2次式ではなく、多変数の2次曲面を用いて近似したこと

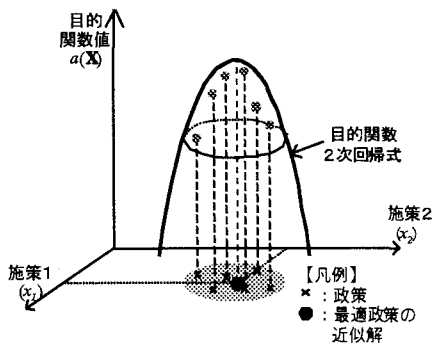


図-1 最適政策の計算方法

であり、このことにより政策変数間の相乗効果が捉えられるようになった。

4. 対象地域とパラメータ設定

(1) 対象地域

対象地域は、図-2に示す名古屋都市圏(都心から20km圏、人口約450万人、うち名古屋市内人口210万人、平成8年時点)とする。ゾーン区分は、名古屋市内16ゾーン(区単位)、名古屋市外17ゾーン、計33ゾーンとする。また、これらのゾーンを、便宜上、都心、近郊、郊外(名古屋市内)、郊外(名古屋市外)の4つに区分する。

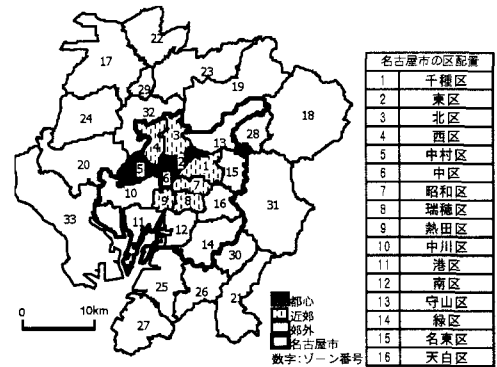


図-2 ゾーン図

(2) 使用データ

モデルのパラメータ設定にあたっては表-2に示すデータを用いた。

表-2 使用データ

種 類	出 典 (年)
夜間人口	住民基本台帳 (H8)
消費支出	家計調査 (名古屋市区) (H8)
地代	公示地価 (H8) より利子率 3% として地代を求める。
床賃料	住宅情報(リクルート社)をもとに設定 (H14 データを GNP 変化率によって H8 価格に換算。)
開発可能面積	土地に関する統計年報(H8, 愛知県) 固定資産税課税対象となる民有地面積のうち、田、畑、住宅地の合計とする。
インフラ費	愛知県統計年鑑 (H9) における市町村別土木費注。
交通データ	第3回中京都市圏パーソントリップ調査 (H3)

(注)土木費は、道路・橋梁・公園の新設・維持管理、市街地整備に関する費用、人件費を含むものである。ここで、人件費が含まれているのは、これを分離することがデータ上困難なこと、また、施設の新設・維持管理の量の変化に比例して長期的には人件費も変化するもの考えたためである。

(3) パラメータの設定

a) 世帯の効用関数

効用関数をコブダグラス型関数であると仮定すると、パラメータは各財の支出額の比率と一致する。名古屋市の家計調査をもとに推計した世帯の効用関数のパラメータを表-3に示す。

表-3 世帯の効用関数のパラメータ

変数	パラメータ値
合成財消費量(単位) (Z_i)	0.061
自由トリップ(TE/日) (X_i)	0.143
住宅床面積(m ²) (A_i)	0.063
余暇時間(時間) (S_i)	0.733

b) 居住者立地モデル

居住者立地モデルにおける居住ゾーン選択確率を与える集計ロジットモデル(3式)の推定結果を表-4に示す。

表-4 居住者立地モデルのパラメータ

変数	パラメータ値	t値
間接効用(V_i)	2.05	2.91
港区タミー	-0.67	-5.34
名東区・天白区タミー	0.71	4.46
名古屋南部(市外)タミー	-0.29	-2.60
決定係数 = 0.67		
サンプル数 = 33		

c) 建物床供給モデル

ディベロッパの建物床の生産関数は、規模に関して収穫一定のコブダグラス関数とすると、単位当たり建物床を供給するための費用(r_i)は次式となる。

$$r_i = \alpha^{-\alpha} (1-\alpha)^{\alpha-1} g_i^{\alpha} J^{1-\alpha} \quad (13)$$

この式で、建物床価格 r_i 及び土地地代 g_i は表-2のデータによって与えられるが、資材価格 J 及びパラメータ α は未知である。そこで、資材価格 J を逐次変化させて、パラメータ α を推定し、決定係数の高い結果を採用した。この推定結果を表-5に示す。

