コンパクトシティのシミュレーション分析*

Simulation Analysis of a Compact City*

渋澤博幸**・宮田　譲***張　鍵****

By Hiroyuki SHIBUSAWA** • Yuzuru MIYATA*** • Jian ZHANG****

1．はじめに

現在、世界人口の約半数は都市に居住し、社会経済活動、エネルギー利用の地理的な集中が都市における大量生産、大量消費、大量廃棄型社会をもたらしてきた。省エネ・省資源を徹底した循環型社会の構築のためには、循環や環境共生を考慮した都市への変革が緊急課題となっている。

本研究の目的は、欧米で再検討がなされているコンパクト・シティの概念を考慮しながら、省エネ・省資源を徹底した環境共生型都市の在り方を描き出すモデルを開発することにある。

本研究では、都市のコンパクト性と持続可能性について検討を行うことを試みる。プロトタイプシミュレーションモデルを開発し、持続可能なコンパクトシティの在り方を、シナリオ分析により検討する。

2．モデル

本研究の都市経済モデルは、動学社会的最適化問題である。空間は都市圏内と都市圏外に分けられる。都市圏内の空間構造を分析するため圏内はゾーンに分割される。ゾーンの集合をZとする。

モデルは社会的最適化問題として定式化されるが、一般財・サービス産業、都市基盤サービス産業、家計部門、政府部門の存在が想定される。一般財・サービス産業は、農業、工業、サービス業に分類される。各々の産業インデックスの集合をI_A, I_I, I_Sとする。一般財・サービス産業インデックスの集合は$I \equiv \{I_A \cup I_I \cup I_S\}$である。例えば、工業に属する部門は$i \in I_I$と示される。

3．社会的最適化問題

（1）　目的関数

目的関数は、計画期間Tにおける異時点間の都市圏内の家計効用の総和と期末$T+1$の資産評価関数から成る。計画期間は離散的に取り扱われる。

*キーワーズ：コンパクトシティ，シミュレーション分析

**工博，豊橋技術科学大学　　人文・社会工学系
（愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1ー1，
TEL:03-3244-6963，E-mail: shibu@hse.tut.ac.jp）
***正会員，学博，豊橋技術科学大学　　人文・社会工学系
TEL:05-3244-6955，E-mail:miyata@hse.tut.ac.jp）
****学生員，工修，豊橋技術科学大学　　環境生命工学専攻
博士後期課程
TEL:05-3244-6964，E-mail:zhang@hse.tut.ac.jp)

$$W = \sum_{t=1}^{T} \sum_{z \in Z} \frac{1}{\sigma} U^{E}(t)^{\sigma} n^{z}(t) \frac{1}{(1+\rho)^{t}}$$

$$+ \phi\big(K(T+1), H(T+1), R(T+1), EK(T+1)\big)$$

$U^E(t)$は、均衡効用水準である。$n^z(t)$はzゾーンの家計数である。パラメータρは社会的割引率を示し、σは代替性を示すパラメータである。$\phi(\bullet)$は期末の資本ストック（産業資本ベクトルK、住宅資本ベクトルH、輸送基盤資本ベクトルR、社会環境資本ベクトルEK）の評価関数である。

（2）　制約式

目的関数は、一般財・サービス市場及び都市基盤サービスのフロー条件、時間制約、労働需給条件及び資本蓄積式のもとで最大化される。

（a）一般財・サービス市場のフロー条件

一般財・サービスのフロー条件は、都市圏内と圏外及び産業別に定義される。都市圏内におけるi産業の一般財・サービスのフロー条件は次式で与えられる。

$$EF_{Fi}(t) \equiv \sum_{z \in Z} f_{Fi}^{z}\left(L_{Fi}^{z}(t), K_{Fi}^{z}(t), l_{Fi}^{z}(t), X_{Fi}^{z}(t)\right)$$

$$- \sum_{z \in Z} \sum_{k \in I} x_{Fki}^{Dz}(t) - \sum_{z \in Z} c_i^{Dz}(t) n^z(t)$$

