

エネルギー消費と交通混雑を考慮した都市におけるピグー税と土地利用政策

広田 真由¹・土門 翔平²・河野 達仁³・松木 佑介⁴・馬奈木 俊介⁵

¹非会員 東北大学大学院情報科学研究科 博士課程前期 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: mayu.hirota.p4@dc.tohoku.ac.jp

²非会員 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

³会員 東北大学大学院情報科学研究科 教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: kono@plan.civil.tohoku.ac.jp

⁴非会員 長崎大学経済学部 准教授 (〒850-8506 長崎市片淵 4-2-1)

⁵正会員 九州大学大学院工学研究科 教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: managi.s@gmail.com

二酸化炭素の排出のうち約 3 割が住民の活動に起因しており、この排出量はエネルギー需要に基づき、エネルギー需要は都市内の人口分布に依存する。そのため、都市政策で人口分布を変化させることにより、二酸化炭素の排出量も変化させることができる。本研究では、炭素税と都市政策（混雑税や土地利用規制）が都市内の住民の活動に起因する二酸化炭素の排出量などにどのような影響を与えるかを分析する。数値シミュレーションの結果、社会厚生は、炭素税で最善策（ピグー税）シナリオ比 51%増加し、容積率規制では 48%増加した。二酸化炭素排出量は、炭素税で政策なしシナリオ比 2.2%減少し、容積率規制では 4.9%減少した。この結果は、容積率規制が次善策として十分に有効であることを示している。

Key words : CO₂ emission, carbon tax, land use regulation, FAR, UGB, congestion toll

1. はじめに

これまで地球温暖化対策として、二酸化炭素を削減するための多くの研究が行われてきた。エネルギー白書によると、排出される二酸化炭素のうち、約 3 割が都市内の活動（住宅、交通など）に起因しているため、都市政策と二酸化炭素排出量の関係に着目した研究が行われている。都市内での住民の活動は二酸化炭素を排出し、これらの住民の活動は人口密度や移動距離などの空間的な都市構造に深く関係している。土地利用規制などの都市政策は、この空間的な人口分布を変化させる。

都市政策による都市構造の変化は、エネルギー需要にも影響を与える。例えば、通勤距離や混雑の度合いは土地利用政策によって変化する。また、土地利用政策によって1世帯当たりの住宅面積も変化する。1世帯当たりの住宅面積が増加すると、照明や冷暖房の使用によるエネルギー需要が増加する。これ

らの結果として、土地利用政策は住宅や交通のエネルギー需要に影響を与える。

都市の土地利用とエネルギー需要の関係を調査した実証研究もある。環境経済学の分野では、Glaeser and Kahn (2010)は、高密度の都市では低密度の都市に比べて二酸化炭素排出量が少ないことを示した。Iwata and Managi (2014)は、土地利用規制は都市の密度を変化させて、二酸化炭素排出量を変化させることを示した。建築の分野では、Waldron et al. (2013)が、都市部のでいくつかの建物からなる建物群が移転した場合、エネルギー使用量が変化すると報告している。この変化は都市部での土地利用が部分的に変化することを示している。しかし、彼らは都市部における立地の均衡を考慮していないため、建物の移転後は均衡ではない。したがって、この研究は長期的な均衡の分析ではなく、移住や建物の変化を考慮していない短期的なものである。

Bertaud and Brueckner(2005)は都市の均衡の下で、建物の高さ規制の社会厚生費用を数値的に分析

した。また、Brueckner(2007)やKono et al. (2012)では、容積率規制とUGB規制が混雑の外部性がある都市において、次善策となり得るかを研究している。

近年、いくつかの研究が、容積率規制が都市空間の均衡を考慮した都市におけるエネルギー需要に影響を与えることを示している(Larson et al (2012); Larson and Yezer(2015))。しかし、これらは社会厚生算出に環境の外部性を考慮していない。

Borck(2016)は土地利用規制の中でも最大容積率規制のみに着目した研究を行った。彼は都市内の混雑、UGB規制及び混雑税や環境政策は考慮していない。

本研究では、都市政策(容積率規制、UGB規制、料金制度)と炭素税の環境(二酸化炭素排出量)への影響を明らかにするために、これらの政策が都市のエネルギー需要へ与える影響を数値的に分析する。また、容積率規制の次善策としての有効性を検討する。モデルは、Kono et al.(2012)が開発した、混雑のある単一中心都市の一般均衡モデルを拡張し、混雑と環境の外部性を考慮して住民の二酸化炭素排出量を計算する。

