

都市の長期的な空間構造をめぐる トレードオフ構造の分析

磯野 昂士¹・奥村 誠²

¹ 非会員 一般財団法人計量計画研究所 都市・地域計画研究室
(〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 2 番 9 号)

E-mail: kisono@ibs.or.jp

² 正会員 東北大学 災害科学国際研究所 (〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502)

E-mail: makoto.okumura.b6@tohoku.ac.jp

これまで都市内の多くの地区でインフラが整備されてきた背景には、人口増加に伴う都市の発展と共にインフラが将来に渡って使われ続ける期待があったと思われる。しかし人口減少下では、これらのインフラが今後も必要であり続けるとは限らない。インフラ投資と維持更新を効率的に行っていく上では、今後も居住地として残す地区といずれ廃止する地区とを分けて持続可能性を明確化することが必要になる。

時空間的に詳細なスケールの都市構造の決定に関してステークホルダー間にトレードオフが存在したとしても、将来的にどこを中心地とするか、どこを居住地として残すかといった大筋の計画にはそもそも有効性のある選択肢が少なく、深刻なトレードオフが存在しない可能性がある。そこで本研究では、時空間的スケールに着目すれば都市構造の計画は、選択肢が多くトレードオフを含む問題と、選択肢が少なくトレードオフの少ない問題に分割できることを示す。

Key Words: *urban structure, spatioal layout, trade-off, optimization*

1. はじめに

都市のインフラの整備や維持・更新には大きな費用が必要である。インフラをある場所に一度整備すれば人々は都市的な生活を送ることが出来るが、そのインフラは不要になっても他の場所へ移すことができないという特性をもつ。整備や維持・更新の費用が大きいことを考えれば、インフラを用意する以上は将来に渡ってそのインフラが使用されつづけることが望ましい。これまで都市内の多くの地区でインフラが整備されてきた背景には、人口増加に伴う都市の発展と共に開発された地区に将来に渡って人口が居住し、作られたインフラが使われ続けるという期待があったと思われる。しかし今後の人口減少下では、これまで都市内に用意されてきたインフラの全てが必要であり続けるとは限らない。インフラ投資と維持更新を効率的に進めていく上では、都市の中で今後も居住地として残す地区といずれ廃止する地区とを分けて持続可能性を明確化することが必要になると思われる。

都市内の地区の将来の持続可能性は、長期的な都市構

造の計画に依存するが、長期的な都市構造に関してステークホルダー間に強いトレードオフがあれば簡単には合意に達することができず、特定の都市構造を前提に判断することは困難である。なお、本研究では都市構造を、「ある時点における都市内のインフラ整備地区および中心的役割を持つ施設の設置地区の空間的パターン」のことと定義する。

本研究では、インフラ投資の判断をするための根拠としては、詳細な都市構造に関する合意がとれている必要はなく、将来的にどこを中心地とするか、どこを居住地とするかといった大筋の計画が合意されていれば十分であることに着目する。仮に時空間的に詳細なスケールの居住地の決定に関してトレードオフがあったとしても、大筋の計画にはそもそも有効性のある選択肢が少なくトレードオフが存在しない可能性がある。本研究では、時空間的スケールに着目すれば都市構造の計画は、選択肢が多くトレードオフを含む問題と、選択肢が少なくトレードオフの少ない問題に分割できることを示す。さらに基本的な都市構造を決める問題は後者のような問題であ

るため早期の合意形成が可能で、その決定事項を前提にして都市内の各地区の持続可能性を判断すれば、早期に長期的に安定なインフラ投資の計画立案が可能となることを示す。

2. 本研究のアプローチ

(1) 都市構造改革に関わる既存研究

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が都市計画の研究者らによって分析されてきた。交通の環境負荷低減に着目した都市構造分析として、堀・細見・黒川(1999)¹⁾、小島・吉田・森田(2004)²⁾などがある。他方、肥後・森・谷口(2014)³⁾は都市機能の集約による施設運営の効率化に着目し、拠点地区の個数と機能に関する分析をおこなった。このように、これまでの研究の多くは、いくつかの「計画規範」をとりあげ、関係する指標の改善に対して、集約型の都市構造が有効であることを確認してきた。

複数の異なる規範を効用関数の中で重み付けをして総合化し、それを同時最適化する都市構造を検討した既存研究に富田・寺嶋(2004)⁴⁾がある。また、複数の規範の選択がもたらす都市構造の違いを扱った研究として青野・長尾・戸川・加藤・佐野(2011)⁵⁾があり、新潟県上越市を対象として、QOL 指標最大化、市街地維持費用最小化、及び両者の同時最適化を規範として、遺伝的アルゴリズムを用いて都市的利用中止(撤退)地区および再集結地区の選定を行っている。

これらの研究では分析されてこなかった、「ある規範を達成する都市構造を実現すれば他の規範も達成可能なのか？」を明確化して、都市構造をめぐるトレードオフの構造を把握しようとする試みが、磯野・奥村(2017)⁶⁾によってなされている。ここでは、既存研究で取り扱われてきた規範を網羅的に扱い、重み付きの費用関数の形に集約して、多時点に渡る都市構造を政策変数とする最適化モデルを提案している。規範への重みの付け方により、異なる都市構造が現れることを明らかにしている。