表-5 建物床供給モデルのパラメータ

変数	パラメータ値	t値
シェアパラメータ(α)	0.40	27.05
資材価格(J) (円)	48.7	-
決定係数 = 0.96		
データ数 = 33		

d) 土地供給モデル

土地供給モデル((6式)の推定結果を表-6に示す。

表-6 土地供給モデルのパラメータ

変数	パラメータ値	t値
土地地代(r_i^{HL})	0.17	10.5
定数項	-2.68	-11.3
決定係数 = 0.78		
データ数 = 33		

e) 目的関数

目的関数におけるCO₂排出費用(ENV)に関するパラメータ((1.c)式)を表-7に示す。

表-7 環境費用のパラメータ

単位燃料あたり走行距離(m)	(注1)	9.6km/l
単位燃料消費あたりCO ₂ 排出量(c)	(注2)	0.63kg-C/l
単位CO ₂ 排出量あたり環境費用(γ)	(注2)	36円/kg-C
単位走行あたり地球環境費用(m ⁻¹ c γ)		2.36円/km

(注1) 運輸関係エネルギー要覧(H4, 運輸省運輸政策局編)による乗用車の値(1990)を用いた。

(注2) 水素利用国際リサーチセンター技術報告書(H10, 新エネルギー産業技術総合開発機構)における値を用いた。

f) 交通モデル

発生・集中モデル, 分布モデル, 分担モデルの推定結果を表-8~表-10に示す。

表-8 発生・集中モデルパラメータ

i) 発生

目的	世帯数 (t値)	従業者数 (t値)	決定係数
通勤	0.96 (13.7)	-	0.86
通学	0.54 (11.35)	-	0.81
帰宅	1.18 (9.1)	0.80 (18.6)	0.94

(注) 自由目的の原単位は住宅立地モデルの(2)式におけるXiとして与えられるので、パラメータは推定していない。

ii) 集中

目的	世帯数 (t値)	従業者数 (t値)	決定係数
通勤	-	0.62 (45.6)	0.99
通学	0.47 (8.32)	-	0.69
自由	0.70 (7.0)	0.44 (13.3)	0.90
帰宅	2.44 (13.4)	-	0.85

5. 政策分析

(1)前提条件

都市圏の総人口（平成8年）を与件として，所得補助政策によって実現可能な最適な都市内人口分布を求めた．所得補助額（定額補助）は，地域区分に応じてそれぞれ独立に補助額を定めている．地域区分は図－2（既出）に示した都心・近郊・郊外（名古屋市内），郊外（名古屋市外）の4区分である．

(2)分析結果

表－11は，最適化の計算過程における目的関数の推定結果と最適解を示したものである．繰り返し回数4回で収束した（収束条件は，政策変数および目的変数において1%以内とした）．最適政策としての各ゾーン別の補助額は都心に7.01万円／月，近郊に0.85万円／月，その他のゾーンは0となった．これに，(11)式により求められる所得補助の財源のための全世帯一律の税負担額1.10万円／月，および，(10)式により求められるインフラ費節約の所得還元額0.13万円／月を考慮すると，実質の所得補助額は，都心に6.04万円，近郊に－0.12万円，郊外および名古屋市外に－0.97万円となり（マイナスは課税を意味する），補助金の対象は都心のみとなった．

このときの人口分布は表－12であり，人口誘導による

表－9 分布モデルのパラメータ

交通目的	発生交通量 α^p (t 値)	集中交通量 β^p (t 値)	一般化費用 γ^p (t 値)	定数項 k^p (t 値)	決定係数
通勤	0.765 (14.29)	1.071 (25.04)	2.063 (37.00)	-14.615 (-19.54)	0.69
通学	0.666 (9.74)	0.748 (8.64)	2.244 (29.05)	-7.031 (-6.21)	0.65
自由	1.058 (8.48)	0.819 (15.67)	2.635 (43.48)	-7.583 (-8.36)	0.72
帰宅	1.058 (21.44)	0.819 (16.28)	2.483 (45.71)	-12.958 (-15.48)	0.73

表－10 分担モデルのパラメータ

交通目的	一般化費用入 (t 値)	鉄道ダミー ζ_m (t 値)	決定係数
通勤	-0.0006 (-8.51)	-2.294 (-20.83)	0.94
通学	-0.0005 (-5.55)	1.353 (7.63)	0.89
自由	-0.0009 (-7.07)	-2.109 (-12.51)	0.85
帰宅	-0.0006 (-11.53)	-1.654 (-15.70)	0.91