本研究のモデルでは、住民が都市内で居住する場所と住宅の面積を選択する。また、住民は室内の設定温度を選択することができ、外気温との乖離によってエネルギーを消費する。また、このモデルでは、政策がCBD内の構造を変化させないため、居住地区のみに着目した分析を行う。

2. モデル

容積率規制および都市境界規制の分析を行っているKono et al.(2012)の空間的な一般均衡モデルを拡張する。

(1) 都市の基本設定

都市は円形の単一中心の閉鎖都市である。中心には半径1のCBDが存在し、 $x=1$ から都市境界 $x=\bar{x}$ の範囲に同質な N 世帯が居住する。それぞれの位置で道路の割合 p_r や宅地の割合 p_h が与えられる。デベロッパーは不在地主から土地を借りて住宅を建設する。地点 x における単位土地面積あたりの住宅面積を $F(x)$ と表す。これは建物の高さや容積率を意味し、距離 x の連続関数である。

(2) 住民の行動

このモデルでは環境要因として住宅の冷暖房の設

定温度やエネルギー需要を導入する。

モデルを単純化するために、世帯のうち1人がCBDに通勤するとする。各世帯は都市内で1地点を選択し、居住する。住民の効用は、住宅面積 q と住宅以外の全ての財の合成財 c 、夏と冬の設定温度 t_c と t_h から設定される。

効用関数は以下のとおりである。

$$v=c+g(q)+h(t_c, t_h) \quad (1)$$

ここで、 $g(q)$ は q の関数であり、 $h(t_c, t_h)$ は冷暖房の設定温度の関数である。このモデルでは、1年を月ごとに夏と冬に分け、住民が常に冷房か暖房を使用することを想定する。

住民の効用最大化の予算制約式は以下のとおりである。

$$c+pq+\Phi(t_c, t_h, q, p_l, p_c, p_h)=y-t(x) \quad (2)$$

$$\Phi(t_c, t_h, q, p_l, p_c, p_h)=$$

$$p_l q + p_c q \sum_{m \in \text{summer}} (t_o(m) - t_c) + p_h q \sum_{m \in \text{winter}} (t_h - t_o(m)) \quad (3)$$

ただし、 $m=1, 2, \dots, 12$

$\Phi(\cdot)$ は住宅の冷暖房や照明の光熱費である。 y は世帯の年間収入、 p は1平方メートルあたりの住宅価格、 p_l は照明が1平方メートルあたりの光熱費、 p_c (p_h)は冷房(暖房)が1平方メートルを1°C下げる(上げる)ための光熱費、 $t(x)$ は地点 x に居住する世帯の通勤費用である。また、 $t_o(m) - t_c$ と $t_h - t_o(m)$ は、室温と外気温 $t_o(m)$ の温度差である。式(3)の最初の項は、照明のエネルギー消費が住宅面積の増加とともに増加することを意味し、1世帯あたりの照明の光熱費である。2番目と3番目の項は室温と外気温の差が増加するとエネルギー消費も増加し、住宅面積の増加によってもエネルギー消費が増加することを示しており、1世帯あたりの冷房と暖房の使用による光熱費を表している。

このモデルでは住民が最も快適だと感じる温度を23°Cと設定(以後 \bar{a} と表す)し、住民は予算制約下で効用を最大化するように冷暖房の設定温度を選択する。これは設定温度と \bar{a} の差が大きくなるにつれて不効用が増加すること示す。住民は外気温が \bar{a} よりも高いときに冷房を使用し、外気温が \bar{a} よりも低いときに暖房を使用する。

得られた需要関数を効用関数に代入すると、 $p(x)$ と $q(x)$ は以下のように表される。

$$p(x)=p(y-t(x), v(x)) \quad (4)$$

$$q(y-t(x), v(x)) \quad (5)$$

(3) 通勤費用

このモデルでは通勤のモードは車のみであり，居住地から，居住エリアとCBDの境目まで通勤する．通勤経路は1つしかない．通勤費用はCBDへの通勤のみから発生する．Brueckner(2007)やKono et al.(2012)などの多くの先行研究の費用関数を用いて，地点 x での1kmあたりの通勤費用は以下のように表せる．

$$T(x) = \eta + \delta \left[\frac{n(x)}{C} \right]^{\zeta} \quad (6)$$

ここで， η, δ, ζ は正のパラメータであり， $n(x)$ は地点 x の外側に居住する世帯数を表す．CBDから離れた地点に居住する通勤者はCBDに向かって移動しながら交通に加わっていくため，地点の単位通勤費用は「交通量/道路容量」の比率 $n(x)/C$ に依存する．式(6)の項 $\delta[n(x)/C]^{\zeta}$ は混雑を表現し， $n(x)$ は $n(x) = \int_x^{\bar{x}} 2\pi x \rho_h D(m) dm$ と表される．