本研究では、この先行研究のモデルを用いて、長期的な都市構造決定をめぐる世代間、規範間のトレードオフを把握する方法を提案する。

(2) 計画問題の識別手順

1で述べたように、時空間的に詳細なスケールの計画問題には選択肢が多くトレードオフが存在し、大筋の計

画問題には選択肢が少なくトレードオフが存在しないことが予想される。これを確認するため、都市構造の計画問題を、時空間的スケールの異なる次の3つの問題に分ける。(ア)各期の中心的役割の施設設置場所(以降、中心地)の決定、(イ)最終期の居住分布の決定、(ウ)各時期の居住地分布の決定である。図1のような手順に従い、それぞれの計画問題が扱う意思決定が、選択肢が多くトレードオフの存在する問題なのか、あるいは合理的な選択肢は限られトレードオフが存在しない問題なのかを識別する。

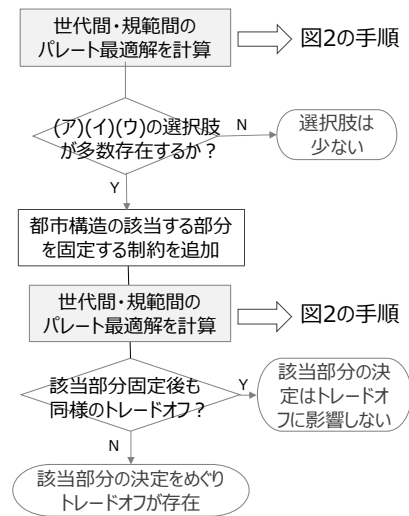


図1 計画問題の識別手順

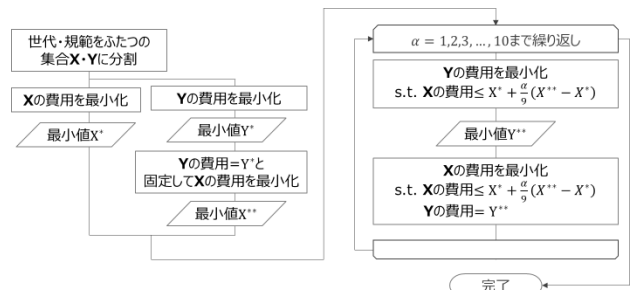


図2 パレート最適解の計算手順

(3) パレート最適解を求める手順

都市構造に関わるある計画問題において、ステークホルダーの2つのグループ間のトレードオフの存在を確認するための手順は図2の通りである。まず、複数の世代あるいは複数の計画規範を2つの集合に分割するとともに、計画問題の目的関数をこれらの分割に対応させて2つの目的関数に分割する。この一つの分割方法に対して、2つの目的関数間のパレート最適集合を求め、トレードオフ構造を明らかにする。具体的には2つの目的関数それぞれを単独で最小化してトレードオフが存在する領域

を確定する。次にその領域を等分割して計算領域を制限し、2つの目的関数を交互に制約条件下で最適化することで、途中のパレート最適点を求める計算を行う。

3. 都市構造最適化モデル

(1) 最適化モデルの要件

これまで、集約型都市構造の分析を目指す研究では、均衡モデルや均衡制約付き最適化モデルが多く用いられてきた。これらのモデルの目的は、現在のステークホルダー間関係を前提として、将来時点の都市構造を予測、あるいは現在の社会の中で合意され実現できる可能性が高い政策で実現可能な都市構造を求めることである。しかし、こうしたモデルは、既存の政策に限定されており、より幅広い都市構造の可能性を考慮に入れてトレードオフ構造を把握するには不十分である。

そこで本研究では、均衡制約のない、長期的な都市構造の最適化モデルを用いる。すなわち先行研究⁹⁾で著者が提案したモデルをベースとして、都市の中心的施設と地区の居住を可能にするための基礎的な生活インフラの設置を明示的に表現できるようにモデルを改良する。目的関数は、多時点の多様な規範を金銭換算し重み付けして統合化した費用とし、その最小化を行う。目的関数の規範間・世代間の重み付けを変化させて都市構造の計算を行い、異なるステークホルダー間のトレードオフの構造を把握する。この時、人口減少の進む地方都市においては、買い物や医療、交通など、それまで成り立っていた都市サービスが人口減少に伴い成り立たなくなり、住民の都市サービスへのアクセシビリティが確保されなくなっているという問題がある。このため、本モデルではこうした都市サービスへのアクセシビリティを確保する条件のもとで、長期的な都市構造の最適化を行う。

(2) 計算対象とする仮想都市

本研究では、都市の中心的施設と居住のためのインフラがどの地区に設置されるべきかという都市構造の在り方に興味があり、もともと個別の地区が有する自然や地形の違いなどの影響は可能な限り排除して分析したい。そこで、仮想都市を対象にパレート最適解の計算を行う。図3のように、仮想都市を基本的な特性が同等の13の地区の集まりとして考え、都心部と郊外部の両方を含むようにする。ひとつの地区はおよそ1km四方の大きさ

を想定している。地区6が旧来の都心であると仮定する。各地区にインフラを、都市内のいずれかの地区に都市の中心的施設を、地区間に公共交通サービスを設定可能であると仮定する。時期は1期25年として4期100年を計算対象とする。