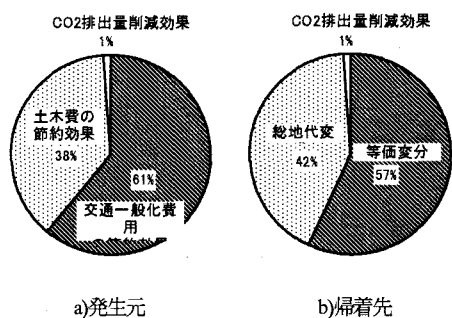
表－11 最適化の計算過程における推定式と最適解

繰返回数	推定された目的関数と最適解	
1 回目	目的関数	$a(\mathbf{X}) = -0.0873x_1^2 - 0.0223x_2^2 - 0.0602x_3^2 - 0.2324x_4^2 - 0.0115x_1x_2 - 0.0567x_1x_3 - 0.0101x_1x_4 - 0.0278x_2x_3 + 0.0092x_2x_4 - 0.0464x_3x_4 + 1.2426x_1 + 0.1216x_2 + 0.3191x_3 - 0.5414x_4 - 2.2097$
	最適解	$(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*) = (7.060, 0.900, 0, 0)$ のとき $a(\mathbf{X}^*) = 2.232$
2 回目	目的関数	$a(\mathbf{X}) = -0.1448x_1^2 - 0.1646x_2^2 - 0.0720x_3^2 - 0.2983x_4^2 - 0.1454x_1x_2 + 0.1368x_1x_3 - 0.0917x_1x_4 + 0.1258x_2x_3 + 0.0170x_2x_4 - 0.1020x_3x_4 + 2.2388x_1 + 1.4256x_2 - 1.1611x_3 - 0.5002x_4 - 6.7148$
	最適解	$(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*) = (7.141, 1.177, 0, 0)$ のとき $a(\mathbf{X}^*) = 2.119$
3 回目	目的関数	$a(\mathbf{X}) = -0.3551x_1^2 - 0.1110x_2^2 - 0.2122x_3^2 - 0.3141x_4^2 - 0.2379x_1x_2 + 0.3424x_1x_3 - 0.1909x_1x_4 + 0.1157x_2x_3 - 0.0987x_2x_4 + 0.08563x_3x_4 + 5.1808x_1 + 1.8567x_2 - 2.5261x_3 + 1.3055x_4 - 16.8465$
	最適解	$(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*) = (7.010, 0.851, 0, 0)$ のとき $a(\mathbf{X}^*) = 2.103$
4 回目	目的関数	$a(\mathbf{X}) = -0.3555x_1^2 - 0.1078x_2^2 - 0.2119x_3^2 - 0.3259x_4^2 - 0.2378x_1x_2 + 0.3366x_1x_3 - 0.1889x_1x_4 + 0.1118x_2x_3 - 0.1004x_2x_4 + 0.08610x_3x_4 + 5.187x_1 + 1.850x_2 - 2.4580x_3 + 1.3982x_4 - 16.8699$
	最適解	$(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*) = (7.012, 0.846, 0, 0)$ のとき $a(\mathbf{X}^*) = 2.098$
備考	1) $a(\mathbf{X})$: 社会的総余剰 (億円/日)， x_1, x_2, x_3, x_4 : 都心，近郊，郊外 (名古屋市内)，郊外 (名古屋市外) での所得補助額 (万円/月)，ただし $x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$ 2) いずれの推定された目的関数も，ヘッシアン行列の固有値がすべて負であることから凹関数である．	

社会的効果の発生元及び帰着先の内訳は、図－3のとおりである。表－12によれば、都心部の人口の52%増加が最適であるという結果が得られている。このような都心部での大きな人口増加に対して、都心部の道路には大きな混雑は生じていないことが計算結果より得られている（平均混雑が1.06から1.10へと4%の増加）。これは、夜間人口は52%増加するものの昼間人口で見ると15%程度の増加であること、また、都心部は鉄道が整備されており自動車分担率が比較的低いことなどのためと考えられる。しかしながら、道路以外のインフラについては分析の中では考慮されていないため、インフラが不足する場合には、その費用についても考慮することが必要である。

表－12 所得補助政策による最適な人口分布

	現況	政策後	変化
都心	265,000	403,000	52.1%
近郊	732,000	729,000	-0.4%
郊外	1,160,000	1,115,000	-3.9%
名古屋市外	2,310,000	2,220,000	-3.9%
合計	4,467,000	4,467,000	-