ここで，地点 \bar{x} は都市境界である．また， $n(1) = N$ ， $n(\bar{x}) = 0$ である．地点 x で通勤者が交通に加わったとき，混雑費用の変化の結果は $\partial T(x)/\partial n(x)$ と表される．これに $n(x)$ を掛けると混雑によって引き起こされる外部性の合計を示している．

$$n(x) \frac{\partial T(x)}{\partial n(x)} = \zeta \delta \left[\frac{n(x)}{C} \right]^{\zeta} \equiv \tau_1(x) \quad (7)$$

ここで， $\tau_1(x)$ は地点 x の混雑外部性を完全に内部化する混雑税である．

さらに，地点 x の二酸化炭素排出の外部性は，地点 x の炭素税 $\tau_2(x)$ によって内部化される．

地点 x の通勤者は混雑税，炭素税を含む通勤費用 $t(x)$ を支払う．

$$t(x) = \int_1^x [T(m) + \tau_1(m) + \tau_2(m)] dm \quad (8)$$

混雑税と炭素税がないとき，式(8)の τ_1, τ_2 を0に設定する．

(4) デベロッパーの行動

a) 容積率規制なし

デベロッパーは完全競争でプライステイカーとする．彼らは，住宅資本(または建設のための材料)と住宅を生産する土地を兼ね備えている．単位面積当たりの住宅の生産量(住宅生産関数)は $F(S)$ と表され， S は土地資本比率である． $F(S)$ の逆関数 S を用いて，都市の総住宅面積からのデベロッパーの利

潤関数は以下のとおりである．

$$\Pi = \int_1^{\bar{x}} 2\pi x \rho_h [F(x)p(x) - S(F(x)) - r(x)] dx \quad (9)$$

$r(x)$ は地価である．容積率規制下で，デベロッパーは $F(x)$ に関する単位土地面積当たりの利潤を最大化する．一階の条件式は以下の通りである．

$$p(x) - \partial S / \partial F = 0 \quad (10)$$

また， $F(x)$ と $S(F)$ は以下の通りである．

$$F(x) = F(y - t(x), v(x)) \quad (11)$$

$$S(F(x)) = S(y - t(x), v(x)) \quad (12)$$

この式を利潤関数(式(9))に代入して，デベロッパーは完全競争であるため都市内の全地点で利潤は0という条件を考慮すると，地価は以下のように表される．

$$r(x) = r(y - t(x), v(x)) \quad (13)$$

最後に，人口密度は単位土地面積当たりの住宅面積を1世帯当たりの住宅面積で割ったものと等しい．

$$D(x) = \frac{F(S(x))}{q(x)} \quad (14)$$

b) 容積率規制あり

容積率規制の下では，住宅の供給が外生的に設定されるため，デベロッパーは F に関する利益を最大化できない．デベロッパーの純利益は式(9)で表され，全地点で利潤が0という条件を用いると，地価 $r(x)$ は以下の式で表される．

$$r(x) = F(x)p(x) - S(F(x)) \quad (15)$$

(5) 市場清算条件

市場清算条件は以下の式(16)～(19)で表される．

$$\int_1^{\bar{x}} 2\pi x \rho_h D(y - t(x), v(x)) dx = N \quad (16)$$

$$v(x) = u, \quad \forall x \in [1, \bar{x}] \quad (17)$$

$$F(x) = D(x)q(x), \quad \forall x \in [1, \bar{x}] \quad (18)$$

$$r(y - t(\bar{x}), u) \Big|_{\text{NoUGB}} = r_a \quad (19)$$

式(16)は，総人口 N が外生的に与えられ，固定されていることを示している．式(17)はすべての地点の住民の効用は等しく，内生的に決定することを示す．式(18)はある地点のデベロッパーの住宅供給は住民が消費する住宅面積に等しいことを示している．最後に，式(19)は都市境界での地価は農地の地代 r_a と等しいことを示す．UGB規制がかけられるとき， \bar{x} は外生的に決定され，このとき，式(19)は成り立たない．