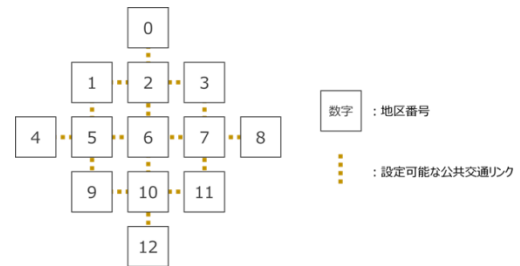


図3 計算対象の仮想都市

(3) モデルで表現する項目

本モデルでは、一つの都市において多時点を通じて全ての住民が最低限の生活を確保できるという条件を満足する都市構造とその際の費用を扱う。

まず、ある時期の都市の状態を次のように表現する。都市を複数の地区からなる集合として捉え、住民は都市内の単数または複数の地区に居住する。居住に足る住宅量と、居住を支えるインフラが存在する地区にのみ住民は居住できる。都市の中心的施設は都市内の一地区にのみ立地でき、すべての住民は、一定の頻度で都市活動のためにその地区に通う必要がある。中心的施設が置かれた地区と異なる地区に居住する住民は、自動車あるいは公共交通で移動する必要がある。その際、交通弱者は自動車を利用できないため公共交通を利用せざるを得ないと仮定する。

次に、ある時期と次の時期をまたぐ都市の変化を次のように表現する。住民の属性として年齢階層（以降、年齢）を考え、時期をまたぐごとに住民は次の年齢へ移動する。最も若い年齢の住民は、一つ上の年齢の住民から一定の出生率で同一の地区に誕生する。各期の期首の居住分布は各期期首の転居により決まる。そして、各期の新築住宅はその期首の新規建設により生じると仮定する。

本モデルでは、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、年齢は{0:0-25歳, 1:25-50歳, 2:50-75歳}の3つを考え、築年数階層も同様に{0:0-25年, 1:25-50年, 2:50-75年}の3つを考える。その上で、時期および年齢と世代の関係を次の表1のように設定した。そのほか、初期条件やパラメータについて、地方都市の実態を参考に設定した。その際、自動運

転の普及が空間構造をめぐるトレードオフを緩和すると予想されるため、異なる自動運転普及シナリオを設定し、計算を行う。

表 1 時期・年齢と世代の関係

	年齢 1	年齢 2	年齢 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

(4) 変数の定義

本モデルには 10 の操作変数と 21 の外生変数が含まれている。まず以下の定式化で共通して用いる添え字を定義する。時期を $t \in T$ 、年齢を $e \in E$ 、地区を $i, j \in Z$ 、公共交通の路線番号を $l \in L$ 、交通手段を $m \in M$ 、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 $|F|$ など表す。なお、これらの集合の要素は時期集合 T を除き 0 から始まる整数であるとする。また、隣接する地区の組み合わせの集合を I とおく。

次に、都市の状態を表す操作変数として、時期 t 別に、地区 i 別年齢 e 別の人口を p_{iet} 、地区 i のインフラの有無を z_{it} 、地区 i の中心的施設の有無を y_{it} 、路線 l の公共交通の有無を w_{lt} 、地区 ij 間を交通手段 m で移動する年齢 e の人数を r_{ijemt} とする。一方、都市の変化をあらわす変数として、期首 t 別に、地区 ij 間を転居する年齢 e の人数を x_{ijet} 、地区 i の新規建設住宅量を h_{it} 、地区 i のインフラ建設の有無を \hat{z}_{it} 、中心的施設建設の有無を \hat{y}_{it} 、公共交通リンク l の建設の有無を \hat{w}_{lt} とする。

外生変数として、インフラの固定費用を FFC 、公共交通のリンク別固定費を TFC_l 、公共交通の利用一般化費用と公共交通の単位変動費の和を TVC 、地区間自動車移動一般化費用を GCC_{ij} 、公共交通リンクと路線の対応を δ_{ijl} 、地区間転居の心理的コストを MC_{ij} 、住宅単位建設費を HC 、インフラ建設費を IC 、中心的施設建設費を FC 、公共交通建設費を TC 、出生率を B 、生残率を D_e 、外出頻度を FA 、インフラの最小規模を NI 、最大規模を MI 、公共交通の最小規模を NT 、最大規模を MT 、交通健全者率を AC_e 、世帯主割合を η_e と表す。

(5) モデルの目的関数と制約条件

本モデルでは、多時点の多様な規範を 4 つにまとめて費用として金銭換算し、さらに重み付けして統合化した

目的関数を用いる。4 つの規範の時期ごと年齢ごとの費用を次の式(1)~式(4)に示すように定式化する。すなわち式(1)はインフラ運営費用、式(2)は交通移動費用、式(3)は転居の心理的コスト、式(4)は建設行為にかかる費用である。

