

# コンパクトシティ化プロセスにおける 世代間のトレードオフ構造

磯野 昂士<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生非会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 S-502)

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

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所(〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 S-502)

E-mail:mokmr@m.tohoku.ac.jp

持続可能な都市の実現に向けて、都市機能を少数の地区に集約するコンパクトシティ施策が多く都市で採用されている。しかし、コンパクトシティを実現することの有効性は多く分析されているものの、コンパクトシティを実現する時期や場所をめぐって、世代間の負担しなければならないコストの間にトレードオフが存在するかどうかは明確ではない。そこで本研究では、ある世代の住民が都市で生活する上で負担すべき費用を目的関数とする長期的な都市構造を求める数理計画モデルを作成し、コンパクトシティ施策における世代間の負担すべき費用のトレードオフの有無とその要因を明らかにする。

**Key Words :** compact city, generation, urban service, optimal location

## 1. コンパクトシティ政策の効果に関する既存研究

2006年に社会資本整備審議会から都市機能を集約する都市構造改革の重要性が答申されて以来<sup>1)</sup>、コンパクトシティの実現に向けての政策の検討が進み、2014年の都市再生特別措置法の一部改正によって「コンパクトシティ・プラス・ネットワーク」の実現を目指す立地適正化計画制度が設けられた。2016年度末において309都市が立地適正化計画に関する具体的な取り組みを行い、うち100都市が計画を作成・公表している。

上記の社会資本審議会の答申<sup>2)</sup>では、都市機能が無秩序に薄く拡散することの問題点として、1)インフラや公共的サービスの提供効率の低下と都市経営コストの増大、2)都市集積が持っていた交流、賑わい、文化などの社会的効果の消失、3)自動車利用の加速によるエネルギー効率の低下、4)新規開発による自然環境、優良農地の蚕食、5)空洞化市街地のコミュニティ維持の困難化を指摘している。

一方、都市計画の研究者も様々な目的を取り上げ、都市機能を少数の地域に集約するコンパクトシティ政策の有効性を分析してきたが、そこでは将来の達成すべき都市構造を論じており、その実現に長期間を要する中で異なる世代がその計画の進捗を支持するのかが議論されていない。本研究では、都市において複数の世代が生活し、

同じ都市構造であっても異なる生活パターンで活動を行うため、得られる利便性が異なることに着目する。さらに、自分の世代に合うように住居や施設を建設するには一定の費用を負担せねばならないが、それらが別の世代も利用できるという点で相互作用が生じる。そのため各世代が生活および住居・施設の建設に負担しなければならないコストの間には、複雑なトレードオフが発生すると考えられる。すなわち、このような状況下では、「ある世代にとって望ましい都市構造が、他の世代にとっても望ましいのか？」は明確ではない。そのために異なる世代の人々が同じ「コンパクトシティ化」という言葉を用いながらも結果的に同時に双方の目的を満足しえない都市構造が形成され不満が残ってしまう危険性がある。

そこで本研究では、ある世代の住民が都市構造を共有し、そこで生活するために負担すべき費用を目的関数とする長期的な人口・施設配分と交通パターンといった都市構造の決定問題を定式化する。その上で、人々を二つの世代の集合に分け、一方の負担する費用を最小化することが他方の負担する費用の実現しうる範囲に影響を与えるかどうかを確認する。

## 2. 都市構造最適化モデルの設定

(1) 最適化モデルの目的

ここでは、最適化モデルを用いて、ある世代の負担する費用の最小化を目的として取り上げた場合に、どのような形の都市構造が出現するかを推測し、それが別の世代が負担すべき費用の実現しうる範囲に影響を与えるかを確認することを目的とする。求まった都市構造を具体的な都市において実現することは目的とはしていない。

本モデルの目的関数として、都市内の各世代の人口が地区に居住する際に必要な費用をとりあげる。時間を経るにつれて都市構造がどのように変化するかを確かめるため、一定期間(以下では 25 年ごと)に分割した多時点の費用を考え、これを最小化する長期間の都市機能の配置を計算する。

都市機能の配置を考える上で、都市を複数の地区に分割して捉える。各地区内には病院や学校などの施設が種類ごとに最大一つ設置でき、地区間を移動できるようにバスなどの公共交通を設定できるとする。各地区内に存在する住居の量が、その地区に居住できる人口の上限を与える。住民は、ある頻度で施設に通い活動を行うが、公共交通あるいは自家用車によって地区間を移動すれば、住居と異なる地区の施設も利用できる。ただし、住民の年齢階層に応じて一定の割合で自家用車を運転できない交通弱者が含まれるものとする。