(6) 社会厚生関数

社会厚生関数は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 W = Nu + \int_1^{\bar{x}} 2\pi x \rho_h [r(x) - r_a] dx \\
 + \int_1^{\bar{x}} n(x) \{ \tau_1(x) + \tau_2(x) \} dx \\
 - 2000 \int_1^{\bar{x}} n(x) \{ E^c(x) + E^r(x) \} dx
 \end{aligned} \tag{20}$$

3. モデルキャリブレーション

(1) パラメータの設定

この分析では、パラメータは実際のデータに従って設定する。都市内の世帯数 N は 500,000 に設定する。道路用地の割合 ρ_r は計量計画研究所 (IBS) のデータから、0.2 とする。住宅用地の割合 ρ_h は CBD の淵で 0.8/12, 都市境界で 0.5/12 とする。

1 世帯当たりの収入 y は仙台市のデータから 4,045,779 円/年とした。通勤時間の時間価値は賃金率の 1/2 とした (Small and Verhoef(2007))。賃金率 w は平均収入を平均勤務時間で割ったものである。通勤費用関数 (式(6)) の切片 η は、渋滞がない場合の 1km あたりの通勤費用を表す。1 世帯当たりの年間基本通勤費用 η は 25,586 円である。

農地地代 r_a は、日本不動産研究所のデータと予備シミュレーションから、321,966,000 円/km²とした。式(36)のパラメータ ν および θ は「日本の都市再開発」vol.1-7 を用いてキャリブレーションし、0.75 および 0.28 に設定した。

都市のリングの幅 ε は 0.1 に設定した。仙台市の月ごとの平均気温のデータは気象庁のデータを使用した。混雑のパラメータは $\zeta = 2.82$, $\delta = 12,281(0.48)$ と設定した (土木学会)。また、道路容量 C は政策なしの均衡状態での混雑状態に近くなるように、 $C = 700,000$ と設定した。

二酸化炭素の外部性を計算するために用いる二酸化炭素排出の外部費用は、炭素税を導入しているヨーロッパの国々のおおよその平均をとり、6000 円/tCO₂ とした。

(2) 二酸化炭素排出量の計算方法

本研究では二酸化炭素は通勤と住宅から排出される。通勤、居住からの二酸化炭素排出量はそれぞれ以下のように定義した。

$$E^c(x) = 0.11x \tag{21}$$

$$E^r(x) = q(x) \left\{ \begin{aligned} &\delta_l + \delta_c \sum_{m \in \text{summer}} (t_o(m) - t_c) \\ &+ \delta_h \sum_{m \in \text{winter}} (t_h - t_o(m)) \end{aligned} \right\} \tag{22}$$

通勤の排出量は、CBD までの距離 x に、通勤日数 231 日の往復分 2 トリップを掛けて年間走行距離を求め、それを平均燃費 9.4 km/l で割ると、年間の燃料消費量が得られる。さらに、これに燃料からの二酸化炭素排出量 0.00232tCO₂/l を掛け合わせることに、年間の通勤からの排出量

$$E^c = \frac{231(\text{日}) \times 2(\text{トリップ}) \times x(\text{km})}{9.4(\text{km/l})} \times 0.00232(\text{tCO}_2/\text{l}) = 0.11x$$

が求められる。

住宅では、電力使用 (照明と冷房) の換算係数として 0.16tCO₂/GJ を使用する (電気事業者連合会)。暖房は電気、都市ガス, LPG, 灯油などの様々な燃料が使用される。暖房の換算係数にはこれらの加重平均 (電気 16%, 都市ガス 5%, LPG 0.6%, 灯油 78% (外岡ら(2005))) の 8.1×10⁻²tCO₂/GJ を用いる。

(3) p_c, p_h, p_l のキャリブレーション

式(3)の第 1 項は照明, 第 2 項は冷房, 第 3 項は暖房の光熱費である。外岡ら(2005)は日本の都道府県別住宅タイプ別のエネルギー需要を推計し、二酸化炭素排出量を分析した。住宅におけるエネルギー使用のうち、暖房, 冷房, 照明によるエネルギー消費は、住宅面積の増加や減少にもなって変化する可能性がある。そこで、暖房, 冷房, 照明のエネルギー消費に注目し、以下のようにキャリブレーションする。

まず、燃料 (電気, 都市ガス, LPG, 灯油) によるエネルギー消費量のデータの中で、暖房と冷房に使用されるエネルギーの割合を計算する。次に、家計調査から、冷暖房費 (電気, 都市ガス, LPG, 灯油など) を得る。そして、光熱費に、総エネルギー消費における暖房と冷房の割合を掛ける。最後に、キャリブレーションのために式(3)の冷暖房の設定温度に適切な値を外生的に与えた。