(ただし、 $e \in E, t \in T$)

$$U_{et} = \sum_{j \in Z} \frac{FFC}{|E|} z_{jt} \quad (1)$$

$$W_{et} = W' + W''$$

$$W' = \sum_{l \in L} TFC_l \cdot \frac{w_{lt}}{|E|} \quad (2)$$

$$W'' = \sum_{(i,j) \in I} \{TVC \cdot r_{ije,0,t} + GCC_{ij} \cdot r_{ije,1,t}\}$$

$$C_{et} = \sum_{(i,j) \in Z^2} MC_{ij} x_{ijet} \quad (3)$$

$$H = (H' + H'') / |E|$$

$$H' = \sum_{i \in Z} HC \cdot h_{it} + IC \cdot \hat{z}_{it} + FC \cdot \hat{y}_{it} \quad (4)$$

$$H'' = TC \sum_{l \in L} \hat{w}_{lt}$$

(6) 制約条件

目的関数の最小化において、(3)で述べた考え方に沿って以下のような制約条件を設定する。

$$p_{i,e=0,t} = B \cdot p_{i,e=1,t} \quad \forall i \in Z, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{j \in Z} x_{ijet} - D_e p_{i,e-1,t-1} = 0 \quad (6)$$

$$\forall i \in Z, e \in \{E \setminus 0\}, t \in T$$

$$p_{jet} - \sum_{i \in Z} x_{ijet} = 0 \quad \forall i \in Z, e \in \{E \setminus 0\}, t \in T \quad (7)$$

式(5)は年齢 1 の人口を計算する式である。式(6),(7)で人口と転居人数の関係を表している。

$$\sum_{\substack{i \in Z \\ \text{if } (i,n) \in I}} \{r_{inemt} + r_{i=|Z|,nemt}\} = \sum_{\substack{j \in Z \\ \text{if } (n,j) \in I}} \{r_{njemt} + r_{n,j=|Z|+1,emt}\} \quad (8)$$

$$\forall n \in Z, e \in E, m \in M, t \in T$$

$$\sum_{m \in M} r_{i=|Z|,jemt} = FA \cdot p_{jet} \quad \forall j \in Z, e \in E, t \in T \quad (9)$$

$$NI \cdot z_{it} \leq \sum_{e \in E} \sum_{m \in M} r_{i,j=|Z|+1,emt} \leq MI \cdot z_{it} \quad (10)$$

$$\forall i \in Z, t \in T$$

$$\sum_{j \in Z} y_{j,t} = 1 \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$NT \cdot w_{lt} \leq \sum_{(i,j) \in \{I|\delta_{ijl}=1\}} \sum_{e \in E} r_{ije,m=0,t} \leq MT \cdot w_{lt} \quad (12)$$

$$r_{i=|Z|,je,m=1,t} \leq FA_e AC_e p_{jet} \quad \forall l \in L, t \in T, \forall j \in Z, e \in E, t \in T \quad (13)$$

式(8)-(13)は、住民の活動に関する制約条件である。式(8)(9)で人口と交通モード別の利用者数の関係を表し、式(10)-(12)でインフラ、中心的施設、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(13)は、自動車を利用できるのは交通健全者のみであることを表している。

$$\sum_{e \in E} p_{iet} \eta_e - \sum_{f \in F} q_{ift} \leq 0 \quad \forall i \in Z, t \in T \quad (14)$$

$$q_{i,f=0,t} - h_{it} = 0 \quad \forall i \in Z, t \in T \quad (15)$$

$$y_{jt} - y_{j,t-1} - \hat{y}_{jt} \leq 0 \quad \forall j \in Z, t \in T \quad (16)$$

$$z_{jt} - z_{j,t-1} - \hat{z}_{jt} \leq 0 \quad \forall j \in Z, t \in T \quad (17)$$

$$w_{lt} - w_{l,t-1} - \hat{w}_{lt} \leq 0 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (18)$$

$$p_{ie,t=0} = P0_{ie} \quad \forall i \in Z, e \in E \quad (19)$$

$$q_{if,t=0} = Q0_{if} \quad \forall i \in Z, f \in F \quad (20)$$

式(14)-(20)は、住宅ストックと建設に関する制約条件である。式(14)は住宅ストックと地区内世帯数の関係を表し、式(15)-(17)は建設量と住宅ストックの関係およびインフラ・公共交通の建設の有無を表す。式(19)(20)は、人口と住宅ストックの初期条件で、それぞれの外生値 $P0_{ie}, Q0_{if}$ に等しいことを保証する。

以上の式(1)~(20)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 Gurobi Optimizer 7.0.2⁸⁾を用いて計算を行う。

4. 外生変数の設定

(1) 生残率・世帯主割合・出生率・交通弱者率の設定

生残率・世帯主割合・交通弱者率を表 2 のように設定した。生残率は、都市内人口の自然減と社会減を考え

{年齢 0 : 0.8, 年齢 1 : 0.8, 年齢 2 : 0.0}と設定した。また、世帯主割合は、平成 24 年岩手県保健福祉年報(人口動態編)¹¹⁾に基づき、地方都市の実状に合うように{年齢 0 : 0.1, 年齢 1 : 0.5, 年齢 2 : 0.5}と設定した。出生率は 0.8 とした。交通弱者率は、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。

表 2 生残率・交通弱者率・世帯主割合

年齢	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

(2) 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 $MC_{ij} = 40$ 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。

(3) 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質ではなく、インフラおよび中心的施設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。そこで、インフラの最小規模を $NI = 300$ 人とおいた。なお、地方都市において人口の過度な集中がインフラや中心的施設の容量を超えるといった問題は起こりづらいと考えられるため、これらインフラおよび中心的施設の最大規模については、最適化問題の制約になりえない十分大きな数を設定している。住民の活動頻度は 1,500 回/25 年、公共交通の最大規模は 150 百万回/25 年、最小規模は 60,000 回/25 年とした。公共交通は一日に 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が 4 倍の 28 便の場合にちょうど全便満員となる利用者数を設定した。

