

一般論文

土地利用モデルを用いた
東京都市圏の土地利用シナリオ分析山形与志樹[†]・瀬谷 創・中道久美子

摘 要

2010 年現在において、東京は世界最大の都市圏であり、東京都市圏における将来の人口・土地利用分布のシナリオを分析することが、広域的な温暖化対策（緩和と適応）の観点から非常に重要となっている。本研究では、人口・土地利用の変化をミクロ経済学的基礎に基づいて推定する土地利用モデルを構築し、東京都市圏における将来の人口・土地利用に関するシナリオ分析を実施した。通常、都市圏を対象とした土地利用モデルは、市区町村、あるいはそれ以上の領域が構築単位とされることが多いが、本研究では、都市圏全域の町丁目を構築単位としている点に特徴を有する。これによって、例えば鉄道駅付近の容積率緩和施策等、従来扱うことが難しかった地域レベルの都市施策の評価が可能になり、また、人口密度・人工排熱等の都市気候モデルのための空間詳細な入力変数の算出が可能になった。特に本研究では、地域気候モデラーからの要請が大きい、IPCC の上限・下限シナリオに対応するような、将来の土地利用の最大限の幅を示すシナリオとして、コンパクトシティ等の低炭素都市化を最大限に推し進めた『集約シナリオ』と、自動車依存により都市圏縁辺部への郊外化を最大限に推し進めた『分散シナリオ』の2つの土地利用シナリオを構築した結果について報告する。

キーワード：土地利用モデル，東京都市圏，コンパクトシティ，郊外化，シナリオ分析

1. はじめに

2010 年現在において、東京は世界最大の都市圏であり（United Nations, 2010）、東京都市圏における将来の人口、土地利用分布のシナリオ分析を行うことは、今後の都市計画だけでなく、温暖化対策（緩和と適応）の観点からも非常に重要になりつつある。言うまでもなく、将来の土地利用シナリオについて検討する場合、世帯や企業の立地行動について分析する必要がある。ミクロ的な経済行動メカニズムを考慮して将来の土地利用シナリオを構築する代表的手法としては、土地利用・交通（Land use transport (LUT)）モデル（古谷, 2003; Wegener, 2004）が挙げられる。土地利用の変化には、交通の与える影響が大きく、また逆も真であることから、これらの相互作用を明示的に考慮した LUT モデルは、土地利用シナリオ構築のための代表的手法とし

て幅広く適用されてきた。特に近年では、LUT モデルを用いて将来の土地利用シナリオを構築し、各シナリオ下における、各種環境パラメータの空間分布や、環境汚染物質の排出総量について検討する試みが行われつつある（紀伊・秋元, 2009; Gomi *et al.*, 2010）。

一方、従来からヒートアイランド分析などで利用されてきた都市気候モデル研究において、将来の土地利用を一定と仮定せずに、緑被率、人工排熱、建物密度、天空率といった都市気候モデルへの重要な入力変数について、将来変化をシナリオとして与えることのできる、LUT モデルを活用した研究の必要性が認識されつつある。特に都市気候モデルへの入力変数算出の目的では、

[1] 近年の気候モデルの空間詳細化、いわゆるダウンスケーリングの流れの中で、程度のミクロな領域において、これらの入力変数を算出すること

2010 年 9 月 16 日受付, 2011 年 1 月 29 日受理

独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター, 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

[†] Corresponding author: yamagata@nies.go.jp

[2] 都市気候モデルで必要とされる変数は、人工排熱や天空率など、建物の高さに依存するものが多いため、建物市場を明示的にモデル化することが不可欠である。しかしながら、LUTモデルに関する既往研究の多くは、市区町村が同等程度のゾーンを対象としており、また程度のミクロなゾーンを対象とした研究も、市区町村内といった比較的狭い領域を対象とした分析か、仮想データを用いたシミュレーション分析にとどまっている。大都市圏を対象に町丁目レベルでLUTモデルを構築した先駆的試みとしては、北海道道央都市圏を対象としたRURBAN（宮本（2008）参照）が存在する。しかしながら、RURBANは建物市場を明示的に考慮したミクロモデルではない（上田ほか，2008）。

そこで本研究では、町丁目レベルでは初めての開発例となる、建物市場を明示的に考慮した、土地・建物市場同時均衡型LUTモデルの新たなフレームを導入し、第4回東京都市圏パースントリップ調査（交通実態調査）（以下、東京PT調査）の対象エリア全域を対象に町丁目単位で土地利用シナリオの作成を試みた。また、特に地域気候モデラーからの要請が大きい、IPCCの上限・下限シナリオに対応するような、将来土地利用の最大限の幅を示すシナリオとして、コンパクトシティ等の低炭素都市化を最大限に推し進めた『集約シナリオ』と、自動車依存により都市圏縁辺部への郊外化を最大限に推し進めた『分散シナリオ』の2つの土地利用シナリオを構築した。

2. 都市圏における町丁目単位の土地利用モデルの構築

(1) 対象地域

図1に、本研究の対象地域である第4回東京PT調査の対象領域（町丁目単位）を示す。2005年におけるゾーン数は市区町村が333であるのに対し22,368であり、ゾーン面積の平均〔標準偏差〕（ km^2 ）は市区町村・町丁目それぞれ、79.6 [114]、0.688 [2.42]である。ここで、町丁目面積の平均は3次メッシュ（約）よりも小さいが、標準偏差は非常に大きい点が注目される。これは、都心部において面積が小さく、都市圏縁辺部（例えば、埼玉県や東京都西部の山間部）において面積が大きいことに起因している。このような、都心部や鉄道駅付近において面積が小さいという町丁目の構造は、容積率緩和施策等、現実的な都市政策シミュレーションを行う際に有用であるため、本研究では町丁目単位でモデルを構築し、シナリオ分析を実施した。また、都市気候モデル他での利用のしやすさを考慮し、町丁目得