ここで得られた p_c, p_h, p_l の値は、231, 95, 230 である。

(4) α, β, γ のキャリブレーション

式(25)と一階の条件式から、土地総合情報システムから得られた、単位面積当たりの住宅価格 p と 1 世帯当たりの住宅面積 q のデータを使用して、効用関数のパラメータ α, β, γ を設定する。ここで用いられる外気温 $t_o(m)$ は外生的に与えられるパラメ

ータである。キャリブレーションの結果、 α 、 β 、 γ はそれぞれ 116.9、28866.5、12846.5 とした。設定温度 t_c はパラメータ λ 、 p_c 、 \bar{a} と式(28)から与えられる。

(5) θ 、 ν の推定

敷地面積、総床面積、建設費については、「日本の都市再開発」vol.1-7 のデータを用いてキャリブレーションを行う。しかし、データには多数の商業ビルが含まれているため、正確に推定するためにはすべてのデータは使用できない。したがって、容積率が 500%以下のマンションのデータから住宅生産関数のパラメータを推定した。

しかし、求めたパラメータは条件を満たさなかったため、本研究では、制御変数として築年数を導入し、さらに、一人世帯用住居のデータのみを用いた。

キャリブレーションの結果、 $\theta=0.28$ 、 $\nu=0.75$ が得られた。

4. 数値シミュレーション

(1) 設定

CBD の淵を $i=1$ として、都市のリングを i と名付ける。リング i の内側の半径は $x_i = 1 + \varepsilon[i-1]$ である。 x_i はリングの都市の中心からの距離の変数である。また、効用関数と住宅生産関数は以下のように表現する。

$$v(c, q, t_c, t_h) = c - \alpha q^2 + \beta q - \frac{\gamma}{2} \left\{ \sum_{m \in \text{summer}} (\bar{a} - t_c)^2 + \sum_{m \in \text{winter}} (\bar{a} - t_h)^2 \right\} \quad (23)$$

$$F(S) = \theta S^\nu \quad (24)$$

α 、 β 、 γ 、 ν 、 θ は正のパラメータで、 $0 < \theta < 1$ である。 α と β は均衡状態で決定し、都市内のすべての地点で $0 < q < \beta/2\alpha$ が成立する。

(2) シミュレーション結果

本研究では 6 つの均衡のシナリオを用意し、シミュレーションを行った。(i)政策なし、(ii)混雑税を導入、(iii)炭素税を導入、(iv)混雑税と炭素税を導入(最善策)、(v)二酸化炭素排出量が 3.8%削減(日本の 2020 年までの削減目標)される炭素税額を導入(このモデルでは 1.8 倍の炭素税を導入)、(vi)容積率規制(中心部(～1.9km)で 16%上昇; 郊外で 8%減少)を導入、の 6 シナリオである。これらの政策の

都市環境への影響を明らかにし、都市政策が都市のエネルギー構造に与える影響を明らかにすることが目標である。シミュレーション結果は、図 1 および表 1、2 のとおりである。

表 1 から社会厚生は、(iv)を除いて(ii)が最も大きく、(i)から(iv)の上昇分を基準として、88.2%上昇した。次いで(v)が大きく、69.6%上昇した。(vi)の容積率規制のシナリオでも最善策の 47.9%の上昇がみられ、最善策の代替策としての一定の有効性を示した。

都市の半径は各政策により減少し、(iv)-(vi)で最も小さい 9.6 km となった。

表 2 は、二酸化炭素排出量の計算結果である。排出量の合計を見ると、(iv)が最も少なく、(i)から 5.2%減少した。次いで(vi)が少なく、(i)から 4.9%減少した。容積率規制によっても、最善策に近い二酸化炭素排出の削減がみられ、環境への影響の面からみても、容積率規制は代替策として有効であるといえる。

排出量の内訳をみると、いずれの政策も通勤による排出量のほうが減少幅が大きい。特に(ii)では、通勤の減少率が住宅に比べて 4 倍近く大きくなった。これは、混雑税によって CBD の近くに居住する住民が増え、都市全体の通勤距離の合計が短くなったためである。一方、(vi)は通勤による排出量のほうが住宅よりも削減幅が大きいものの、住宅からの排出量の削減幅が 6 つのシナリオの中で最も大きい。これは、容積率規制が 1 世帯当たりの住宅面積に直接影響を与え、都市の住宅の総面積が小さくなったためである。