一時期の間はこれらの施設・公共交通・住居と居住・活動の場所は固定されるが、次の時期に移る際に、住民は次の年齢階層に移動するとともに、人口は出生・死亡・転居により変化する。住居も次の築年数階層へ移動するとともに、建設による住居の新設が起こりうる。さらに施設・公共交通にも新設・維持・廃止がありうる。これらの転居、新設には一定の費用が発生し、その時の複数の世代が負担する必要がある。したがって、同じ施設や住居を長期にわたり活用するとすれば、先行する世代は我慢して将来世代の費用に重点を置くのか、あるいは人口規模が大きい先行する世代の費用を重視するのかという方針によって、望ましい都市構造は違ったものとなる可能性がある。

(2) 変数の定義

まず、時期を  $t \in T$ 、年齢階層を  $e \in E$ 、地区を  $ij \in I$ 、活動の種類を  $a \in A$ 、公共交通の路線番号を  $l \in L$ 、交通手段を  $m \in M = \{1: \text{自家用車}, 2: \text{公共交通}\}$ 、築年数階層を  $f \in F$  でそれぞれ表し、これらの集合の要素数を  $n(F)$  などと表す。

内生変数として、 $t$  期の年齢階層  $e$  交通能力  $\phi$  別の地区人口を  $p_{i\phi a}$ 、 $t$  期末の年齢階層  $e$  交通能力  $\phi$  別転居人口を  $x_{ij\phi a}$ 、 $t$  期の活動別施設の有無を  $y_{ja} = \{0,1\}$ 、 $t$  期の公共交通  $l$  の有無を  $w_l = \{0,1\}$ 、 $t$  期末の施設建設の有無を

$\hat{y}_{jat} = \{0,1\}$ 、公共交通の施設建設の有無を  $\hat{w}_{lt} = \{0,1\}$  と表し、 $t$  期に交通手段  $m$  を用い地区間を移動して施設で活動を行う年齢階層別人数を  $r_{ijeam}$  と表し、このために  $i, j$  間を移動する交通機関  $m$  別のフローを  $\rho_{ij\bar{j}eam}$  と表す。地区  $t$  の各地区の築年数階層別住居ストックを  $q_{ijt}$  と表し、これは新たに建設する  $h_{it}$  によってのみ増加すると仮定する。地区の交通条件を表す属性を  $z_{it} = \{0,1\}$  と表す。

そして、外生変数として、施設の種別別固定費用を  $IFC_a$ 、施設の種別別単位変動費用を  $IVC_a$ 、地区間自家用車移動一般化費用を  $GCC$ 、公共交通のリンク別固定費用を  $TFC$ 、公共交通のリンク別単位変動費用を  $TVC$ 、公共交通の利用リンク別一般化費用を  $GCT$ 、公共交通利用リンクと路線の対応を  $\delta_{ijl}$ 、時期・年齢階層と世代の対応を  $\bar{\delta}_{ieg}$ 、地区間転居費用を  $MC_{ij}$ 、住居単位建設費を  $HCC$ 、施設建設費を  $ICC$ 、公共交通建設費を  $TCC$  と表す。

(3) 目的関数

本モデルでは都市内におけるある世代の住民の生活に伴う各種の費用の総和  $G_g$  を目的関数として用いる。以下、費用を構成する項目ごとに定式化してゆく。

$$U_{et} = \sum_{j \in Z} \sum_{a \in A} \left( \frac{IFC_a}{n(E)} y_{jat} + IVC_a \sum_{i \in Z} \sum_{m \in M} r_{ijeam} \right) \quad (1)$$

$$W_{et} = \sum_{a \in A} \left\{ W_{1et} + \sum_{l \in L} (W_{2et} + W_{3et}) \right\} \quad (2)$$

$$W_{1et} = \sum_{a \in A} \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z, j \neq i} \rho_{ij\bar{j}ea, m=1, t} T^{car}$$

$$W_{2et} = \sum_{l \in L} \frac{TFC}{n(E)} w_{lt}$$

$$W_{3et} = (TVC + T_{tm}) \times \sum_{a \in A} \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z, j \neq i} \rho_{ij\bar{j}ea, m=2, t}$$

$$C_{et} = \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} MC_{ij} \cdot x_{ijet} \quad (3)$$

$$H_{et} = \frac{\sum_{i \in Z} HC \cdot h_{it} + \sum_{j \in Z} \sum_{a \in A} IC \cdot \hat{y}_{jat} + \sum_{l \in L} TC \cdot \hat{w}_{lt}}{n(E)} \quad (4)$$

$$G_g = \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \bar{\delta}_{ieg} \cdot (U_{et} + W_{et} + C_{et} + H_{et}) \quad (5)$$

