

# 都市の空間構造をめぐるトレードオフ構造の分析

Trade-off structure over urban spatial layouts

磯野 昂士\*  
Koshi ISONO

\*地域計画学研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

It is important to develop methodology to get evidence for efficient infrastructure management. In this study, it is focused on that the determination of investment for infrastructures is possible with only a rough urban plan. It is expected that there are many alternatives and there is the trade-off in the detailed scale plan, on the other hand, there are not many alternatives and less tradeoff exists in the rough plan. The objective of this study is to classify the urban planning in the spatial-temporal scales depending on presence or absence of the trade-off.

*Key Words* : urban planning, urban layouts, trade-off, compact city

## 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生じる。インフラを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、インフラが用意されるからに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。

これまで広くインフラが整備されてきた背景には、整備されたインフラが人口増加に伴う都市の発展と共に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、これまで都市内に広く用意されてきたインフラが今後も必要であり続けるとは限らない。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明確化することで、インフラ投資を効率的に行う上で重要な判断材料になるとと思われる。

都市内の地区の将来の持続可能性を判断する上で、長期的な都市構造の計画が合意されていれば問題はない。しかし、長期的な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あれば簡単には合意を得ることができず、計画を決定することは困難である。

本研究では、インフラ投資の判断材料としては、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あれば十分であることに着目する。時空間的に詳細なスケールの居住地の決定にはトレードオフがあったとしても、より大筋の計画についてはばそもそも選択肢が少なく、深刻なトレードオフが存在しない可能性もある。本研究では、都市構造の計画を時空間的スケールに分割し、選択肢が多くトレードオフがある問題と、選択肢が少なくトレードオフの少ない問題に分けることを考える。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

割の施設設置地区の空間的パターン」のことに定義する。

## 2. 本研究のアプローチ

### (1) 都市構造改革の政策進展の背景と既存研究

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)<sup>1)</sup>、小島・吉田・森田(2004)<sup>2)</sup>などがある。他方、肥後・森・谷口(2014)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ている。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。

しかし、このようなアプローチでは、「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？」は明確ではなく、都市構造をめぐるトレードオフの構造は把握されていない。

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)<sup>3)</sup>がある。複数の規範を明示的に取り上げた既存研究に青野・長尾・戸川・加藤・佐野(2011)<sup>4)</sup>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。

しかし、これらの研究でもやはり複数の規範の間のトレードオフは把握されていない。また、都市構造の変革とは長期を要するものであるため、これには幅広い世代が関わることとなる。複数の世代が同じ都市を共有しながら都市構造を変革していくというプロセスには、その選択にトレードオフが存在することが予想される。この

世代間のトレードオフについても、これまでの研究では把握されているわけではない。

(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には選択肢が多くトレードオフが存在し、大筋の計画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) 多時点における中心地の場所の決定
- (イ) 中心地の場所ごとの最終的な居住地の場所の決定
- (ウ) 各時期の居住地分布の決定

の3点に分けて取扱い、それぞれの計画問題が、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。このためには、まず様々な世代間および規範間のパレート最適となる都市構造を計算する。そして図1のような手順に従い、(ア)～(ウ)の点について識別を行う。

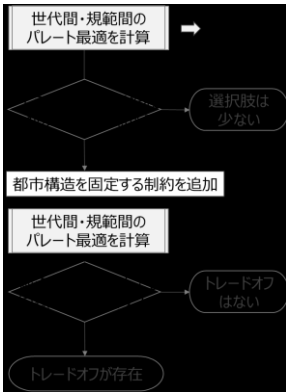


図1 計画問題の識別手順

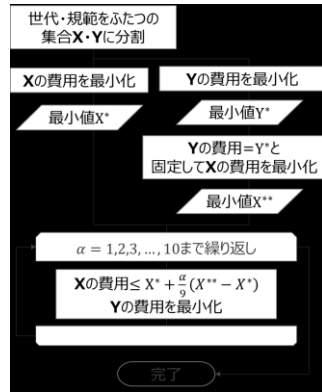


図2 パレート最適計算手順

3. パレート最適計算のための手順

(1) トレードオフ把握のためのツールの要件

都市構造の計画をトレードオフの有無によって分けるためには、複数の世代および規範の間のトレードオフの把握が必要不可欠である。そこでまず、本研究では既存研究で取り扱われてきた規範を網羅的かつ多時点に渡って取り扱い、幅広い世代および規範の間のトレードオフを把握するためのツールとなるモデルを構築する。トレードオフを把握するためには、「ある目的を達成する都市構造と他の目的を達成する都市構造は空間的に異なるかどうか」、さらにこれが異なる場合には、「ある目的の達成を仮定すると他の規範の達成はどこまで阻害されるのか」を明らかにする必要がある。そのためには、ある目的を最大限達成する都市構造とその時の目的の達成値を求めることのできる最適化モデルを用いる。