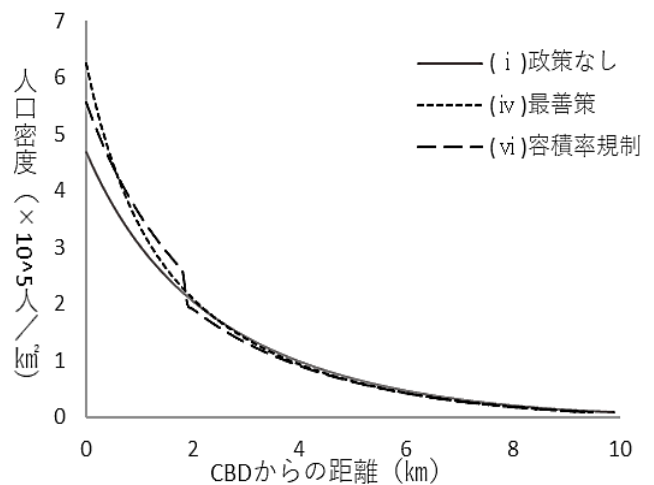


図 1 : 人口密度

表 1 : シミュレーション結果

政策	社会厚生 ($\times 10^{12}$ 円)	(iv)を 100%とした ときの上昇率	住民の効用 ($\times 10^6$ 円)	都市の半径 (km)
(i)政策なし	2.10567	-	4.158	10
(ii)混雑税	2.10587	88.2%	4.142	9.8
(iii)炭素税	2.10578	50.6%	4.153	9.7
(iv)混雑税 + 炭素税	2.10589	100.0%	4.137	9.6
(v)炭素税 1.8 倍	2.10582	69.6%	4.149	9.6
(vi)容積率規制(中心部(~1.9km)で 16%上昇; 郊外で 8%減少)	2.10578	47.9%	4.154	9.6

表 2 : シミュレーション結果 (二酸化炭素排出量)

政策	排出量合計 (tCO ₂)	(i)との 差	排出量の内訳			
			通勤 (tCO ₂)	(i)との 差	住宅 (tCO ₂)	(i)との 差
(i)政策なし	430328	-	197488	-	232840	-
(ii)混雑税	417305	-3.1%	187764	-5.2%	229541	-1.4%
(iii)炭素税	420905	-2.2%	191252	-3.3%	229653	-1.4%
(iv)混雑税 + 炭素税	409109	-5.2%	182531	-8.2%	226578	-2.8%
(v)炭素税 1.8 倍	414653	-3.8%	187261	-5.5%	227392	-2.4%
(vi)容積率規制(中心部 (~1.9km)で 16%上昇; 郊外で 8%減少)	410055	-4.9%	183910	-7.4%	226145	-3.0%

5. 結論

本研究では、都市部の二酸化炭素排出量に対する炭素税と土地利用政策(混雑料金制度, 容積率規制)の有効性についてシミュレーションを行った。導入の難しい混雑料金制度の次善策として、容積率規制の有効性を示した。また、本研究は、冷暖房の設定温度を内生変数として組み込んで環境への影響を分析した初めての論文である。

その結果から、各政策によって、都市構造や二酸化炭素排出量に与える影響が異なることを示した。

特に、最善策の代替策としての容積率規制の有効性を、社会厚生の上昇からも、二酸化炭素排出量の削減からも示すことができた。

この研究は以下の点においてさらに発展の余地が

ある。まず、最適な容積率規制の方法を検討する必要がある。本研究では、一定の範囲の中から最適な規制のレベルを選択した。また、都市モデルをより実際の都市に近づけることも必要である。Kono and Joshi(2018)では、CBDからの距離に応じて建物がマンションと一戸建て住宅に分けられていて、CBD内のオフィスビルも容積率規制の対象としている。さらに、効用関数のパラメータの感度分析を行うことも必要である。

本研究の最終的な目的は、気候の違う都市を取り扱い、社会厚生を最大化する政策の組み合わせを提言することである。本モデルで政策を考案することで、都市ごとに最適な政策の組み合わせを提言することができる。