式(1)は施設に関する費用、式(2)は移動に関する費用、式(3)は転居に関する費用、式(4)は建設に関する費用である。これらを該当する世代ごとに足し合わせた式(5)が、目的関数である。

(4) 制約条件

目的関数の最小化において、以下のような制約条件を考える。

$$\sum_{j \in Z} x_{ijet} - D_e p_{iet} = 0 \quad \forall i \in Z, t \in T, e \in E \quad (6)$$

$$p_{i,e+1,t} - \sum_{j \in Z} x_{ijet} = 0 \quad (7)$$

$$\forall i \in Z, t \in \{T | t \neq 0\}, e \in \{E | e \neq n(E)\}$$

$$p_{i,e+1,t} = B \times p_{i,e=2,t} \quad \forall i \in Z, t \in T \quad (8)$$

式(6)は、居住に関する制約条件である。式(7)で人口と転居人数の関係を表し、式(8)で年齢階層 1 の人口を計算する。

$$s_{iea0} + s_{iean} = p_{i,1,t} \times F_{ae} \quad \forall i \in I, e \in E, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j \in I} r_{ijea,0,t} = s_{iea0} \quad \forall i \in I, e \in E, a \in A, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{j \in I} r_{ijea,1,t} = s_{iean} + p_{i,0,t} \times F_{ae} \quad (11)$$

$$\forall i, j \in I, e \in E, a \in A, t \in T$$

$$NI_a y_{jat} \leq \sum_{i \in Z} \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} r_{ijeamt} \leq MI_a y_{jat} \quad (12)$$

$$\forall j \in Z, a \in A, t \in T$$

$$NTw_{lt} \leq \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} \sum_{\bar{i} \in Z} \sum_{\bar{j} \in Z} \sum_{e \in E} \sum_{a \in A} \rho_{ij\bar{i}\bar{j}ea,m=2,t} \delta_{ijl} \leq MT_a w_{lt} \quad (13)$$

$$\forall l \in L, t \in T$$

$$\sum_{j \in Z} \rho_{iii,\bar{j},eamt} = r_{ieamt} \quad (14)$$

$$\forall i \in Z, a \in A, t \in T, e \in E, m \in M$$

$$\sum_{\substack{j \in Z \\ i \neq j}} \rho_{iji,\bar{j},eamt} = r_{ijeamt} \quad (15)$$

$$\forall i \in Z, j \in \{Z | i \neq j\}, a \in A, t \in T, e \in E, m \in M$$

$$\sum_{\bar{i} \in Z} \rho_{ij\bar{i}eamt} = \sum_{\bar{j} \in Z} \rho_{ij\bar{j}eamt} \quad (16)$$

$$\forall i, j \in Z, n \in \{Z | n \neq i, j\}, a \in A, e \in E, m \in M, t \in T$$

$$\sum_{\bar{i} \in Z} \rho_{ii,\bar{i},ieamt} = r_{ieamt} \quad (17)$$

$$\forall i \in Z, a \in A, t \in T, e \in E, m \in M$$

$$\sum_{\substack{\bar{i} \in Z \\ \bar{i} \neq i}} \rho_{ij\bar{i},\bar{j},eamt} = r_{ijeamt} \quad (18)$$

$$\forall i \in Z, j \in \{Z | i \neq j\}, a \in A, t \in T, e \in E, m \in M$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} \sum_{e \in E} \sum_{a \in A} \rho_{ij\bar{i}\bar{j}eamt} \leq \begin{cases} bigM \times \delta_{ijl} & \text{if } m=1 \\ MT \times n(T) \times \delta_{ijl} & \text{if } m=2 \end{cases} \quad (19)$$

$$\forall \bar{i}, \bar{j} \in Z, l \in L$$

$$CMAX + NI_a (1 - z_{jt}) \geq \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{\bar{i} \in I} \sum_{\bar{j} \in I} \sum_{a \in A} \sum_{e \in E} \rho_{ij\bar{i}\bar{j}ea,0,t} \quad (20)$$

$$\forall \bar{j} \in I, t \in T$$

式(9)-(20)は、住民の活動に関する制約条件である。式(9)(10)(11)で人口と交通モード別の活動者数の関係を表し、式(12)(13)で施設および公共交通の利用者数とサービスの有無・容量との関係を表している。式(14)-(19)は、活動者数と交通フローとの関係を表している。式(20)は、地区属性と自動車による来訪者数との関係を表している。

$$q_{i,f+1,t} = q_{ift} \quad \forall i \in Z, f \in \{F | f \neq n(F)\}, t \in T \quad (21)$$

$$q_{i,f=t} = h_{it} \quad \forall i \in Z, t \in T \quad (22)$$

$$\sum_{e \in E} p_{iet} \eta_e - \sum_{f \in F} q_{ift} \leq 0 \quad \forall i \in Z, t \in T \quad (23)$$

$$y_{ja,t+1} - y_{jat} - \hat{y}_{jat} \leq 0 \quad (24)$$

$$\forall j \in Z, a \in A, t \in \{T | t \neq n(T)\}$$

$$w_{l,t+1} - w_{lt} - \hat{w}_{lt} \leq 0 \quad \forall l \in L, t \in \{T | t \neq n(T)\} \quad (25)$$