$$- \sum_{k \in I} \mu_{ik}^{K}(t) \sum_{z \in Z} c_{Ki}\left(IK_k^z(t)\right)$$

$$- \sum_{k \in Q} \mu_{ik}^{H}(t) \sum_{z \in Z} c_{Hi}\left(IH_k^z(t)\right)$$

$$- \sum_{k \in E} \mu_{ik}^{EK}(t) \sum_{z \in Z} c_{EKi}\left(IEK_k^z(t)\right)$$

$$- \mu_i^R(t) \sum_{s \in ML} c_{Ri}\left(IR_s(t)\right) - \overline{EX}_i(t) \geq 0 \quad (i \in I)$$

都市圏外から圏内へ移入する一般財・サービスのフロー条件は次式で与えられる。

$$EIM_i(t) \equiv \overline{IM}_i(t) - DIM_i(t) \geq 0 \qquad (i \in I)$$

（b）都市基盤サービスのフロー条件

住宅サービスのフロー条件は次式である。

$$EH_k^z(t) \equiv f_{HK}^{z}\left(H_k^z(t), l_{HK}^{z}(t)\right) - h_k^z(t) n^z(t) \geq 0$$

$$(k \in Q, z \in Z)$$

交通基盤サービスのフロー条件は、リンク別に次式で与えられる。

$$ER_s(t) \equiv f_R(R_s(t)) - \sum_{z\in Z} g_H(t)\omega_s^z(t)n^z(t)$$
$$- \sum_{(o,d)\in MOOD(s)} g_L(t)LS_F^{od}(t)n^o(t) \geq 0 \ (s \in ML)$$

社会環境サービスのフロー条件は、タイプ別ゾーン別に次式で与えられる。

$$EEK_i^z(t) \equiv f_{Ei}^z\left(EK_i^z(t), l_{EKi}^z(t)\right) - ek_i^z\left[n^z(t)\right]^{\theta_i} \geq 0 \quad (i \in E, z \in Z)$$

（c）時間制約と労働制約

z ゾーンの家計の時間制約は次式で与えられる。

$$ET^z(t) \equiv \left(T_H - F^z(t) - \sum_{d\in Z} LS_F^{zd}(t) - \sum_d D^{zd}(t)LS_F^{zd}(t)\right)n^z(t) \geq 0 \quad (z \in Z)$$

労働需給条件は次式で与えられ、OD ゾーン別に定義される。

$$EL^{od}(t) \equiv LS_F^{od}(t)n^o(t) - \sum_{i\in I} L_{Fi}^{od}(t) \geq 0 \ (o,d \in Z)$$

（d）土地制約

$$EA^z(t) \equiv A^z(t) - \sum_{k\in Q} l_{Hk}^z(t) - \sum_{i\in I} l_{Fi}^z(t) - \sum_{i\in E} l_{EKi}^z(t) \geq 0$$

住宅地、農地、工業地、環境用地のための制約条件が次式で与えられる $(z \in Z)$。

$$EA_H^z(t) \equiv A_H^z(t) - \sum_{k\in Q} l_{Hk}^z(t) \geq 0$$
$$EA_A^z(t) \equiv A_A^z(t) - \sum_{i\in I_A} l_{Fi}^z(t) \geq 0$$
$$EA_F^z(t) \equiv A_F^z(t) - \sum_{i\in I_I \cup I_s} l_{Fi}^z(t) \geq 0$$
$$EA_{EK}^z(t) \equiv A_{EK}^z(t) - \sum_{i\in E} l_{EKi}^z(t) \geq 0$$

(e) 人口及び土地市場の裁定条件

都市圏内の総人口（外生）を $N(t)$ とすると、人口制約は次式で与えられる。

$$EN(t) \equiv \sum_{z\in Z} n^z(t) - N(t) = 0$$

土地市場の裁定条件は次式で表される。

$$EU^z(t) \equiv \left(U^z\left(c^z(t), h^z(t), F^z(t), ek^z(t)\right) - U^E(t)\right)n^z(t) = 0 \quad (z \in Z)$$