られた結果を面積按分して3次メッシュにも変換した。本稿で示すシナリオの結果は、この3次メッシュにおける結果である。

(2) 構築するモデル

本研究で構築するモデルのベースは、応用都市経済（Computable Urban Economic（CUE））モデル（山崎ほか，2008）であり、特に新たに建物市場を町丁目レベルで考慮したモデルを開発した。CUEモデルは、ミクロ経済学の理論と整合的な都市モデルであり、都市政策の評価ツールとして豊富な適用事例を持つ（例えば、上田ほか，2008）。すでに宮城ほか（2010）、紀伊・秋元（2009）は、従来のCUEモデルを拡張し、建物市場における土地開発者の行動を明示的に考慮したモデルを構築している。しかしながら、宮城ほか（2010）は、市区町村単位でモデルを構築しており、紀伊・秋元（2009）は、仮想データを用いたシミュレーション実験である。従って、大都市圏の町丁目レベルでの詳細なデータを用いてキャリブレーションを実施し、建物市場を明示的に均衡モデルに組み入れた研究としては、本研究が世界的に見ても新たな試みである。

また本研究では、モデルの出力を基に、町丁目・3次メッシュ毎の平均的な建物の高さを算出している。これにより、人工排熱や天空率など、建物の高さに依存する環境パラメータを算出でき、都市気候モデルによってヒートアイランド現象や将来の温暖化影響を分析することが可能となる。さらに、家計部門の CO_2 排出量を推計する際に必要となる建物床面積（例えば、外岡ほか，2003）の将来予測が可能になるなど、都市域での低炭素化を検討する上での一つの有効な分析ツールに成り得ると考えられる。

図2に本研究で開発したモデルの概要を示す。本モデルでは、2万以上のゾーンをモデル構築の単位としているため、一部について従来のCUEモデルの簡略化を行っている。まず、高木ほか（2001）と同様、家計の立地行動のみを分析し、企業分布の変化については考慮していない。このため、通勤・私事目的地（厳密には、各ゾーンにトリップを行う確率）が現状に固定されるため、現状からの極端な変化が起こりにくくなる。また、本研究では、道路ネットワーク上での交通混雑は考慮しておらず、交通→土地利用の一方向の影響のみを考慮している。道路混雑は家計の効用を低下させ、立地変化の誘因となる可能性があるが、この効果は評価していない。このため、本研究でのモデル構造は土地利用と交通の相互作用を考慮するCUEモデルの構造とは異なっており、以下「土地利用モデル」という呼称

を用いることとする。

開発した土地利用モデルの前提条件は以下の通りである。

- 1) 経済主体は「家計」（表1に示す世帯タイプ $k \in K = \{1, \dots, K\}$ 、それぞれのタイプは同一の選択を持つと仮定）、「不在地主」、そして、「土地開発者（ディベロッパー）」から成る。
- 2) 都市圏内は I 個のゾーンに分割されており、各ゾーン $i \in I = \{1, \dots, I\}$ における同一用途内は同質である。
- 3) 構築モデルは閉鎖都市モデルであり、都市圏（対象地域）の総世帯数 \bar{N} は外生的に与えられ、都市圏外との交流は無いと仮定する。
- 4) 土地市場、建物市場は等効用原則に基づいており、土地市場と建物市場は同時に均衡する。
- 5) 家計は効用最大化行動に従い、立地選択を行うものとし、不在地主、土地開発者は利潤最大化行動に従うと仮定する。
- 6) 都市内の土地は、都市外に住む地主（不在地主）によって所有されている。

ここで、6) の仮定は、不在地主の仮定といわれる。都市内での地主による消費活動が資源配分に悪影響を及ぼすことを避けるため、多くの都市経済モデルで便宜上、導入されている仮定であるが（黒田ほか、2008）、特に都心の土地所有家計などが転居する際の資産効果等は評価できない。

以下、各主体の行動を定式化する。

a) 家計の行動

本研究では、従来の CUE モデルの「代表的個人」の仮定を緩和して、世帯を表1の7タイプに分類したモデルを構築した（ただし、世帯タイプの割合は、将来も変化しないと仮定する）。各世帯は、所得制約の下で、自身の効用を最大化するように住宅建物床面積、私事トリップ、合成財、余暇を消費し、その結果として得られる間接効用値に基づき居住地の選択を行うとする。なお、CUE モデルの既往研究と同様、対数線形型の効用関数を想定している。

$$V_i^k = \max_{Z_i^k, A_i^k, Q_i^{k,pr}, L_i^k} \left[\alpha_Z^k \ln Z_i^k + \alpha_A^k \ln A_i^k + \alpha_Q^{k,pr} \ln Q_i^{k,pr} + \alpha_L^k \ln L_i^k \right] \quad (1)$$

$$s.t. \quad Z_i^k + R_i A_i^k + c_i^{k,pr} Q_i^{k,pr} + w L_i^k = w(T^k - c_i^{k,co} Q_i^{k,co}),$$

ここで、 V ：間接（最大化された）効用、 Z ：価格を1とした合成財の消費量、 A ：住宅建物床面積消費量、 Q^{pr} ：私事トリップ消費量、 L ：余暇消費量、 α ：分配パラメータ、 R ：住宅建物賃料、 c^{pr} ：私事トリップの一般化価格、 w ：賃金率、 T ：総利用可能時間（固定）、 c^{co} ：通勤トリップの一般化価格、 Q^{co} ：通勤トリッ