式(21)-(23)は、住居ストックと建設に関する制約条件である。式(23)は住居ストックと地区内世帯数の関係を表し、式(24)(25)は施設および公共交通の建設の有無を表す。

以上の式(1)～(25)はすべて線形式であり、本モデルは(0-1)変数を含んだ混合整数線形計画法のモデルとして定式化されている。一般に市販され、学術目的には無償で利用できる数理計画法パッケージソフトの多くは、この問題を計算することが可能である。本研究では Windows10 上の Gurobi Optimizer 7.0.2 を用いて計算を行う。

## 2. 外生変数の設定

### (1) 仮想都市と地区の定義

都市構造を求めるとき、仮想都市をいくつかの地区の集まりとして考え、都市部と郊外部の両方を含むようにする。結果の解釈を容易にするため、都市内人口の居住が最大限集中する場合にはそれが一つの地区に収まる程度に広さを設定することとした。そこで、図 1 のように地区集合を  $Z = \{1,2,3,4\}$  とし、地区 4 が都心であり離れるにつれと徐々に郊外の特徴を持つと仮定する。地区間を移動できるように公共交通を配置することができ、その公共交通路線集合を  $L = \{1,2,3,4\}$  と表示する。

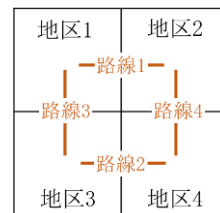


図 1 仮想都市の地区と公共交通路線の設定

(2) 時間スケールの定義

本研究では、世代ごとの負担する費用の差異をおおまかに表現できればよいので、前述のように 1 時期は 25 年とし、時期集合  $T=\{0,1,2,3,4\}$ 、年齢階層集合  $E=\{1:0 \text{ 歳} \sim 24 \text{ 歳}, 2:25 \text{ 歳} \sim 49 \text{ 歳}, 3:50 \text{ 歳} \sim 74 \text{ 歳}\}$  とした。このため、時期・年齢階層と世代との対応  $\delta_{leg}$  は次の表 1 のように設定した。

表 1 時期  $t$ ・年齢階層  $e$  と世代  $g$  の関係

$e$	$t$		
	年齢階層 1	年齢階層 2	年齢階層 3
第 1 期	世代 3	世代 2	世代 1
第 2 期	世代 4	世代 3	世代 2
第 3 期	世代 5	世代 4	世代 3
第 4 期	世代 6	世代 5	世代 4

(3) 人口・住居ストック配分・初期の地区属性の設定

多くの地方都市においては、近年に郊外の開発があり、新しい住居ストックが郊外に存在して若年者が多く、そうした郊外では自動車利用のしやすい街路が形成されている一方、旧来の中心市街地は自動車利用に適さず、古い住居ストックが多く住民の高齢化が進んでいる、という状況が見られる。その状況を参考として初期（第 0 期）の人口配分と住居ストック配分を表 2、表 3 のように設定した。地区属性については、地区 1、地区 2、地区 3 は自動車利用に適しており ( $z_{it}=0$ )、地区 4 のみ自動車利用に適していない ( $z_{it}=1$ ) としている。

表 2 人口の初期配分

年齢階層	地区 1	地区 2	地区 3	地区 4
1	1,000	600	600	500
2	300	800	600	1250
3	350	900	800	1500

(単位：人)

表 3 住居ストックの初期配分

築年数階層	地区 1	地区 2	地区 3	地区 4
1	700	300	300	100
2	200	300	300	900
3	1,000	1,000	1,000	1,000

(単位：戸)

(4) 生残率・交通弱者率・世帯主確率・出生率の設定

生残率・交通弱者率・世帯主確率を表 4 のように設定した。生残率・交通弱者率に関しては、都市内の人口は減少しており、また若年者ほど自家用車を運転する能力があり、高齢者ほど交通弱者が多いと仮定して設定した。また、世帯主割合は人口から世帯数を計算するために、平成 24 年岩手県保健福祉年報（人口動態編）<sup>11)</sup>を用い