図－3 所得補助政策による効果の発生元と帰着先の内訳

6. おわりに

本研究では、武藤・上田らの CUE モデルを、社会的総余剰の最大化モデルとして拡張することによって、最適な都市内人口分布を求めるための手法を開発した。この手法は、近年、わが国の都市において進められている都市のコンパクト化政策立案に対して有用な手法を提供するものである。また、本手法の計算にあたっては、Fowkes らの手法を一部変更した手法を用いた。適用例を通して、この計算アルゴリズムが本手法の解法として適

用可能であることを確認した。

今後の課題はまだ多く残されており、以下に示すとおりである。

- 1) 従業人口は与件としており従業人口配置の最適化についても考慮できるように拡張することが必要である。
- 2) 人口が増加する地域における居住環境の変化（近隣外部性の発生）については考慮していない。近隣外部性についてもモデルに内生化する必要がある。
- 3) インフラ節約費や CO₂ の削減効果に関するパラメータについてはデータ制約等のため必ずしも適切な設定ができていない。さらに精緻な検討が必要である。
- 4) 今回の分析では、都心部においてインフラの余裕があることを仮定しているが、都心部のインフラ整備が十分でない都市も多く存在することから、人口増加に伴うインフラ整備費用についても考慮することが必要である。
- 5) 本モデルでは世帯のタイプによる住宅立地選好は扱っていないが、少子・高齢化の進行によって世帯タイプの構成が変化し、それに伴って平均的な世帯の立地選好も変化することを考えると、世帯タイプ別のモデル分析も必要である。

【補論】人口分布の変化による EV の変化((1.b)式)の導出
都市圏内外での人口流動はないものと仮定し、都市圏内の人口移動のみによる政策前後における等価変分の総額の変化を導出する。なお、都市圏内外での人口流出入を考慮する場合には流出入者の EV の変化を外生的に与えることが必要である。

まず、政策前後での移転しない世帯も含めて、政策実施前にゾーン i に居住し、政策実施後にはゾーン j に居住する世帯（移転しない場合には $i=j$ ）の EV は、支出関数を用いて次のように表せる。

$$EV_{ij} = e(P_{j0}, V_{j1}) - e(P_{i0}, V_{i0})$$

$e(\cdot)$ ：支出関数、 P_0 ：ゾーン i における政策実施前の価格ベクトル

このとき、地域全体の EV は次式となる。

$$EV = \sum_i \sum_j EV_{ij} = \sum_i \sum_j [N_{ij} \{e(P_{j0}, V_{j1}) - e(P_{i0}, V_{i0})\}]$$

ここで、 N_{ij} ：ゾーン i からゾーン j に移転する世帯数（ただし、 $i=j$ の場合は移転しないことを意味する）

ここで、効用関数にコブダグラス型のような相似拡大的な関数（ホモセティックな関数）を仮定すると、価格ベクトル一定のもとで、支出関数は V_{i0} に比例¹⁹⁾し、上式は以下のように書き換えられる。

$$EV = \sum_i \sum_j \left(N_{ij} V_{i1} \frac{I_{j0}}{V_{i0}} \right) - \sum_i \sum_j \left(N_{ij} V_{i0} \frac{I_{i0}}{V_{i0}} \right)$$

ここで、 $\sum_i N_{i1} = N_{i1}$ 、 $\sum_i N_{i1} = N_{i0}$ であるから、

$$EV = \sum_i \left(N_{i1} V_{i1} \frac{I_{i0}}{V_{i0}} \right) - \sum_i \left(N_{i0} V_{i0} \frac{I_{i0}}{V_{i0}} \right)$$

上式右辺の第1項の i を j に置き換えれば(1.b)式が導出できる。

(参考文献)