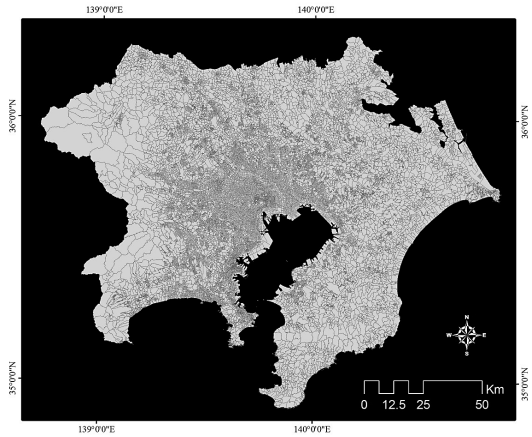


図1 町丁目単位のゾーン

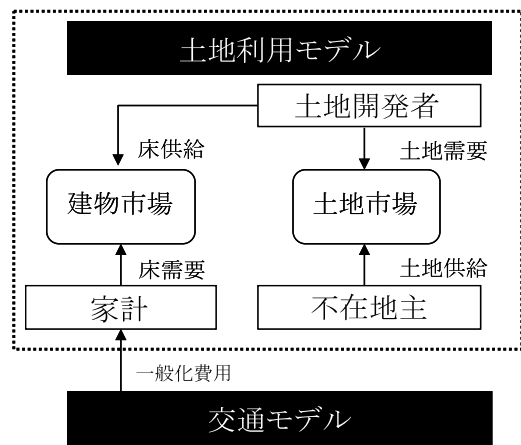


図2 モデルの概要

表1 世帯タイプ分類

- | |
|-----------------------|
| A. 高齢単身（65歳以上） |
| B. 若中年単身（65歳未満） |
| C. 高齢夫婦（夫婦どちらかが65歳以上） |
| D. 若中年夫婦（夫婦両方65歳未満） |
| E. 片親と未婚子供 |
| F. 夫婦と未婚子供 |
| G. その他 |

ブ消費量である。

通常の CUE モデルでは、式(1)の間接効用値 V に現状での人口分布を完全に再現するようにキャリブレーションで求める補正値 e を加えた $v_i^k = V_i^k + e_i^k$ を確定項とした多項ロジットモデルに

より立地選択確率を表現することが多い。しかし本研究では、町丁目数が2万を超えることから、立地選択確率の行列を直接求めると、計算コストが非常に大きくなるという問題を避けるため、第一段階で市区町村 $m \in M = \{1, \dots, M\}$ を、第二段階でその中の町丁目 i を選択するネステッド・ロジットモデルによって立地選択確率を算出することとした。

$$P_{i,m}^k = P_m^k \cdot P_{i|m}^k, \quad (2)$$

$$P_m^k = \frac{\exp[\theta^k s_m^k]}{\sum_m \exp[\theta^k s_m^k]}, \quad P_{i|m}^k = \frac{\exp[\phi^k v_i^k]}{\sum_i \exp[\phi^k v_i^k]},$$

$$s_m^k = \frac{1}{\phi^k} \ln \left[\sum_i \exp[\phi^k v_i^k] \right].$$

ゾーン i の世帯タイプ k の立地数は、 \bar{N} に立地選択確率 $P_{i,m}^k$ を乗じた値となる。

b) 不在地主の行動

不在地主は各ゾーンの土地に1人ずつ存在し、提供する土地を維持管理するための費用を支払い、土地の需要者であるディベロッパーに対し利用可能な土地を提供し、地代収入を得る。具体的な行動基準は、次式で定義される利潤関数の最大化である。

$$\pi_i = [r_i y_i - c(y_i)], \quad (3)$$

$$c(y_i) = -\sigma_i Y_i \ln \left[1 - \frac{y_i}{Y_i} \right],$$

ここで、 π ：不在地主の利潤関数、 $c(y)$ ：不在地主が土地を維持・管理するための費用関数、 r ：地代、 y ：住宅土地供給、 Y ：利用可能面積、 σ ：パラメータである。 σ は、現状の土地供給を完全に再現するよう逆算して求める。

c) 土地開発者（ディベロッパー）の行動

開発者は各ゾーンに1人ずつ存在し、資本と土地を生産要素財として、建物生産による利潤を最大にするよう行動する。

$$\Pi_i = \max \{ R_i \cdot u_i - C(u_i) \}, \quad (4)$$

$$C(u_i) = \min_{w_i, K_i} (r_i \cdot w_i + M \cdot K_i), \quad u_i = v \cdot w_i^a \cdot K_i^b$$

ここで、 Π ：開発者の利潤関数、 u ：建物生産床面積、 $C(u)$ ：開発者の建物生産費用関数、 w ：開発者に供給された土地面積、 M ：土地以外の資材価格、

K ：土地以外の資材投入量、 a, b, v ：パラメータ ($0 < a + b < 1$) である。ホテリングの補題を用いて、建物床供給関数 (u_{si}) 及び土地需要関数 (w_{di}) が次式のように導出される。

$$u_{si} = \phi_1 \cdot R_i^{\frac{a+b}{1-a-b}} \cdot r_i^{\frac{a}{1-a-b}}, \quad (5)$$

$$w_{di} = \phi_2 \cdot R_i^{\frac{1-a}{1-a-b}} \cdot r_i^{\frac{1-b}{1-a-b}}, \quad (6)$$