て、地方都市における年齢階層ごとの人口と世帯数から、実状に合うように設定した。出生率は 0.8 とした。

表 4 生残率・交通弱者率・世帯主確率

年齢階層	生残率	交通弱者率	世帯主割合
1	0.8	0.7	0.1
2	0.8	0.1	0.5
3	0	0.9	0.5

(5) 転居費用の設定

転居費は、転居することで距離に関わらず発生する費用と、距離に応じて発生する費用に分けることができ、前者の割合が大きいと考え、地区間の距離によらず  $MC_{ij}=400000$  万円/回 ( $i \neq j$ ) とし、時期をまたいで同一地区内に居住し続ける場合は転居費用はかからないとした。

(6) 活動に関する外生変数の設定

本研究の関心は、サービスの維持に必要な利用者数が確保できるかにあるため、サービスの質やそれによる効用は重視せず、利用者数を捉えることに重点を置く。そこで活動としては、活動頻度は多いものの小さい施設で目的を満足できる活動 ( $a=1$ ) と、活動頻度は少ないが大きい施設が必要になる活動 ( $a=2$ ) の 2 種類を考え、その活動の頻度と、施設の最大容量・最小運営規模を表 5 のように設定した。公共交通の最大規模は 150,000,000 回/25 年、最小規模は 63,900 回/25 年とした。公共共通は一日に 7 便運行している路線バスを想定し、一人便を最小運営規模として設定し、最大容量は運行頻度を 4 倍に上げた時に全便満員となる利用者数を想定した。

表 5 活動の頻度と施設の最大最小規模

活動	活動頻度	施設最大規模	施設最小規模
1	51	469,200	2,466
2	51/2	4,692,000	24,660

(単位：100 回/25 年)

次に、施設サービスを提供することの費用を表 6 のように設定した。また、公共交通サービスを提供することの費用として固定費用  $TFC=1,440,000$  円/年、変動費用  $TVC=80$  円/回と設定した。施設・公共交通は、いずれも固定費用の大きいコスト構造を仮定しており、サービスを提供する数を少なくすることのメリットが働くように、実際の学校や病院・路線バスの建設、運営費用の実態を参考に設定した。また、自動車で間を移動する際の一般化費用は 1 リンクあたり  $GCC=20$  円とした。

表 6 施設の固定費用と変動費用

活動	施設固定費用 (単位：百万円/25年)	施設変動費用 (単位：円/回)
1	150	246,600
2	15,000,000	2,466,000

### (7) 建設に関する外生変数の設定

住居の建設費用を  $HCC=40,000,000$  (円/戸), 施設の建設費用を  $ICC_1=30$  (十万円/1 箇所),  $ICC_2=3000$  (十万円/1 箇所), 公共交通の建設費用を  $TCC=400,000$  (円/本) とした. 施設・公共交通の建設費とは, それまでサービスが提供されていなかった場所で新しくサービスを提供するための費用であり, 例えば主な居住地が時間を経るにつれて変化し, 利便性を考えて施設を移設する場合に必要な費用を意味する.

## 3. 最適化モデルの計算結果と考察

### (1) 先行世代の目的関数値の条件を段階的にゆるめた将来世代の目的関数最小化の手順

本研究では, ある世代の目的と別の世代の目的が同じ都市構造で両立されるのか, また両立されない条件は何であるか, を明らかにするため, 世代が負担すべき費用の総和を考え, 目的関数に設定する. 各世代について, 該当する時期および年齢階層の費用を足し合わせた世代  $g$  の目的関数  $G_g$  について, 世代の集合を  $X, Y$  (ただし,  $X \cup Y = \emptyset$  かつ  $X \cap Y = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ) として, 次の Step1~Step3 の手順で計算を行う.

Step1 世代  $g \in X$  の目的関数  $G_g$  の総和  $G_X$  を最小化

$$G_X^* = \min_{p,x,y,w,h} \sum_{g \in X} G_g$$

s.t. (6)–(25)

Step2  $\alpha=1$  として目的関数  $G_X$  の取る値に制約条件を追加した問題について世代  $g \in Y$  の目的関数の総和  $G_Y$  を最小化

$$G_Y^* = \min_{p,x,y,w,h} \sum_{g \in Y} G_g$$

s.t. (6)–(25)

$$G_X \leq G_X^* \times \alpha \quad (26)$$

Step3  $\alpha$  に異なる値を設定して Step2 を再度計算

$\alpha$  は外生的に与える 1 以上の実数である.  $\alpha=1$  では制

約条件(26)は, 世代  $g \in X$  の目的関数  $G_X$  が最小値  $G_X^*$  を取ることを意味する. Step3 で  $\alpha$  により大きい値を段階的に設定して計算することで, 世代  $g \in X$  の目的関数  $G_X$  の値についての条件を段階的に緩めながら計算を繰り返す.