次に、インフラサービスを提供することの費用として固定費用を $FFC = 150$ (百万円/25 年) とした。なお、都市全体のインフラの利用者数、中心的施設の設置数・利用者数の総数は、都市構造の決め方の影響を受けず、すべての解で同じ時間的変化をたどるため、インフラ変動費用、中心的施設固定費用・変動費用は最適解の計算に影響を持たない。そのためこれらの費用は 0 とし、具

体的な計算を省略する。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 $TFC=1,500,000$ 円/年、変動費用 $TVC=80$ 円/回と設定した。これらの値は、実際の道路や上下水道、路線バスの建設、運営費用の実態を参考に設定した。その結果インフラ・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いることから、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と考えられる。また、自動車で地区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。

(4) 建設に関する外生変数の設定

住宅の単位建設費を $HC=40$ (百万円/戸)，インフラ建設費用を $IC=30$ (百万円/1箇所)，中心的施設建設費用を $FC=30$ (億円/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、利便性を考えて中心的施設を移設する場合に必要な費用を意味する。

(5) 人口・住宅ストック配分・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、新しい住宅ストックが郊外に存在して若年者が多く、一方、旧来の中心市街地は古い住宅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）の人口配分と住宅ストック配分を表3のように設定した。

表3 計算の初期設定

	初期人口配分 (単位：人)		初期住宅配分 (単位：戸)	
	年齢0	年齢1	築年数0	築年数1
地区0	890	301	440	145
地区1	686	613	350	301
地区2	511	899	248	445
地区3	699	599	351	299
地区4	896	292	441	144
地区5	493	890	251	452
地区6	399	1253	196	622
地区7	490	902	257	54
地区8	892	315	449	152
地区9	705	600	353	305
地区10	514	899	254	449
地区11	690	603	351	299
地区12	915	273	461	146

なお、目的関数の値が等しい解が複数生じることを避けるため、これらの外生変数値を基準にして、公共交通の固定費用には平均0分散150、転居費用には平均0分散4、自動車一般化費用については平均0分散4の正規分布に従う乱数を生成し、それを足し合わせた数値を計算に用いた。

表4 分割パターンと分割番号の対応

分割番号	世代間分割					
分割世ア	1	2	3	4	5	6
分割世イ	1	2	3	4	5	6
分割世ウ	1	2	3	4	5	6
分割世エ	1	2	3	4	5	6
分割世オ	1	2	3	4	5	6
分割番号	規範間分割					
分割規力	U 運営費	W 移動費	C 転居費	H 建設費		
分割規キ	U 運営費	W 移動費	C 転居費	H 建設費		
分割規ク	U 運営費	W 移動費	C 転居費	H 建設費		
分割規ケ	U 運営費	W 移動費	C 転居費	H 建設費		
分割規コ	U 運営費	W 移動費	C 転居費	H 建設費		

※白抜きは世代（規範）X，網掛けは世代（規範）Yを表す。

5. パレート解の計算結果と考察

(1) 計算ケースの設定

本モデルの目的関数は6つの世代と4つの規範に対応する部分を加え合わせた形になっている。世代間あるいは規範間のトレードオフの構造を分析するため、世代あるいは規範を表4のように2つの集合に分割して目的関数を2つの部分に分割する。その上でこれら2つの目的関数間のパレート最適解を先に図2に示した手順で計算する。すなわちそれぞれの目的関数の単独の最適化によりパレート解の存在範囲を求めたのち、一方の目的関数の達成値を緩めて条件付きの最適化計算を繰り返し、中間に位置するパレート解を求めていく。この過程で、一方の目的関数の改悪なしに他方の目的関数がこれ以上改善できないというパレート条件を満たす10個のパレート解が得られることとなる。

表5 自動運転普及率と交通弱者率

普及率	年齢0	年齢1	年齢2
なし	0.7	0.1	0.9
低	0.1	0.0	0.7
中	0.0	0.0	0.5
高	0.0	0.0	0.0

ここでは、自動運転の普及が空間構造をめぐるトレードオフを緩和する効果を持つと予想し、異なる自動運転普及シナリオを表 5 のように 4 つ設定する。したがって、4 通りの自動運転普及シナリオのそれぞれについて、5 通りの世代の分割および 5 通りの規範の分割を考え、合計 40 通りの計算ケースを設定した。

(2) 4 時点の都市構造の経時的変化

一つのパレート解として初期条件を除いて 25 年ごとの 4 時点の都市構造が得られる。本研究では都市構造の大まかな形の違いに興味があるので、人口や交通量などの量的な違いを捨象し、中心的施設の位置と各地区におけるインフラおよび居住者の有無のみに着目する。例えば居住の有無 z_{it} に着目すれば、その配置は次のような 2 の $|Z|$ 乗までの数値を用いて一意に表現できる。

$$ID_t = \sum_{i \in Z} z_{it} \cdot 2^{|Z| - i - 1} \quad (21)$$

ここでは、居住地の数と中心地の場所の違いを明確化するために、ある時点の都市構造を縦軸に居住地の数、横軸に中心地の場所ごとの居住地分布 ID をとった平面乗の 1 点を用いて表現する。つまり 1 つのパレート解は、この平面上の 4 つの点を順につないだ経路を用いて表現できる。ただし、複数の時点で同じ都市構造を取る場合には、そのパレート解はより少ない数の点を結ぶ経路となる。