（f）資本蓄積

一般財・サービス産業資本 $(i \in I, z \in Z)$、住宅資本 $(i \in Q, z \in Z)$、社会環境資本 $(i \in E, z \in Z)$ 及び輸送基盤資本 $(s \in ML)$ のストック変数は通常の資本蓄積式に基づいて蓄積される。

$$IK_i^z(t) + (1 - \delta_{Ki}(t))K_i^z(t) = K_i^z(t+1)$$
$$IH_i^z(t) + (1 - \delta_{Hi}(t))H_i^z(t) = H_i^z(t+1)$$
$$IEK_i^z(t) + (1 - \delta_{EKi}(t))EK_i^z(t) = EK_i^z(t+1)$$
$$IR_s(t) + (1 - \delta_{Rs}(t))R_s(t) = R_s(t+1)$$

４．最適制御

（1）ハミルトニアン関数

離散時間における現在価値ハミルトニアン関数は次式で与えられる。

$$H(t) = \frac{U^E(t)^\sigma}{\sigma(1+\rho)^t} \sum_{z\in Z} n^z(t)$$
$$+ \sum_{z\in Z}\sum_{i\in I} q_{Ki}^z(t)\left[\ IK_i^z(t) - \delta_{Ki}(t)K_i^z(t)\ \right]$$
$$+ \sum_{z\in Z}\sum_{i\in Q} q_{Hi}^z(t)\left[\ IH_i^z(t) - \delta_{Hi}(t)H_i^z(t)\ \right]$$
$$+ \sum_{i\in E}\sum_{z\in Z} q_{EKi}^z(t)\left[\ IEK_i^z(t) - \delta_{EKi}(t)EK^z(t)\ \right]$$
$$+ \sum_{s\in ML} q_{Rs}(t)\left[IR_s(t) - \delta_R(t)R_s(t)\right]$$

ここで、$q_{Ki}^z(t)$, $q_{Hi}^z(t)$,$q_{EKi}^z(t)$, $q_{Rs}(t)$ は補助変数である。ラグランジュ関数は次式となる。

$$L = H(t) + \sum_{i\in I} p_{Fi}(t)EF_{Fi}(t)$$
$$+ \sum_{i\in I} p_{Fi}^{IM}(t)EIM_i(t) + \sum_{k\in Q}\sum_{z\in Z} p_{Hk}^z(t)EH_k^z(t)$$
$$+ \sum_{i\in E}\sum_{z\in Z} p_{EKi}^z(t)EEk_i^z(t) + \sum_{s\in ML} P_{Rs}(t)ER_s(t)$$
$$+ \sum_{z\in Z} P_t^z(t)ET^z(t) + \sum_{o\in Z}\sum_{d\in Z} w^{od}(t)EL^{od}(t)$$
$$+ \sum_{z\in Z} p_{Hl}^z(t)EA_H^z(t) + \sum_{z\in Z} p_{Al}^z(t)EA_A^z(t)$$
$$+ \sum_{z\in Z} p_{Fl}^z(t)EA_F^z(t) + \sum_{i\in E}\sum_{z\in Z} p_{EKl}^z(t)EA_{EK}^z(t)$$
$$+ \sum_{z\in Z} p_l^z(t)EA^z(t) + p_d(t)EN(t) + \sum_{z\in Z} v^z(t)EU^z(t)$$

ここで、変数 $p_{Fi}(t)$, $p_{Fi}^{IM}(t)$, $p_{Hk}^z(t)$, $p_{EKi}^z(t)$, $p_{Rs}(t)$, $p_t^z(t)$, $w^{od}(t)$, $p_{Hl}^z(t)$, $p_{Fl}^z(t)$, $p_{EKl}^z(t)$, $p_l^z(t)$, $p_d(t)$, 及び $\nu^z(t)$ は、ラグランジュ乗数であり、シャドウ価値として経済的意味をもつ。