ここで、 ϕ_1, ϕ_2 はパラメータであり、現状の建物床供給、土地需要を完全に再現するよう逆算して求める。

d) 清算条件

清算条件は、立地均衡、建物市場均衡、土地市場均衡から成る。まず、立地均衡状態とは、どの主体も自らの立地選択確率を変更しても目的関数の水準を向上させることができない状態である。各世帯の立地数の清算条件は次式で与えられる。

$$\sum_i \sum_k N_i^k = \bar{N}, \quad (7)$$

ここで、 N_i^k はゾーン i 、タイプ k の世帯数である。国土交通政策研究所 (2005) は、家計の3割のみが転居行動を行うと仮定し、7割は現状に固定している。この点の内生化は重要な課題であるが、町丁目レベルで、転居に関するデータを入手することは、新たな大規模調査なしには困難であることから、本研究においても外生的に設定している。本研究では、表1において、高齢者 (A, C) は転居せず、残りの世帯のうちの3割が転居行動をとると仮定する (ただし、統計調査では都市圏間の転居も含めて約3割のところ、本研究では都市圏内での転居が3割と仮定している)。

建物市場の清算条件は各ゾーンにおける住宅建物床需要量と各ゾーンのディベロッパーの供給する住宅建物床面積が合致することであり、次式で与えられる。

$$\sum_k A_i^k N_i^k = u_{si}, \quad (8)$$

土地市場の清算条件は各ゾーンにおけるディベロッパーの土地面積需要量と各ゾーンの不在地主の建物床面積供給量が合致することであり、具体的には次式で与えられる。

$$w_{di} = y_i \quad (9)$$

e) 交通モデル

本研究の交通モデルは、交通手段選択モデルと、目的地選択モデルから成る。まず、交通手段選択モデルは、次式のようにロジットモデルで定式化される。

$$P_{i,j}^{k,o}(r) = \frac{\exp[-v^o C_{i,j}^{k,o}(r)]}{\sum_r \exp[-v^o C_{i,j}^{k,o}(r)]} \quad (10)$$

ここで、 $i, j \in I$ は、発地ゾーン（O）と着地ゾーン（D）を示しており、 $o = [co, pr]$ は、それぞれ通勤目的と私事目的を示す。 $r \in R = \{1, \dots, R\}$ は交通手段を示し、 C はODゾーン間の交通費用を示す。 v はパラメータである。交通手段としては、鉄道、バス、自動車、徒歩の4つを考慮する。目的地選択モデルは、次式のようにロジットモデルで定式化される。

$$P_{i,j}^{k,o} = \frac{\exp[-\lambda^o c_{i,j}^{k,o}]}{\sum_j \exp[-\lambda^o c_{i,j}^{k,o}]} \quad (11)$$

$$C_{i,j}^{k,o} = -\frac{1}{v^o} \ln \left[\sum_r \exp[-v^o C_{i,j}^{k,o}(r)] \right],$$

$$c_{i,j}^{k,o} = C_{i,j}^{k,o} - \gamma^o \cdot f(S_j),$$

$$c_i^{k,o} = -\frac{1}{\lambda^o} \ln \left[\sum_j \exp[-\lambda^o c_{i,j}^{k,o}] \right],$$

ここで、 $C_{i,j}^{k,o}$ はODペアの期待最少費用で、 S_j はゾーン j の魅力変数（従業者人口を採用） γ, η, λ はそれぞれパラメータである。 $f(S_j)$ は S_j の関数であり、本研究ではボックス・コックス型に特定化する。

$$f(S_j) = \begin{cases} \frac{S_j^{\tau^o} - 1}{\tau^o}, & \text{for } \tau^o \neq 0 \\ \ln S_j^{\tau^o}, & \text{for } \tau^o = 0 \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 τ は0と1の間の値をとるパラメータである。 $c_{i,j}^{k,o}$ は一般化費用であり、これが土地利用モデルへのインプットとなる。

本研究で用いたパラメータ値を表2に示す。 α は最小二乗法で統計学的に決定しているが、残りは既存統計データを再現するようにキャリブレーションで設定している。具体的には、町丁目レベルではデータのばらつきが大きく、統計データに適合させるのが困難であるため、市区町村レベルの総量で実データとモデル予測値の差が最小になるようにパラメータを一つずつ動かしながら探索的に決定していき、町丁目においては、前述のパラメータ(e)を加えることで再現性を確保している。再現性に関して、実データと予測値の相関係数（他のパラメータは固定）でみると、 e 導入前では、人口・土地面積、建物床面積それぞれ、市区町村レベル(0.87; 0.98; 0.74)、町丁目レベル(0.82; 0.87; 0.30)となっている。床面積について再現性が低い点は課題であるが、この値自体が推計値であり誤差を含むことも要因として考えられよう。

このようにキャリブレーションによってパラメータを求める方法は、均衡モデルでは一般的であ

表2 用いるパラメータ

	α_Z	α_A	α_{pr}^Q	α_L	θ	ϕ
Type1	0.2570	0.0106	0.0242	0.7082	13	13
Type2	0.3641	0.0170	0.0342	0.5847	6.0	6.0
Type3	0.2280	0.0181	0.0457	0.7082	10	10
Type4	0.3463	0.0213	0.0477	0.5847	5.0	5.0
Type5	0.3038	0.0291	0.0824	0.5847	5.0	5.0
Type6	0.3313	0.0159	0.0681	0.5847	5.0	5.0
Type7	0.3216	0.0171	0.0766	0.5847	5.0	5.0

w	v^{co}	v^{pr}	γ^{co}	γ^{pr}	a	b	τ^{co}	τ^{pr}	λ^{co}	λ^{pr}
2691	0.002	0.002	48	49	0.193	0.589	0.33	0.27	0.0005	0.0004