40 通りの計算ケースのそれぞれで得られた 10 個のパレート解の都市構造の変化を、図 4 に示す。図 4 は、最大 1600 の点を結ぶ 400 の経路を重ねたものであるが、出現しうる都市構造には共通性がみられるため、時点ご

との都市構造を表す点は 188 点であり、その変化経路は 328 通りとなっている。最終の時点の点をオレンジの菱形で表す。

図 4 より、都市構造変化を表す経路はほとんど、図の上から下に向かっていて、すなわち時期を経て全体の人口規模が縮小するにつれて居住地となる地区は集約され、その数が減少している。次にほとんどの経路は同じ中心地の範囲内を左下方向に動いている。これは居住地の数が減る過程で ID の値が減少していくことを意味している。

(3) 各期の中心地の場所 (ア)

図 4 から、ほとんどの経路は同じ中心地の範囲内に収まっており、途中で中心地の位置が変わる解はパレート最適解になりにくいことがわかる。表 6 に 40 の計算ケースごとに、その中の 10 個のパレート最適解の中に時期の経過とともに中心地の移転を行うという解が存在したかどうかを確認した結果を示す。ひとつでも中心地の移転する最適解が存在すれば「移転有」、ひとつも存在しなければ「不変」と表記している。またパレート最適解の中に異なる場所に中心地を固定する解が含まれている場合は「複不変」と表記している。

表 6 から、世代間の対立を考えた計算ケースでは中心地の移転を伴う解がパレート最適解になることはない。次に、世帯間分割アおよび世帯間分割ウには「複不変」となっており、パレート最適解の中に、異なる地区を中心地とする解が含まれているため、中心地の決定をめぐって世代間にトレードオフが存在する可能性がある。これを確かめるために、図 1 の後半に示したように、各期の中心地の場所をある特定の最適解の地区に固定して移転を行わないという制約を追加して、再度パレート最適

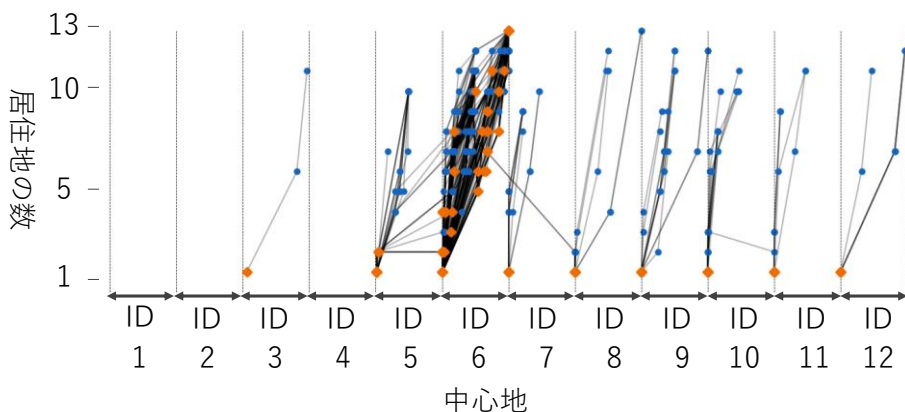


図 4 パレート解となった都市構造の経時的変化パス

表 6 パレート解における中心地と移転の有無

自動 運転	世代間分割 (分割番号)				
	世ア	世イ	世ウ	世エ	世オ
なし	複不変	不変	複不変	不変	不変
低	複不変	不変	複不変	不変	不変
中	複不変	不変	複不変	不変	不変
高	複不変	不変	複不変	不変	不変

自動 運転	規範間分割 (分割番号)				
	規カ	規キ	規ク	規ケ	規コ
なし	複不変	複不変	不変	移転有	複不変
低	移転有	複不変	不変	移転有	複不変
中	移転有	複不変	不変	移転有	複不変
高	複不変	複不変	複不変	複不変	複不変

網掛けは、最終期に複数の不連続な地区が居住地となった解がパレート解に含まれる計算ケースを示す。

解を計算した。

その計算結果の代表的な例として、自動運転普及率「なし」世代分割アの2つの目的関数値を図5に示す。図5から、中心地を固定して途中で移転しないという制約をつけても、パレート解の存在範囲はほとんど同じであり、トレードオフ構造は変化しない。つまり、この世代間のトレードオフは中心地の場所と関係なしに生じているものであるため、中心地の位置の決定をめぐっては世代間のトレードオフは存在しないことが確認できる。

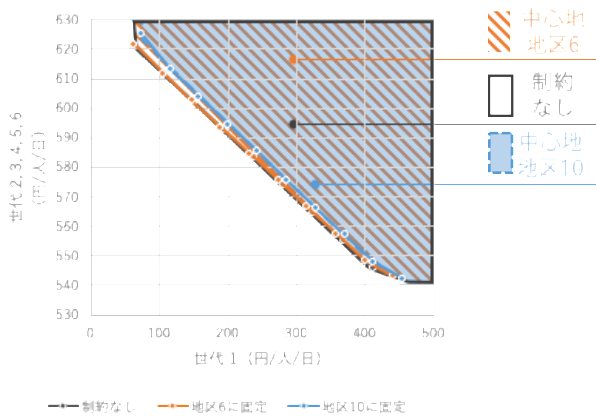


図 5 中心地を固定した場合の世代分割の目的関数値

一方で、規範間のパレート最適を考えた場合には、表6のように途中で中心地を移転する解がパレート最適になる場合が存在する。この場合についても、規範間のトレードオフの存在を確認するため、図1の手順に従い、各期の中心地の場所をある特定の最適解として得られた場所に固定して移転を行わないという制約を追加して再度