集合  $X, Y$  については, 様々な組み合わせが考えられるが, 今回は先行世代の目的と将来世代の目的の両立可能性について考えるため,  $X=\{1\}, Y=\{2,3,4,5,6\}$  の場合,  $X=\{1,2\}, Y=\{3,4,5,6\}$  の場合,  $X=\{1,2,3\}, Y=\{4,5,6\}$  の場合,  $X=\{1,2,3,4\}, Y=\{5,6\}$  の場合,  $X=\{1,2,3,4,5\}, Y=\{6\}$  の場合の 5 つの組み合わせに対して計算を行った. これらの計算結果から得られる結論を代表するものとして, 以下では  $X=\{1\}, Y=\{2,3,4,5,6\}$  の場合の計算結果を取り上げる. なお,  $\alpha$  は 1.000 から 0.001 ずつ大きい値を与えて計算した.

### (2) 最適化モデルの計算結果と世代1および世代2~6の費用負担のトレードオフ構造

まず, 世代 1 の目的関数値の制約を緩めた時の世代 2~6 の目的関数の総和の最小値を, 該当する世代の数で除した, 1 世代の負担すべき費用の平均値を次の図 1 に示す. 図 1 から,  $\alpha$  に段階的に大きい値を設定し, 世代 1 の目的関数に関する制約を緩めることにより, 世代 1 の目的関数値が大きくなることと引き換えに世代 2~世代 6 の目的関数の最小値はより小さく改善できることが分かる. そして, 世代 1 の目的関数値を  $1.505452 \times 10^{13}$  程度まで大きくすることを許容する ( $\alpha=1.008$  とした場合に相当) と世代 2~6 の目的関数値は最小限まで改善され, これ以上制約を緩めても世代 2~6 の目的関数は改善されなくなることが分かる.

次に, 図 2 の縦軸にあたる世代 2~6 の目的関数値を分解したものを図 3 に示す. そのうち, 世代 1 の目的関数値の制約を緩めながら世代 2~6 の目的関数を最小化したときに実現した各世代の目的関数値と世代 1 の目的関数値の関係を図 3 に示している. (ア) 世代 1 の目的関数  $G_1$  が最小値を取る  $\alpha=1$  の場合, (イ)  $\alpha=1.0004$ , (ウ)  $\alpha=1.0005$  の場合, (エ) 世代 2~世代 6 の目的関数値の総和が最小限に改善されるまで世代 1 の目的関数  $G_1$  の制約をゆるめた  $\alpha=1.0008$  の場合の 4 つの都市構造を図 4 に示す. なお,  $\alpha=1.001 \sim 1.003$  の時および  $\alpha=1.006, 1.007$  の場合では都市構造の大きな変化は起こらないため図からは省略した.

図 3 から, 世代 1 の目的関数についての制約条件を緩めた場合により良い目的関数値を達成できるようになるのは世代 2, 世代 3, 世代 4 のみであり, この 3 世代の目的関数の改善が図 2 の変化をもたらしていたことが分かる. 一方, 世代 5, 世代 6 は世代 1 の意思決定とは独立である. これは, 世代 5, 世代 6 が生活を始めるころ