るが、言うまでもなく改善すべき課題である。今後、ベイジアンキャリブレーション等の統計学的方法によるパラメータ設定方法の開発について、検討したい。

(3) 用いるデータ

本研究で用いるデータを、表3に示す。従来の市区町村単位のモデルと比較したときの、町丁目単位のモデルの一番の問題点は、データ入手の困難性である。表3において、地代、賃料、交通データ、建物・土地面積データは町丁目単位での入手が難しい。これに関して本研究では、次のような手法でデータ不足に対処する工夫を行った。

まず、賃料と地代は、代表的なデータ予測手法であるBlock kriging法（例えば、Cressie, 1993）によって各町丁目の推計値を計算した。通常、ゾーン内の観測点におけるデータを平均して推計する場合が多いが、地代（地価）・賃料データは全町丁目 で存在するわけではないため、krigingのような統計学的補間法が有効となる。また、町丁目間の交通データは、既存調査からの取得が困難であるため、東京PT調査の市区町村レベルの目的地選択確率とOD交通分担を再現するように、前述のように市区町村レベルでパラメータを設定した。

住宅建物床・土地面積については、固定資産課税台帳のデータが、市区町村単位で電子化・公開されており、市区町村単位のモデルにおいては、これを用いることが可能である。しかしながら町丁目単位では公開されておらず、個別の画地単位か町丁目単位で集計された固定資産課税台帳を閲覧・転記する必要があるが、対象エリアが広域である場合、このような方法は現実的ではない。

そのため、本研究では、土地面積については固定資産課税台帳データにおける市区町村別土地面積を町丁目の面積で比例的に按分し、建物面積については、(株)ゼンリンのZ map town IIの建物ポリゴンデータからGISを用いて町丁目単位の床面積を取得し、市区町村単位に集計した値が固定資産課税台帳の建物床面積と合致するように、各町丁目に対して誤差を町丁目面積で比例配分した。また、世帯別の建物床面積データは既存統計情報からの入手が困難であるため、国勢調査の「世帯の家族類型（16区分）、延べ面積（14区分）別住宅に住む主世帯」から、市区町村単位で世帯タイプ別の建物床消費に関する分配係数を求め、その分配係数を所与として逆算した。

3. 土地利用シナリオの構築

(1) シナリオの内容

本研究では、将来の大都市圏の土地利用における最大限の空間分布の変動幅を分析するため、現状維持のBAUシナリオ（A）、無制限の車利用が進んで郊外に人口分散する自動車依存型分散シナリオ（B）、そして、ほぼ鉄道利用だけに制限される鉄道利用型駅前集中（コンパクトシティ）シナリオ（C）の、3つのシナリオを、土地利用モデルを用いたシミュレーションによって構築した。各シナリオに対応したシミュレーションを実施するために設定した土地利用モデルのパラメータの概要を下記に示す。

A) (SCENARIO: A)：現状維持（BAU）

B) (SCENARIO: B)：自動車依存型地方分散シナリオ（自動車車両購入費無、燃料費無、高速道路無

表3 利用するデータ

項目	利用する統計データ	年度	機関
人口	国勢調査	2005	総務省
利用可能時間 / 余暇 / 賃金率	社会生活基本調査	2006	総務省
所得	民間給与実態統計調査	2007	国税庁
地代	地価公示（国土数値情報）	2005	国土交通省
賃料	所有賃貸物件データ	2005	(株)At Home
交通	第4回東京都市圏PT調査 / 総合交通分析システム（NITAS）	1998	国土交通省
資材価格	建設資材・労働需要実態調査 / 建設総合サイト建設Navi	2006	国土交通省 / 建設物価調査会
建物床面積	固定資産課税台帳 Z map town II	2005	総務省 / (株)ゼンリン
土地面積	固定資産課税台帳	2005	総務省
利用可能土地面積	国勢調査可住地域	2005	総務省

表 4 交通仮想データ

手段	内容
自動車	<ul style="list-style-type: none"> ・費用：時間費用＋燃料費＋固定費＋高速料金 ・旅行速度：（私事：30 [km/h]，通勤：18 [km/h]） ・燃料費：120 [円 / l] ・高速料金：JH 24.6 [円 / km] × 40 [km/h] ・0.4h 未満であれば，高速道路は使用しないと仮定 ・固定費（車両購入費）：1,000,000 [円] ÷ 120 [月] ・固定費（駐車場費）：地価との線形回帰で算出
鉄道	<ul style="list-style-type: none"> ・費用：アクセス費用＋時間費用 [円] ＋乗換費用＋運賃＋イグレス費用 ・アクセス，イグレス：1.0km 未満は徒歩，以上は自動車と仮定 ・時間費用，乗換回数，運賃：NITAS より算出 ・乗換費用：乗換回数 [回] × 乗換コスト [円 / 回] ・乗換コスト：10 [分 / 回]
バス	<ul style="list-style-type: none"> ・費用：時間費用＋乗換費用＋運賃 ・旅行速度：11.25 [km/h] ・乗換費用：乗換回数 [回] × 乗換コスト [円 / 回] ・乗換回数：複数の路線を調査し線形回帰にて算出（14.4 × 乗車時間 [h]） ・乗換コスト：10 [分 / 回] ・運賃：複数の路線を調査し線形回帰で算出 （バス時間 [h] × （640 + ガソリン価格）[円 / h]）
徒歩	<ul style="list-style-type: none"> ・費用：時間費用 ・徒歩速度：4 [km/h]，町丁目内距離：0.5 × 1.25 [km]

料，在宅勤務（通勤コストゼロ）と仮定

C) (SCENARIO: C)：鉄道利用型駅前集中（コンパクトシティ）シナリオ（自動車利用禁止（ガソリン代 100,000 円 / l），法定容積率制限無と仮定と仮定

ただし，B，C シナリオに相当するシナリオをシミュレーションするパラメータの設定方法には無数の可能性があり，ここでの設定は，極端な土地利用，交通施策を想定して試行錯誤的に決定したアドホックな値である。