パレート最適解を計算した。

その計算結果の代表的な例として、自動運転普及率「低」規範分割ケの2つの目的関数値を図6に示す。図6から、中心地を固定して途中で移転しないという制約をつけると目的関数の実現範囲が小さく制限される。特に中心地を建設費を重視したときに得られる最適解の場所に固定すると、図の横軸に取った建設費は若干小さくなるが、図の縦軸に取った運営費、移転費、転居費の和が取りうる範囲がかなり制約される。したがって、中心地を移転するかどうかをめぐって、規範間にはトレードオフが存在するといえる。

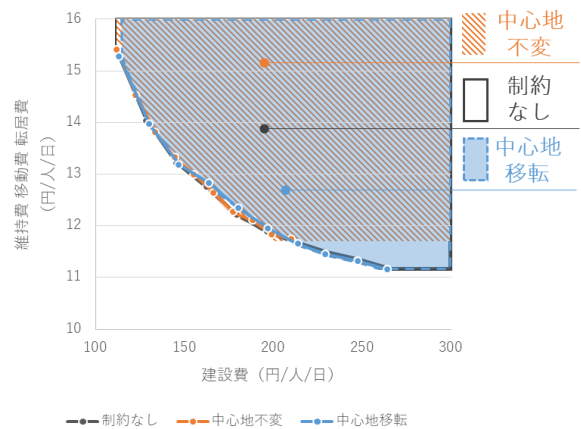


図 6 中心地を固定した場合の規範分割の目的関数値

以上のようなトレードオフは、初期において高齢者の多い地区と若年者の多い地区が異なることが原因で生じていると考えられる。中央にあたる地区6では、初期の第0期において人口が多いものが高齢化が進んでおり、他地区からの転入がなければ時間とともに人口は急激に減少する。一方で、他地区は若年層が比較的多く存在するため、転入がなくとも将来まで比較的人口が維持できる。加えて、中心地は住民が通う場所であり、人口分布に対して移動距離を抑えられる場所が望ましい。こうした観点から、時期1では元々人口の多い地区6を中心地にすることが望ましいが、時期が経つにつれて他の地区に中心地を移転させることが、移動費あるいは転居費を抑えるうえで有利となる。このような理由で、現在人口の多い地区と将来まで人口の多い地区が一致せず別の場所に存在する場合、前者から後者へ中心地を移転させるかどうかをめぐって、トレードオフが存在する。

ただし、表6において5つの計算ケースに発生した中心地の移転を伴うパレート最適解の内容を確認すると、いずれも中心地の移転は、現在人口の多い地区から将来

まで最も多くの人口が残る 1つの地区に移すというものであった。したがって、中心地を移転させるかどうかをめぐってトレードオフは存在する場合でも、これらの 2つ以外の地区へ移転させることは、どの規範にとっても最適ではない。このような理由から、中心地区の選定においてトレードオフの関係にある地区は極めて限られ、多くの地区において、中心地を移転させるかどうかをめぐってトレードオフは存在しない。

(4) 最終的な居住地分布 (イ)

図 4 の中で最終期を表す菱形のプロットに着目し、その縦軸上の場所を確認すると、最終期の居住地数が 1 地区のみである解から 13 地区すべてを居住地として維持する解までが存在する。この理由は、居住地を集約すれば維持費・移動費を抑えることができる一方で、転居費が増大するというトレードオフが存在するためであり、転居費を重視したパレート解では初期に居住者が存在した地区の全てを維持するという解が最適となる。しかし、多くの地方都市では財政上の理由から、すべての居住地を将来にわたって維持し続けることは困難であると考えられる。そこで、以降ではパレート解の中で、居住地を一か所ないし複数箇所に集約する解に着目する。

最終期の居住地が一か所のみの場合、中心地と同一の地区が選ばれる解のみが得られる。複数箇所残す解では、基本的には中心地とそれに隣接するなど距離の近い地区を居住地として残す解が得られている。これは、中心地と近い地区ほど移動費を削減できるためであり、この観点からは、居住地の場所は連続していることが望ましい。

しかし、居住地が離れた地区に存在している解もパレート解となる場合がある。最終期に複数の不連続な地区が居住地となった解がパレート解に含まれる計算ケースを表 6 の網掛け部で示す。この場合、最終期まで居住地区を複数残すパレート解の中に、居住地区の分布が連続である解と不連続である解が両方存在するならば、どの地区を居住地として最終期まで残すか? ということをめぐってトレードオフが存在する可能性がある。このことを確認するため、図 1 の手順に従って、最終期の居住地分布を固定する制約を追加して再度パレート解を計算した。そのうちの計算結果として、自動運転普及率「高」規範分割コの目的関数値を図 7 に示す。図 7 から、最終期の居住地分布を固定することで運営費+移動費の実行

可能領域が制限されており、このため最終期の居住地分布をめぐって規範間にトレードオフが存在することがわかる。

このようなトレードオフが存在する理由は、居住地維持を合理的にする性質をもつ地区が複数存在しているためである。この性質として「中心地に近く移動費が抑えられる」「第 0 期において若年層が多く転居費が抑えられる」「第 0 期において新しい住宅が多く建設費が抑えられる」の三つが考えられる。これらの性質をある程度満たす地区が複数存在する場合、どの地区を居住地として残すか? をめぐって規範間にトレードオフが存在することになる。