（2）最適条件

最適化のための必要条件は次式で与えられる。

$$K_i^z(t+1) - K_i^z(t) = L_{q_{Ki}^z(t)} \quad (i \in I) \tag{1}$$
$$H_i^z(t+1) - H_i^z(t) = L_{q_{Hi}^z(t)} \quad (i \in Q) \tag{2}$$
$$EK_i^z(t+1) - EK_i^z(t) = L_{q_{EKi}^z(t)} \quad (i \in E) \tag{3}$$
$$R_s(t+1) - R_s(t) = L_{q_{Rs}(t)} \quad (s \in ML) \tag{4}$$

(1)-(4) 式は、各ストックの資本蓄積式を表す $(\partial L / \partial x = L_x)$。

$$q_{Ki}^z(t) - q_{Ki}^z(t-1) = -L_{K_i^z(t)} \quad (i \in I) \tag{5}$$
$$q_{Hi}^z(t) - q_{Hi}^z(t-1) = -L_{H_i^z(t)} \quad (i \in Q) \tag{6}$$

$$q^{z}_{EKi}(t)-q^{z}_{EKi}(t-1)=-L_{EK^z_i(t)}\ (i\in E) \tag{7}$$

$$q_{Rs}(t)-q_{Rs}(t-1)=-L_{R_s(t)}\quad (s\in ML) \tag{8}$$

(5)-(8)式は補助変数の動学方程式である。

$L_{x^{Dz}_{Fij}(t)}=0$　　$L_{x^{Iz}_{Fij}(t)}=0$　　$(i,j\in I)$ ，$L_{l^{od}_{Fi}(t)}=0\ (i\in I,o,d\in Z)$，$L_{l^{z}_{Fi}(t)}=0\ (i\in I)$，$L_{l^{z}_{HK}(t)}=0$，$L_{h^{z}_{k}(t)}=0\ (k\in Q)$，$L_{l^{z}_{EKi}(t)}=0\ (i\in E)$，$L_{c^{Dz}_i(t)}=0$，$L_{c^{Iz}_i(t)}=0\ (i\in I)$，$L_{F^z(t)}=0$，$L_{ek^z_i(t)}=0\ (i\in E)$，$L_{LS^{zd}_F(t)}=0\ (i\in I)$，$L_{IK^z_i(t)}=0\ (i\in I)$，$L_{IH^z_i(t)}=0\ (z,d\in Z)$，$L_{IEK^z_i(t)}=0\ (i\in E)$，$L_{IR_s(t)}=0\ (s\in ML)$，$L_{n^z(t)}=0$，$L_{U^E(t)}=0$

これらの式は最適化のための限界条件である。不等式制約より、ラグランジュ乗数（$p_{Fi}(t)$，$p^{IM}_{Fi}(t)$，$p^{z}_{Hi}(t)$，$p^{z}_{EKi}(t)$，$p_{Rs}(t)$，$p^{z}_{t}(t)$，$w^{od}(t)$，$p^{z}_{Hl}(t)$，$p^{z}_{Al}(t)$，$p^{z}_{Fl}(t)$，$p^{z}_{EKl}(t)$，$p_d(t)$，及び $v^z(t)$）の非負を仮定すれば、次式を得る。

$p_{Fi}(t)EF_{Fi}(t)=0$，$p^{IM}_{Fi}(t)EIM_i(t)=0\ (i\in I)$，
$p^{z}_{Hi}(t)EH^{z}_{i}(t)=0\ (i\in Q)$，
$p^{z}_{EKi}(t)EEK^{z}_{i}(t)=0\ (i\in E)$，
$p_{Rs}(t)ER_s(t)=0\ (s\in ML)$，$p^{z}_{t}(t)ET^{z}(t)=0$，
$w^{od}(t)EL^{od}(t)=0\ (o,d\in Z)$，$p^{z}_{Hl}(t)EA^{z}_{H}(t)=0$，
$p^{z}_{Al}(t)EA^{z}_{A}(t)=0$，$p^{z}_{Fl}(t)EA^{z}_{F}(t)=0$，
$p^{z}_{EKl}(t)ESA^{z}_{EK}(t)=0$，$p^{z}_{l}(t)ESA^{z}(t)=0$，
$p_d(t)EN(t)=0$，$v^z(t)EU^z(t)=0$.