(2) シナリオ分析の結果と考察

図3に，各シナリオについて，東京都市圏全体における，最寄駅からの住宅地までの距離帯（0.1km 毎）について，人口密度を推計した結果を示す。3つのシナリオのシミュレーションでは，最寄駅から遠い（例えば4km 以上）ゾーンにおいて，人口密度がB（分散）＞A（BAU）＞C（集中）となり，最寄駅付近では逆にC（集中）＞A（BAU）＞B（分散）となるという想定された結果が得られている。B（分散）シナリオでは，通勤費が下がるこ

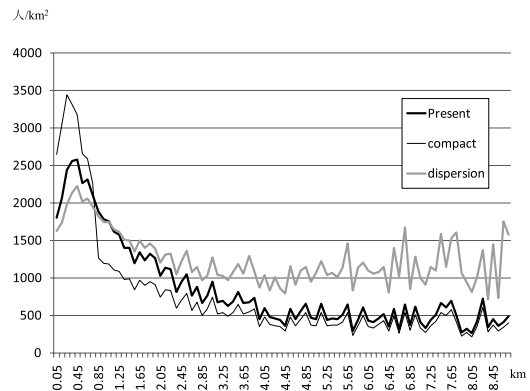


図3 最寄駅からの距離と人口密度（人 / km²）分布

とで，都市圏縁辺部の効用が高まることによって都市圏縁辺部での人口が増加している。一方，C（集中）シナリオでは，自動車費用の増加により，鉄道駅付近において効用が高まることによって，0.75km 未満の鉄道駅付近において，極端な人口の増加が見られ，都市圏縁辺部では人口が減少する結果が得ら

れている。

図4～6に、3つのシナリオにおける人口密度(人/km²)の変化を示す。B(分散)では、都心部、鉄道駅付近で人口が減少し、人口が都市圏縁部に薄く広がっている空間分布の変化が示されている。一方でC(集中)では、都心部や鉄道駅付近の町丁目で局所的に人口が増加する都市の空間構造となることが分かる。

図7は、(住宅床面積 / 土地面積)の値から、仮想的に建物階数を推計した現状(A)の結果である。推計値ではあるものの、実調査に基づく建物階数データの入手は困難であるため、一つの簡易な代理指標として有用であると考えられる。図7より、鉄道駅付近で、相対的に建物階数値が高く、東京都心部で特に高層の建物が集中していることが読み取れる。建物階数分布が求められることで、人工排熱や天空率等の建物の高さに依存する環境パラメー

タが自然に算出でき、都市気候モデルへの入力変数として用いることが可能である。

図8, 9は、深見ほか(2003)の表3-5の排出量原単位(日平均値(W/km²))に、各シナリオ下の建物床面積を乗じ、メッシュ面積で割ることで1km²メッシュあたりの人工排熱(顕熱)を算出、図示したものである。ただしここでは、住宅建物と商業建物からの排出(顕熱)のみを図示しており、潜熱、および交通からの排出が含まれていないという意味で、既往研究の知見(例えば、一ノ瀬(2009), p.303)と比べると、小さな値となっている。図8, 9より、C(集中)では、都心部や鉄道駅の直近で建物需要量が増加し、図の分類上で最も上の階級(19W/km²以上)に分類されたメッシュが多く見られる一方、B(分散)では、当該階級はあまり見られず、低い階級のメッシュが広がっていることが分かる。

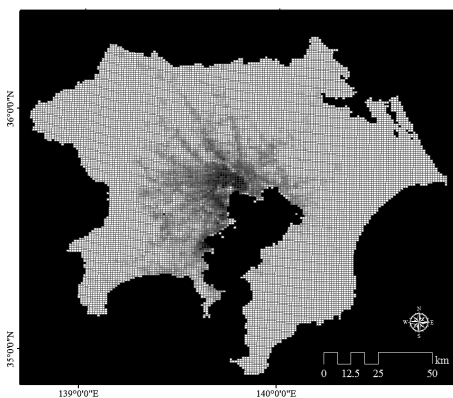


図4 人口密度分布 (A)

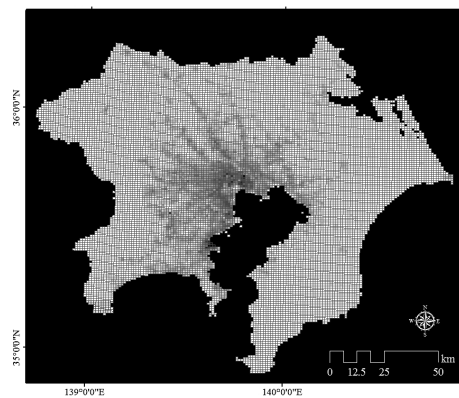


図5 人口密度分布 (B)

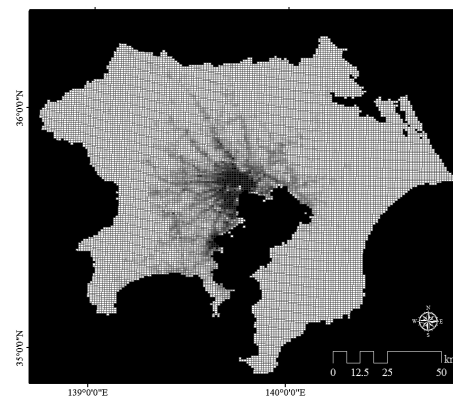


図6 人口密度分布 (C)