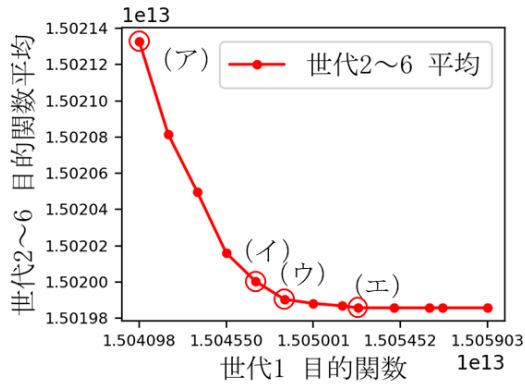


図 2 世代 1 の目的関数と  
世代 2~6 の目的関数の平均の関係

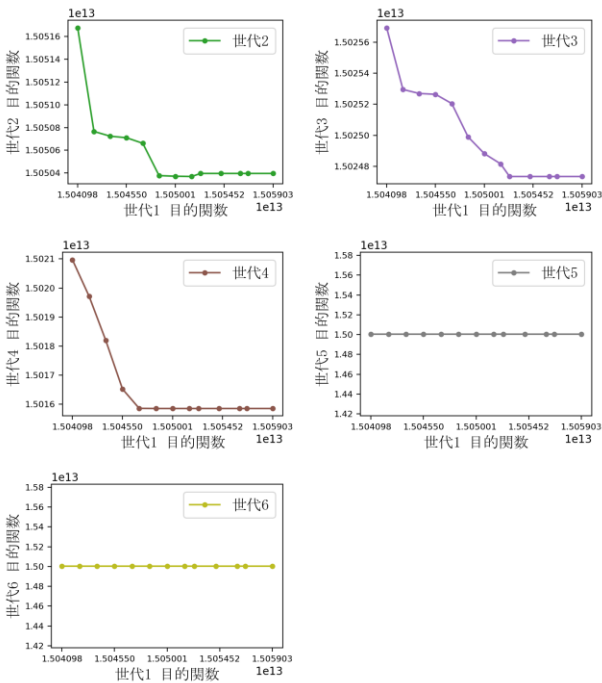


図 3 世代 1 の目的関数とその他世代の目的関数の関係

には図 4 のいずれの場合でもすでに居住および施設が 1 地区に集約され、かつその地区に住居が十分に用意され新規建設の必要がないため、世代 5、世代 6 には負担が発生しないことによる。

また、世代 1 の目的関数値の制約を  $\alpha$  の値を大きくして緩めるにつれて、世代 2、世代 3、世代 4 のそれぞれが、異なる  $\alpha$  の値の時に大きく減少することがわかる。これは、まず時期 1 と時期 2 の住居の建設量の違いが要因になっている。世代 1 の負担する建設費用を抑えるために時期 1 において住居の新規建設を抑えると、将来的に住居ストックが足りなくなるため時期 2 に必要な新規建設の量が増える。時期 1 の建設は世代 1、世代 2、世代 3 が負担する一方で、時期 2 の建設は世代 2、世代 3、世

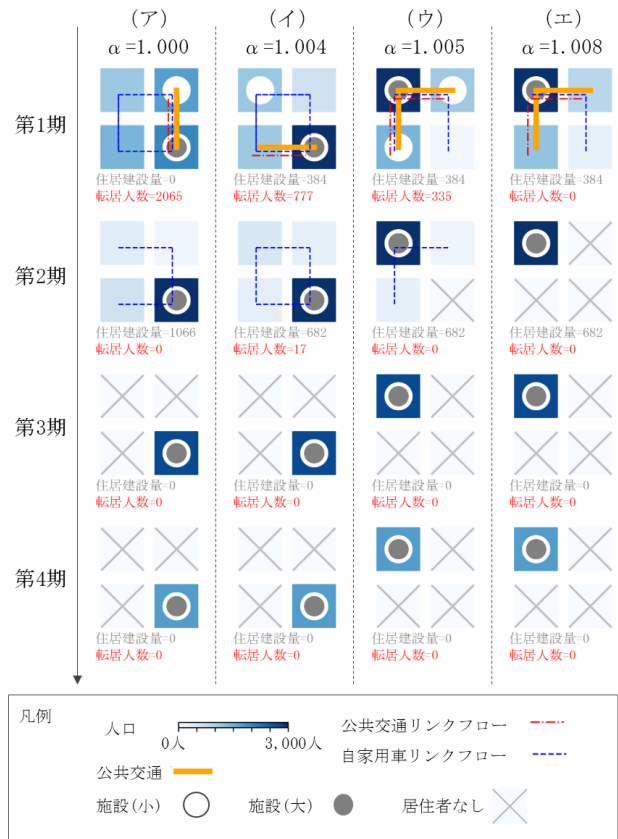


図 4 4 パターンの  $\alpha$  の与え方と その場合の都市構造

代 4 が負担する。したがって、時期 1 と時期 2 における建設量の配分は世代 1 および世代 4 の負担すべき費用には影響するが世代 2 および世代 3 には影響しないという性質をもつ。

次に、先行世代の転居が将来世代の転居の必要性に影響を与えていることも、世代 2、世代 3、世代 4 の目的関数値を小さくしている要因である。世代 3 は時期 1 において世代 2 の居住分布に応じて生まれるため、世代 2 が将来的な都市の集約先に時期 1 において居住していれば、その先世代 3 が転居する必要はないが、そうでない場合は世代 3 にはいずれ転居する必要が生じる。このため、先行世代がこの先生まれてくる将来世代のために先に利便性の高い集約先に転居しておくか、その転居を将来世代に託すか、という選択が生じ、これが世代 2 と世代 3、さらには世代 4 という隣接する世代の間のトレードオフ構造を生んでいる。

このように、いずれの場合も最終的に 1 地区に施設と居住を集約するという集約型の都市構造で目的関数を最小化できるものの、集約する地区の違い、さらには集約型の都市構造に至るまでの転居や建設のタイミングをめぐって、世代間のトレードオフ構造が存在することがわかった。