これらは、一般財・サービス、社会基盤サービス、労働の需給条件を意味する。需給が一致するときシャドウ価格は正の値をもち、超過供給が存在すればシャドウ価格の値はゼロとなる。

期末の横断性条件は次式で与えられ、各式の左辺は、期末$T+1$における資本ストックの限界価値であり、これらはT期の各資産のシャドウ価格に一致する。

$$\phi(T+1)_{K^z_i(t)}=q^{z}_{Ki}(T),\ \phi(T+1)_{H^z_i(t)}=q^{z}_{Hi}(T),$$

$$\phi(T+1)_{EK^z_i(t)}=q^{z}_{EKi}(T),\ \phi(T+1)_{R_s(t)}=q_{Rs}(T)$$

５．通勤費用と所得

最適化条件から家計の行動に関連する式を得ることができる。

（１）賃金と通勤費用

$$w^{zd}(t)=p^{z}_{t}(t)+p^{z}_{t}D^{zd}(t)+\sum_{s\in M(z,d)}p_{Rs}(t)g_L(t)$$

（２）家計の所得

$$\sum_{d\in D}w^{zd}(t)LS^{zd}(t)+p_d(t)-he(t)=0$$

６．シミュレーション分析

プロトタイプモデルで、シミュレーション分析を行う。本研究では、以下のような設定のもとでシミュレーションを行っている。

（１）期間、ゾーン、部門

計画期間　５期（２５年間を想定）
ゾーン数　１０
一般財・サービス　３部門（農業、工業、サービス）
住宅サービス　２タイプ（低層、高層）
社会環境サービス　１タイプ（私的財）
輸送サービス　考慮せず

ゾーンの空間的配置は線形構造を仮定し、直線的に配置した。中央を都心部と想定している。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

（２）都市圏の初期設定

本モデルにおいては、都市圏の形態は、資本ストックの初期値に依存する。期首における資本ストックを以下のように設定した。

工業部門の資本ストックの初期値は、都心部(5,6 ゾーン)及び郊外部(1,2,9,10 ゾーン)のゾーンに相対的に大きな値を設定した。同様に、サービス部門の資本ストックの初期値も、都心部(5,6 ゾーン)及び郊外部(1,10 ゾーン)のゾーンに大きな値を設定した。サービス部門の郊外への配置は、最近の商業施設の郊外化を考慮したものである。農業部門の資本ストックの初期値は、郊外部(1,2,3,8,9,10)のゾーンに相対的に大きな値を設定した。

住宅資本ストックは低層と高層の２タイプに分けられる。低層と高層のタイプの相違は、住宅サービス生産関数のパラメータにより設定される。低層住宅資本ストックの初期値は、高層住宅資本ストックの初期値より、すべてのゾーンで相対的に低い値を設定した。低層住宅資本ストックの初期値は、都心部とその周辺(3,4,5,6,7,8)に相対的に大きな値を設定した。期首の都市では、高層住宅が少なく、低層住宅が広く分布していることを前提としている。

社会環境資本ストックの初期値は、都心部とその周辺のゾーンに相対的に大きな値を設定した。都市社会基盤の分布を想定している。

都市圏と都心圏外の関係は、財・サービスの移出量と移入量により表される。この都市は、外部からの財やエネルギー投入により成立しているものと仮定し、初期値では移出より移入の値を大きく設定している。