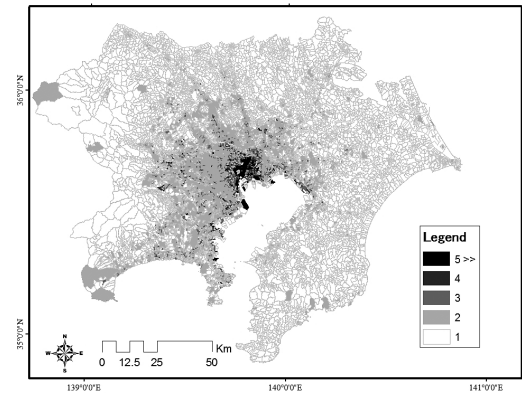
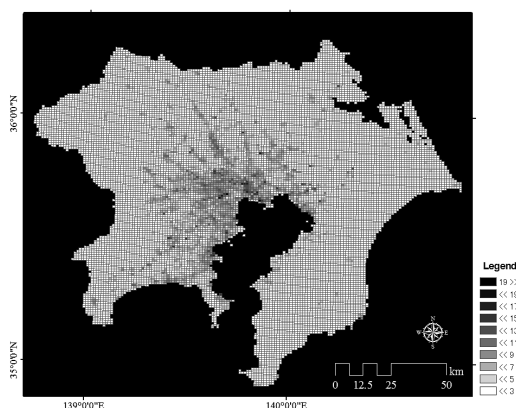
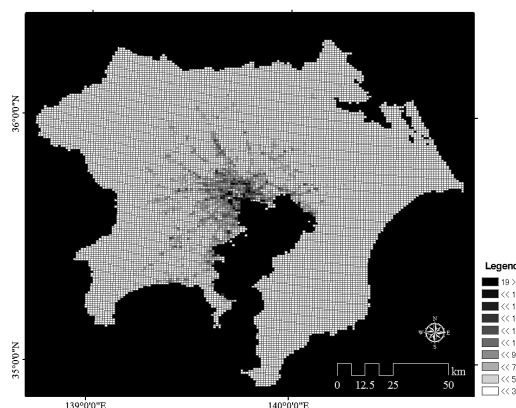


図7 住宅建物階数(住宅床面積 / 土地面積)

図8 建物人工排熱分布 (B; 顕熱 W/m^2)図9 建物人工排熱分布 (C; 顕熱 W/m^2)

現在、都市気候モデルを用いて将来気候を分析する際には、人工排熱分布をはじめとする入力変数の多くは現状と同一と仮定されることが多い。本稿では、人工排熱の算出において、建物床面積を用いる簡便な手法を用いているが、近年では、建物高さを考慮した立体的な変数としても考慮されるようになってきている (Kikegawa *et al.*, 2006)。これに関して本稿では、建物市場を明示的にモデル化することにより建物高さを算出する方法を提示しており、今後これを高さを考慮した人工排熱の算出に応用することも取り組んでいきたい。本研究の土地利用モデルでシミュレートされた出力を、都市気候モデルに入力することにより、都市の土地利用シナリオが将来の都市気候に与える影響について分析する新たな研究が可能となる。たとえば、IPCCの4つのシナリオに対応した気候変動予測を都市レベルにダウンスケールした上で、それぞれ異なった土地利用シナリオを想定して、気候変動の影響や有効な適応策を分析することが、本研究成果の活用として期待されるところである。

なお、近年、都市気候変化のエネルギー消費へのフィードバック効果に関する研究も盛んに行われており (鳴海ほか, 2007; 一ノ瀬, 2009)、今後はこのような問題に対応していくことも重要である。ただし、空調機器のシステムの影響や夏期と冬期の違い等、エネルギー消費量と人工排熱量の関係は単純なものではないことも議論されており (たとえば, Ichinose *et al.*, 1999)、これらの動きを把握しながら研究を進めていく必要がある。

4. おわりに

本研究では、都市気候モデルなどが必要とする将

来の土地利用の空間パターンにおける最大限の変動幅を示すことを目的として、新たに町丁目レベルでの空間詳細な土地利用モデルの開発に取り組んだ。東京都市圏全域を対象に土地利用モデルを構築し、将来の土地利用に関するシナリオ分析を行った。特に、建物に関する情報を明示的に考慮することで、自然に将来の人工排熱パラメータが取得できることを示し、空間詳細な土地利用シナリオを構築するモデルの開発に成功した。また、町丁目レベルのモデル構築に用いるデータの作成方法についても検討し、今後、重要性が増すと考えられる空間詳細な土地利用モデル構築のための実証的知見を得ることができた。一方、本研究で固定としている企業行動の内生化、道路混雑、土地利用→交通の影響の考慮などは、今後のモデル高度化の課題である。

本研究のシナリオ分析で示したような、駅前からの距離に従って人口分布が変動する土地利用シミュレーションの結果は、従来の市区町村単位で構築された土地利用モデルでは得られない。町丁目単位で構築された本モデルによって初めてこのような空間詳細な土地利用シナリオの分析が可能となったことは大きな成果と考える。今後、都市における空間的な土地利用問題に関する各種政策検討を実施する際に有用なツールとなるよう、さらにモデルの高度化を進めてゆく予定である。特に、駅前への集中シナリオは、コンパクトシティ (中道ほか, 2004) を導出するために有効な政策を定量的に分析するための新たな手法となる可能性があり、地球温暖化の緩和や適応にかかわる土地利用シナリオの構築への発展が今後の課題である。特に、地球温暖化対策 (緩和・適応) の観点から、望ましい持続可能な土地利用シナリオについて、自治体の政策担当