#### 4. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では、ある世代にとって望ましい都市構造が他の世代にとっても望ましいのか、ということを確認するために、都市内で住民が生活するために負担すべき費用を最小化する都市構造を求める数理最適化モデルを作成し、世代間のトレードオフを確認した。

まず、先行世代の費用負担を最小化した場合と先行世代の費用負担についての制約条件を緩めた場合の将来世代の費用負担を最小化した場合とでは、いずれの場合も居住および施設を最終的に1地区に集約されるものの、居住および施設を最終的に集約する場所が異なった。このことから、最終的に居住および施設を集約する場所の選定次第で、各世代ごとの負担する費用の達成しうる最小値が異なることがわかった。次に、こうした二つの場合の計算結果において、住居を整備する時期や転居を行う世代も異なった。このことから、住居を整備する時期と転居を行うタイミングをめぐって、世代間のトレードオフ構造があることがわかった。

以上の結果から、コンパクトシティ政策においては負担すべき費用をめぐって世代間の空間的・時間的対立が存在している。この対立は施設の維持費用の低下や交通コストの低下などによって解消できる可能性がある。空間的・時間的対立を解消しうる政策について検討と分析を行い、研究発表会にて発表したい。

- 2) 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, 都市計画論文集, No.33, pp.73-78, 1988.
- 3) 小島浩, 吉田朗, 森田哲夫: 環境負荷を小さくするための都市構造及び交通政策に関する研究—仙台都市圏を対象として—, 都市計画論文集, No.39-3, pp.541-546, 2004.
- 4) 中道久美子, 村尾俊道, 義浦慶子, 谷口守: 転居前後の自動車利用変化とそれによるCO<sub>2</sub>排出量削減のための意識啓発を考慮した都市コンパクト化施策の検討, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 67, No. 3, pp.300-310, 2011.
- 5) YIN Yanhong, 溝上章志: 効用水準とエネルギー消費量に影響を与える都市構造と交通特性に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 67, No. 5 pp. I\_271-I\_281, 2011.
- 6) 安立光陽, 鈴木勉, 谷口守: コンパクトシティ形成過程における都市構造リスクに関する予見, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 68, No. 2 pp. 70-83, 2012.
- 7) 菊地亮太, 室町泰徳: ネットワーク型コンパクトシティにおける公共交通維持のための都市構造に関する研究. 都市計画論文集, 2016, 51. 3: 703-708.
- 8) 根市政明, 土屋貴佳, 室町泰徳: 都市のコンパクト化による都市施設マネジメント費用の変化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 24, pp. 217-222, 2004.
- 9) 肥後洋平, 森英高, 谷口守: 「拠点へ集約」から「拠点を集約」へ—安易なコンパクトシティ政策導入に対する批判的検討—, 都市計画論文集, No.49-3, pp.921-926, 2014.
- 10) 富田安夫, 寺嶋大輔: 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. 土木計画学研究・論文集, vol. 21, pp. 225-232, 2004.
- 11) 青野隆仁, 長尾征洋, 戸川卓哉, 加藤博和, 佐野充: QOL 指標を用いた撤退, 再集結地区選定への遺伝的アルゴリズムの適用—旧上越市を対象として—, 土木計画学研究, 講演集, Vol. 43, CD-ROM(284), 2011.
- 12) 国土交通省: 国土形成計画 (全国計画) (参照 2017-4-21) <http://www.mlit.go.jp/common/001100233.pdf>
- 13) Gurobi Optimizer Reference Manual (参照 2017-7-30) <http://www.gurobi.com/documentation/6.0/refman/>
- 14) 近畿運輸局: 地域公共交通の確保・維持・改善 (参照 2015-11-19) <http://www.tb.mlit.go.jp/kinki/kansai/program/>

#### 参考文献

- 1) 国土交通省: 新しい時代の都市計画はいかにあるべきか、<https://www.mlit.go.jp/singikai/infra/toushin/images/04/021.pdf> (参照 2017.4.21)

(2017.7.31 受付)

## INTER-GENERATION TRADE-OFF SUBSTRUCTURE IN THE COMPACT CITY FORMATION PROCESS Koshi ISONO and Makoto OKUMURA

Many Japanese cities have adopted “Compact City Policy (CCP)” as an efficient urban structure at a time point in the future. In the CC formation process, various generations must decide their housing locations, facilities for daily life, and transportation mode for commuting. If they want to live in the area where not enough housing stock exists, they must pay additional construction cost. In this paper, we formulate an optimal location model to find a location of urban functions, which minimizing a living cost of some generations in the city. We solve the optimal urban structure and clarify the inter-generation trade-off structure in the CC formation process.