人口増加率は一定（ゼロ）とした。

（３）シミュレーションケースの設定

いくつかのシナリオを描くことができるが、ここでは、基本ケース（ケース０）をもとに、２つのケースについ

て検討する。

基本ケース（ケース０）

工業部門、商業部門が都心部のみならず郊外にも立地し、住宅地は多くは低層住宅が占め、将来においても、都市の分散化傾向が続く状況を想定する。

ケース１

基本ケースの状況下において、都市の物理的形態のコンパクト化がどの程度実現可能かあるいは持続可能かについて検討する。分散化している経済活動を、都心部に集中させ、コンパクト化させたときの結果を検討する。工業部門、商業部門及び高層住宅の都心部へ集積させたときの動学解の動きを調べる。都市のコンパクト化は、期末の資産評価関数のパラメータの重みを調整することで行う。

ケース２

シナリオはケース１と同様である。都市のコンパクト化をはかるため、土地利用規制を導入する。都心部に経済活動が集中するように土地利用規制を加える。

（４）シミュレーション結果

ケース０では、経済活動の分散化傾向が大都市圏の中でシミュレートされた。

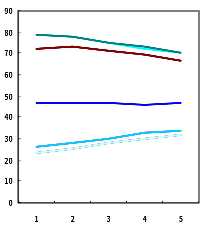

図１人口の変化

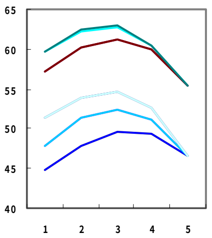

図２住宅地の変化

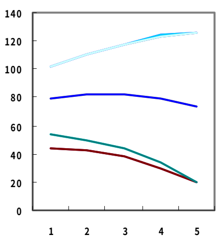

図３一般財産業投資の変化

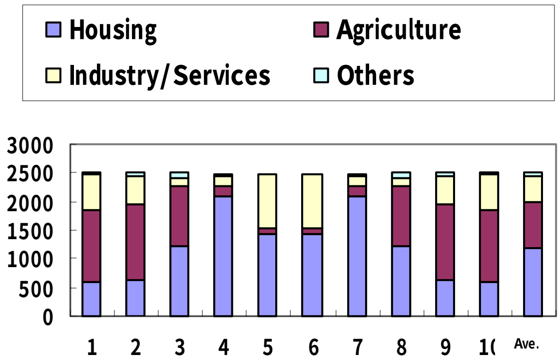

図４土地利用の変化

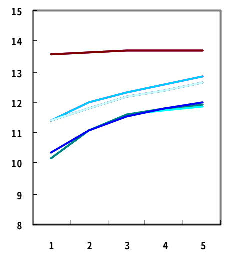

図５地代の変化

ケース１では、ケース０の中の分散傾向が抑えられる。高層住宅増加の傾向、および低い建物を収容する傾向は、最終期間で減少する。

ケース２では、ストックまたは投資の変化はケース０と同じ効果がある。土地規則が上限となる場合、住宅、産業およびサービスの地代は高くなる。

７．おわりに

本稿では、各期の人口$N(t)$を条件とするクローズドモデルについて解説した。人口が外生的に与えられると、都市圏内の均衡効用水準$U^E(t)$は内生的に決定される。一方、均衡効用水準を外生的に与えれば、人口は内生変数となる。オープンモデルへの修正は容易に行える。また、人口に依存する集積の経済効果を組み込むことで、最適人口規模を求めることができる。今後、循環構造、資源の枯渇性・再生産性、集積の経済・不経済効果、住宅資本のフィルタリング等の拡張を予定している。

参考文献

[1]Black, D. and Henderson, V. (1999), A Theory of Urban Growth, *Journal of Political Economy*, vol.107, no.2, pp.252-284

[2]Higano, Y. and Kohno, H.(1988), Optimal Reorganization of Greater Tokyo: An Industrial Complex of Agglomeration and Scale Economies 1, *Environment and Planning A*, vol.20, no.8, pp.1103-1120.

[3]Kanamoto(1980),*Theory of Urban Externalities*

[4]Miyao, T.(1981), *Dynamic Analysis of the Urban Economy*, Academic Press

[5]Palivos, T. and Wang, P.(1996), Spatial Agglomeration and Endogenous Growth, *Regional Science and Urban Economics*, vol.26, pp.645-669