付録

(1) ラグランジアンの一階条件

効用最大化問題のラグランジアンと一階条件は以下の通りである。

$$L = c - \alpha q^2 + \beta q - \frac{\gamma}{2} \left\{ \sum_{m \in \text{summer}} (\bar{a} - t_c)^2 + \sum_{m \in \text{winter}} (\bar{a} - t_h)^2 \right\} + \lambda \left\{ y - t(x) - c - q \left[\begin{array}{l} p + p_l + p_c \sum_{m \in \text{summer}} (t_o(m) - t_c) \\ + p_h \sum_{m \in \text{winter}} (t_h - t_o(m)) \end{array} \right] \right\} \quad (25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial c} = 1 - \lambda = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} = -2\alpha q + \beta - \lambda \left[\begin{array}{l} p + p_l + p_c \sum_{m \in \text{summer}} (t_o(m) - t_c) \\ + p_h \sum_{m \in \text{winter}} (t_h - t_o(m)) \end{array} \right] = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_c} = -\frac{\gamma}{2} \{ 2(\bar{a} - t_c) \cdot (-1) \} - p_c q \lambda \cdot (-1) = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_h} = -\frac{\gamma}{2} \{ 2(\bar{a} - t_h) \cdot (-1) \} - p_h q \lambda = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = y - t(x) - c - q \left[\begin{array}{l} p + p_l + p_c \sum_{m \in \text{summer}} (t_o(m) - t_c) \\ + p_h \sum_{m \in \text{winter}} (t_h - t_o(m)) \end{array} \right] = 0 \quad (30)$$

(2) シミュレーションの詳細設定

各関数は以下のように書き換えられる。

単位面積あたりの住宅価格

$$p_i = \sqrt{\kappa_i} \left(\frac{\mu_1}{\gamma} - 2\alpha \right) + \beta - \mu_2 \quad (31)$$

1世帯当たりの住宅面積

$$q_i = \sqrt{\kappa_i} \quad (32)$$

土地資本比率

$$S_i = \left\{ \nu \theta \left[\sqrt{\kappa_i} \left(\frac{\mu_1}{\gamma} - 2\alpha \right) + \beta - \mu_2 \right] \right\}^{\frac{1}{1-\nu}} \quad (33)$$

単位面積あたりの地価

$$r_i = \left(\frac{1-\nu}{\nu} \right) \left\{ \nu \theta \left[\sqrt{\kappa_i} \left(\frac{\mu_1}{\gamma} - 2\alpha \right) + \beta - \mu_2 \right] \right\}^{\frac{1}{1-\nu}} \quad (34)$$

人口密度

$$D_i = \frac{F_i}{q_i} = \frac{\left\{ \nu \left[\sqrt{\kappa_i} \left(\frac{\mu_1}{\gamma} - 2\alpha \right) + \beta - \mu_2 \right] \right\}^{\frac{\nu}{1-\nu}} \theta^{\frac{1}{1-\nu}}}{\sqrt{\kappa_i}} \quad (35)$$

単位土地面積あたりの住宅面積

$$F_i = \left\{ \nu \left[\sqrt{\kappa_i} \left(\frac{\mu_1}{\gamma} - 2\alpha \right) + \beta - \mu_2 \right] \right\}^{\frac{\nu}{1-\nu}} \theta^{\frac{1}{1-\nu}} \quad (36)$$

冷房の設定温度

$$t_{ci} = \bar{a} + \frac{p_c}{\gamma} \sqrt{\kappa_i} \quad (37)$$

暖房の設定温度

$$t_{hi} = \bar{a} - \frac{p_h}{\gamma} \sqrt{\kappa_i} \quad (38)$$

通勤による二酸化炭素の排出量

$$E_i^c = 0.11i\varepsilon \quad (39)$$

住宅からの二酸化炭素排出量

$$E_i^r = \sqrt{\kappa_i} \left\{ \begin{array}{l} \delta_i + \delta_c \sum_{m \in \text{summer}} (t_o(m) - t_c) \\ + \delta_h \sum_{m \in \text{winter}} (t_h - t_o(m)) \end{array} \right\} \quad (40)$$