- 1) 海道清信：コンパクトシティの欧州モデル－持続可能な都市形態論とわが国の動き－，日本不動産学会誌，No.58，pp8-17，2001
- 2) 谷口守：都市のコンパクト化と住宅需要マネジメント－住宅不動産市場の動向を踏まえて－，日本不動産学会誌，第15巻3号，pp33-38，2001.10
- 3) 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論文集，pp73-78，1999
- 4) 江口由紀，土井健司：日韓両首都の市街地形成及び都市のコンパクト性の比較分析，土木計画学研究・講演集，Vol.20(1)，pp211-214，1997
- 5) 中澤正尋，宮下清栄，高橋賢一：幹線街路網構成からみた都市のコンパクト性に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.23(1)，pp103-106，2000
- 6) 堀裕人，細見昭，黒川洸：自動車エネルギー消費量から見たコンパクトシティに関する研究－宇都宮都市圏の2時点におけるPTデータを用いて－，第35回日本都市計画学会学術論文集，pp241-246，2000
- 7) 目山直樹，柴田貴徳：実態経済活動の影響に着目した都市構造形成の検証，土木計画学研究・講演集，Vol.22(1)，pp117-120，1999
- 8) 牛田清：首都圏の分散政策シミュレーション－多極分散型都市構造をめざして－，第23回日本都市計画学会学術論文集，pp79-84，1988
- 9) 杉田浩，関野達也，谷下雅義，鹿島茂：交通エネルギー消費量，交通費用，都市整備・維持費用からの都心居住と郊外居住の比較分析，第35回日本都市計画学会学術論文集，pp247-252，2000
- 10) 小根山裕之，大西博文：環境負荷の小さい都市構造・交通体系に関する一考察，土木計画学研究・講演集，Vol.20(2)，pp129-132，1997
- 11) 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，Vol.13，pp361-368，1996
- 12) Miyamoto, K., Vichiensan, V., Muhammad, S. R. and Sato, Y.: An Evaluation System of Policy Alternatives based on TRANUS from the Viewpoint of a Compact City, Proceedings of CUPUM '03 Sendai, The 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, 2003
- 13) 土井健司，紀伊雅敦，金広文，シーラ・ガープカヤン：マニラ首都圏における都市化とモータリゼーションの相互作用系の制御に関する分析，土木学会論文集，Vol.51/IV-674，pp113-127，2001
- 14) 鈴木俊之，武藤慎一，小川圭一：都市の郊外化抑止と中心市街地活性化のための土地開発規制策評価，土木計画学研究・論文集，Vol.19，pp195-202，2002
- 15) 武藤慎一，上田孝行，高木朗義，富田貴弘：応用都市経済モデルによる立地変化を考慮した便益評価に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.17，pp257-266，2000
- 16) 鈴木崇児：MPECにもとづく政策問題とその解法，MPECにもとづく交通・地域政策分析(1章)，MPEC研究会編，勁草書房，2003
- 17) Fowkes, A.S., Bristow, A.L., Bonsall, P.W. and May, A.D.: A Short-Cut Method for Strategy Optimisation Using Strategic Transport Models, Transpn Res.-A Vol.32, No.2, pp.149-157, 1998.
- 18) 高木朗義：河川水質目標達成のために効率的な汚濁負荷削減スケジュール，MPECにもとづく交通・地域政策分析(6章)，MPEC研究会編，勁草書房，2003
- 19) ヴァリアン，H.R.(佐藤・三野訳)：ミクロ経済分析，p142，勁草書房，1986

CUE型土地利用・交通モデルを用いた都市内人口分布の最適化手法

富田安夫・寺嶋大輔

わが国の都市は，経済停滞，人口減少，少子高齢化，政府の財源不足，中心市街地の衰退，地球環境問題の深刻化，自動車の過度な利用による環境問題など様々な問題に直面している．このような問題を緩和するために，長期的にはコンパクトな都市構造を実現することが求められている．しかしながら，どの程度のコンパクトさが望ましいのか，いかなる政策によって実現可能かについては，その分析手法は開発されていない．そこで，本研究では，武藤・上田ら(2000)の開発したCUEモデルを用いて，最適な都市内人口分布及びその実現政策を求めるための手法を開発した．また，その計算方法として戦略交通モデルの計算アルゴリズムとして開発されたFowkesらによる方法を一部変更して用いた．最後に，この手法を名古屋都市圏に適用し，所得補助政策によって実現することが可能な最適な都市内人口分布を求め，モデルの適用可能性を確認した．

Optimization Method for Population Distribution Using Land-Use and Transport Model of CUE Type

Yasuo TOMITA and Daisuke TERASHIMA

Many cities in Japan are facing such various problems as economic recession, population decrease, shortage of financial resource, decline in city centre, and global and local environment problems. Compact city policies are required in order to lessen those problems. However we do not have a method to examine what urban structure is optimal and how the urban structure can be achieved. In this study, the method was developed by expanding CUE model (Computable Urban Economics Model), which was developed by Mutou and Ueda et. al., to an optimization model with objective function of social surplus, and then a modified Fowkes's method was applied for the optimization problem. Finally the developed method was applied in Nagoya metropolitan area, and the optimal population distribution to be achieved by income subsidy to households was found, which proved the applicability of the developed method.