者などとの情報交換を踏まえて具体的に検討を進める中で、モデルの高度化に取り組んでゆく予定である。

謝 辞

本研究で構築したモデルに対して、筑波大学の堤盛人氏、価値総合研究所の山崎清氏、国立環境研究所の松橋啓介氏から有益なコメントを、(株)GOGA にはデータ整備等に協力をいただいた。ここに記して感謝を申し上げます。尚、本研究は環境省の地球環境研究総合推進費課題「S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究」の支援により実施された。

文 献

- 1) Cressie, N. (1993) Statistics for spatial data, revised edition, Wiley, New York.
- 2) Gomi, K., K. Shimada, and Y. Matsuoka (2010) A low-carbon scenario creation method for a local-scale economy and its application in Kyoto city. *Energy Policy*, 38, 4783-4796.
- 3) Ichinose, T., K. Shimodozono, and K. Hanaki (1999) Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 33, 3897-3909.
- 4) Kikigawa, Y., Y. Genchi, H. Kondo, and K. Hanaki (2006) Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning, *Applied Energy*, 83, 649-668.
- 5) United Nations (2010) World urbanization prospects, the 2009 Revision: Highlights. New York, http://esa.un.org/unpd/wup/doc_highlights.htm, (accessed 2010-09-11).
- 6) Wegener, M. (2004) Overview of land use transport models, in Hensher, D.A., K.J. Button, K.E. Haynes, and P.R. Stopher, (Eds.), *Handbook of transport geography and spatial systems*, 127-146, Amsterdam.
- 7) 一ノ瀬俊明 (2009) ヒートアイランド軽減の都市低炭素化へのフィードバック, *環境科学会誌*, 22 (4), 301-308.
- 8) 上田孝行・堤 盛人・武藤慎一・山崎 清 (2008) わが国における応用都市経済モデル-特徴と発展経緯-. *応用地域学会*, 11月15日~16日, 2008, 釧路公立大学.
- 9) 紀伊雅敦・秋元圭吾 (2009) 都市政策による CO₂ 削減効果と持続可能性評価のための土地利用交通モデル, *エネルギー・資源学会論文誌*, 31 (1), 16-22.
- 10) 黒田達郎・田淵隆俊・中村良平 (2008) 都市と地域の経済学 [新版]. 有斐閣ブックス.
- 11) 国土交通政策研究所 (2005). 経済成長と交通環境負荷に関する研究 I. 国土交通省国土交通政策研究第 42 号.
- 12) 高木朗義・武藤慎一・太田奈智代 (2001) 応用都市経済モデルを用いた治水対策の経済評価. *河川技術論文集*, 7, 423-428.
- 13) 外岡 豊・深澤大樹・村橋喜満・三浦秀一 (2003) 都道府県別・建て方別住宅エネルギー消費量と CO₂ 排出実体の詳細推計. *日本建築学会環境系論文集*, 592, 89-96.
- 14) 中道久美子・谷口 守・松中亮治 (2004) 都市コンパクト化政策に対する簡易な評価システムの実用化に関する研究-豊田市を対象にした SLIM CITY モデルの応用-. *都市計画論文集*, 39 (3), 67-72.
- 15) 鳴海大典・二浦尾友佳子・下田吉之・水野 稔 (2007) 昇温が大阪府域のエネルギー消費に及ぼす影響, *日本建築学会環境系論文集*, 613, 71-78.
- 16) 深見和彦・久保和幸・木内 豪・吉谷純一・末次忠司・河原能久・小林裕明・吉田 武・伊藤正秀・新田弘之・城戸 浩 (2003) ヒートアイランド軽減技術の評価手法に関する研究. 平成 11 - 15 年ヒートアイランド現象軽減対策効果の定量化と費用便益評価に関する研究, <http://www.db.pwri.go.jp/pdf/D6422.pdf>, (accessed 2010-09-11).
- 17) 古谷知之 (2003) 土地利用モデルのレビュー. (財)道路経済研究所, 総合的な交通政策・計画の分析評価手法とモデルの展開, 道経研シリーズ, A-107.
- 18) 宮城卓也・堤 盛人・山崎 清 (2010) 開発者行動を考慮した応用都市経済モデルの可能性. *土木計画学研究・講演集*, 41, (CD-ROM390).
- 19) 宮本和明 (2008) 世界における実用都市モデルの実態調査とその理論・機能と適用対象の体系化, 平成 18 ~ 平成 19 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (c)) 研究成果報告書.
- 20) 山崎 清・上田孝行・岩上一騎 (2008) 開発人口及び誘発・開発交通を考慮した東京湾アクアラインの料金値下げ効果の計測. *高速道路と自動車*, 51 (6), 20-32.

Scenario Analysis of the Future Urban Land Use in the Tokyo Metropolitan Area

Yoshiki YAMAGATA, Hajime SEYA and Kumiko NAKAMICHI

(National Institute for Environmental Studies Center for Global Environmental Research
16-2, Onogawa, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305-8506, Japan)

Abstract

The Tokyo Metropolitan Area is the largest urban area in the world. It is important to project the future distribution of population and land use in the area not only in terms of the urban planning, but also in terms of the mitigation and adaptation to climate change. This research studies spatially explicit high-resolution land use change scenarios in the metropolitan area with a newly developed land use model. In this study the microdistrict (*cho-cho-moku*) is used as the spatial analysis unit which allows realistic scenarios with fine spatial resolution to be constructed, whereas a traditional land use model is usually constructed at the municipality level. This study demonstrates two extreme scenarios—urban concentration (compact city) and dispersion for showing the maximum range of the future land use distribution. The projected land use distribution can be applied as the boundary condition for urban climate models, and also has a potential to provide useful information to urban practitioners. The developed scenarios provide the scenario dependent projections of parameters such as anthropogenic heat emission, vegetation cover, etc.

Key Words: Land use model, Tokyo Metropolitan Area, compact city, suburbanization, scenario analysis