しかし、これらの性質を持たない地区、すなわち、中心地から遠く、かつ第 0 期において若年層も新規住宅も多く存在しないような地区も多く存在し、そうした地区は最終期まで居住地として維持する合理性を持たないため、残すかどうか? をめぐってトレードオフは存在しない。

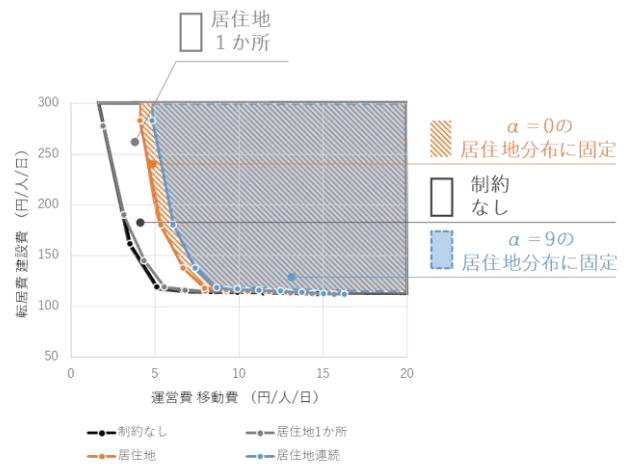


図 7 最終期の居住地分布を固定した場合の規範分割の目的関数値

(5) 居住地の集約プロセス (ウ)

図 4 にみられるように、時期をまたぐ居住地変化のパスは多数存在する。したがって、図 1 の手順にしたがって、各期の居住地分布を固定する制約を追加して再度パレート解を計算する。代表的な計算結果として、自動運転普及率「なし」世代間分割アの目的関数値を図 8 に示す。図 8 から、各期の居住地分布を世代 2-6 が有利となるパレート解における居住地分布に固定することで実行可能領域が制限され、世代 1 の費用が大きい値に留まっており、居住地の集約時期という集約プロセスをめぐって世代間にもトレードオフが存在することがわかる。

このように居住地の集約プロセスに関しては、どの地区をできるだけ長く維持するか？をめぐる規範間のトレードオフが存在するほか、どの世代が建設費や転居費といった都市構造変換の費用を負担するか？をめぐって世代間にもトレードオフが存在することが確認できた。

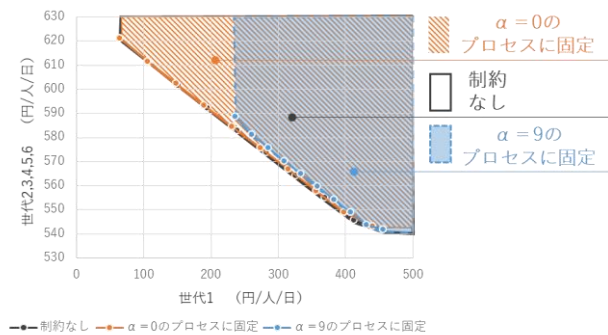


図 8 各期の居住地分布を固定した場合の世代分割の目的関数値

6. おわりに

以上の都市構造をめぐる世代間、規範間のトレードオフ構造の分析の結果、インフラ投資の判断をする上で重要な材料となるような「将来的にどこを中心地とするか」「どこを居住地とするか」といった大筋の計画では、合理的な選択肢の数は多くなく、トレードオフが強い問題ではないことがわかった。一方で、「どの居住地をいつ廃止するか」という時空間的に細かいスケールの集約プロセスの計画には選択肢が多く存在し、その選択肢をめぐってステークホルダー間にトレードオフが存在することがわかった。

以上のことから、時空間的に細かいスケールの集約計画まで全て一度に決めてしまわず、まずはトレードオ

フの存在しない大まかな時空間的スケールの計画を立てることで、インフラの投資計画等の他の政策の早期検討が可能になることが示された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 磯野昂士, 奥村誠: コンパクトシティ政策における複数の計画規範のトレードオフ構造の分析. 都市計画論文集, No. 52-3: pp. 413-420. 2017
- 7) 岩手県 平成 24 年保健福祉年報 (人口動態編) <http://www.pref.iwate.jp/hokenfukushi/toukei/019832.html> (最終閲覧: 2018 年 4 月 19 日)
- 8) Gurobi Optimizer 7.0.2 Documentation <http://www.gurobi.com/documentation/> (最終閲覧: 2018 年 4 月 19 日)

(2018.4.27 受付)

TRADE-OFF STRUCTURE OVER LONG TERM URBAN SPATIAL LAYOUTS

Koshi ISONO, Makoto OKUMURA

Infrastructures widely developed in the city so far may not be needed in the future owing to the decrease in population. From this point of view, it is important to develop methodology to clearly classify "districts to be left as the place of residence" and "district to abolish someday", to get evidence for efficient infrastructure management. In this study, we show that there are not many alternatives in the rough planning of the long term urban layout, such as CBD location and ever lasting residential districts. On the other hand, there are many alternatives in the spatially and temporally detailed scale plan, such as abolishing timings, and therefore, there is the trade-off between stakeholders related to these alternatives.