ここで使用した各パラメータは以下の通りである。

$$\kappa_i = \frac{2\gamma}{2\alpha\gamma - \mu_1} (u - y + t_i),$$

$$\mu_1 = p_c^2 C_{summer} + p_h^2 C_{winter},$$

$$\mu_2 = p_l + p_c \sum_{m \in \text{summer}} (t_o(m) - \bar{a}) + p_h \sum_{m \in \text{winter}} (\bar{a} - t_o(m)),$$

$$\mu_3 = p_c C_{summer} + p_h C_{winter}$$

C_{summer} と C_{winter} はそれぞれ夏と冬の月数である。

参考文献

- 1) Edward L. Glaeser, Matthew E. Kahn, 2010. The greenness of cities: Carbon dioxide and urban development. *Journal of Urban Economics* 67, 404-418
- 2) Iwata, K., and S. Managi, 2014. Can Urban Planning Instruments Solve Externalities? Empirical Analysis of Regulations and Taxes, discussion paper
- 3) Waldron, D., J.P. John, S. C. Lannon, T. Bassett and H. M. Iorwerth, Heledd Mair, 2013. Embodied energy and operational energy: Case studies comparing different urban layouts Presented at: Building Simulation 2013 (BS2013): 13th International Conference of the International

- Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 25-28 August 2013.
- 4) Bertaud, A., Brueckner, J.K., 2005. Analyzing building-height restrictions: predicted Impacts and welfare costs, *Regional Science and Urban Economics* 35, 109–125.
 - 5) Brueckner, J.K., 2007. Urban growth boundaries: an effective second-best remedy for unpriced traffic congestion? *Journal of Housing Economics* 16, 263–273.
 - 6) Kono, T., K. K. Joshi, T. Kato and T.Yokoi, 2012. Optimal regulation on building size and city boundary: An effective second-best remedy for traffic congestion externality, *Regional Science and Urban Economics* 42, 619-630.
 - 7) Larson, W., F. Liu, and A. Yezer, 2012. Energy footprint of the city: Effects of urban land use and transportation policies, *Journal of Urban Economics* 72,147-159.
 - 8) William Larson, Anthony Yezer, 2015. The energy implications of city size and density, *Journal of Urban Economics* 90, 35-49
 - 9) Borck, R., 2014. Will Skyscrapers Save the Planet? Building Height Limits and Urban Greenhouse Gas Emissions, *Regional Science and Urban Economics* 58, 13-25.
 - 10) Small, K.A. and Verhoef, E.T, 2007. The Economics of Urban Transportation, Routledge, Adingdon.
 - 11) 外岡豊, 深澤大樹, 村橋喜満, 三浦秀一, 2005, 都道府県別・建て方別住宅エネルギー消費量とCO₂排出実態の詳細推計, 日本建築学会環境系論文集, 70 巻, 592 号, 89-96.
 - 12) Kono, T., K. K. Joshi, 2018. Spatial externalities and land use regulation: an integrated set of multiple density regulations, *Journal of Economic Geography* 18, 571-598
 - 13) 資源エネルギー庁, 「エネルギー白書 2017」
 - 14) 全国市街地再開発協会, 「日本の都市再開発—市街地再 開発事業の全記録—」, Vol.1-7, 1981-2011.
 - 15) 土木学会, 2003, 「道路交通需要予測の理論の適用」
 - 16) 気象庁, 「過去の気象データ」, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s1.php?prec_no=34&block_no=47590&year=2016&month=&day=&view=a2, (最終アクセス 2018/7/25)
 - 17) 総務省統計局, 2012, 「家計調査」
 - 18) 一般財団法人 日本不動産研究所, 「田畑価格及び賃借料調」
 - 19) 環境省, 「諸外国における炭素税等の導入状況」, https://www.env.go.jp/policy/tax/misc_jokyo/attach/intro_situation.pdf, (最終アクセス 2018/7/25)
- (2018. 7. ? 受付)

Pigovian tax and urban land use policy in consideration of energy consumption and traffic congestion

Mayu HIROTA, Syohei DOMON, Tatsuhiro KONO, Yusuke MATSUKI and Syunsuke MANAGI

GHG emissions in densely urban areas are so large that it is important for us to reduce them on urban scale. About 30% of CO₂ emissions are caused by residents' activities. This energy demand depends on population distribution within the city. By changing the population distribution through carbon tax and urban policies (congestion toll and land use regulation), it is possible to change CO₂ emission. This study analyzes how carbon tax and urban policies influence CO₂ emissions caused by residents' activities in cities. This paper numerically examines the effectiveness of the carbon tax and land use policy (i.e. congestion toll regime, FAR regulation) on urban structure and urban CO₂ emission. In carbon tax scenario, social welfare increases by 51% compared to the first-best scenario, and the amount of total CO₂ emission is 2.2% smaller than that of baseline. In FAR regulation scenario, social welfare increases by 48% compared to the first-best scenario, and the amount of total CO₂ emission is the second smallest, which is 4.9% smaller than that of baseline. This result suggests that FAR regulation is sufficiently effective as a second-best policy.