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

東北大学工学研究科土木工学専攻  
 ダー間の関係を前提として、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置い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構築する。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、住民の生活の最小限の利便性が確保されることは必要条件とする。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) 計算の条件

本研究では、都市構造の計画をトレードオフの有無によって分けることができるかどうかという結論に一般性を持たせるため、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が都心であり離れるにつれ徐々に郊外の特徴を持つと仮定する。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。

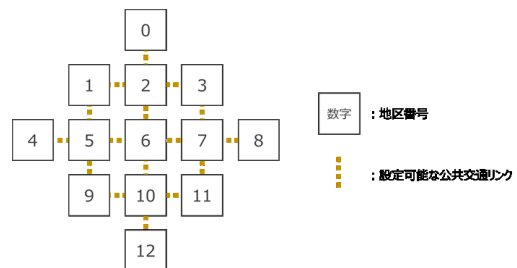


図3 計算対象の仮想都市

(3) モデルの概要

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。都市を複数の地区の集合として捉え、住民は都市内の地区に居住する。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する。都市内の一地区にのみ、都市の中心的施設が立地し、住民は一定の頻度で何らかの都市活動のために、その地区に通う必要がある。これが居住する地区と異なる場合は、何らかの交通手段で移動する必要があると仮定する。

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を考え、時期をまたぐごとに住民は次の年齢階層へ移動する。最も若い年齢階層の住民は、その次の年齢階層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、年齢階層は{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。

#### (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 $t \in T$ 、年齢階層を $e \in E$ 、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 $|F|$ などで表す。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 $i$ 別年齢階層 $e$ 別の人口を $p_{iet}$ 、地区 $i$ の中心的施設の有無を $y_{it}$ 、地区 $i$ のインフラの有無を $z_{it}$ 、路線 $l$ の公共交通の有無を $w_{lt}$ 、地区 $ij$ 間を交通手段 $m$ で移動する年齢階層 $e$ 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 $ij$ 間を転居する年齢階層 $e$ の人数を $x_{ijet}$ 、地区 $i$ の新規建設住宅量を $h_{it}$ 、地区 $i$ の中心的施設建設の有無を $\hat{y}_{it}$ 、インフラ建設の有無を $\hat{z}_{it}$ 、公共交通リンク $l$ の新規設定を $\hat{w}_{lt}$ とする。

そして、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を $GCT$ 、公共交通の単位変動費を $TVC$ 、地区間自動車移動一般化費用を $GCC$ 、公共交通リンクと路線の対応を $\delta_{ijl}$ 、地区間転居の心理的コストを $MC_{ij}$ 、住居単位建設費を $HC$ 、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 $TC$ 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金銭換算した費用を重み付けして統合化した目的関数を用いる。時期・規範ごとに費用の定式化を次の式(1)~式(4)に示す。式

(1)はインフラ運営費用、式(2)は移動費用、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。これに、2(1)で述べた設定を制約条件として追加する。本モデルの目的関数および制約条件は全て線形であり、本モデルは混合整数計画問題として定式化される。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 7.0.2を用いて計算を行う。

$$U_{et} = \sum_{i \in Z} \frac{FFC}{|E|} z_{it} \quad \forall e \in E, t \in T \quad (1)$$

$$W_{et} = \sum_{l \in L} TFC_l \cdot \frac{w_{lt}}{|E|} + \sum_{(i,j) \in I} \{(GCT + TVC) \cdot r_{ije,0,t} + GCC_{ij} \cdot r_{ije,1,t}\} \quad (2)$$

$$\forall e \in E, t \in T$$

$$C_{et} = \sum_{(i,j) \in Z^2} MC_{ij} x_{ijet} \quad \forall e \in \{E \setminus 0\}, t \in T \quad (3)$$

$$H_{et} = \left[ \sum_{i \in Z} H'_{it} + TC \sum_{l \in L} \hat{w}_{lt} \right] / |E| \quad (4)$$

$$H'_{it} = HC \cdot h_{it} + IC \cdot \hat{z}_{it} + FC \cdot \hat{y}_{it}$$

$$\forall e \in E, t \in T$$

#### 4. 都市構造の計画の分類

本モデルには6つの世代と4つの規範が含まれる。世代あるいは規範をふたつの集合に分け、双方のパレート最適を計算する。また、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4つ設定し、計算を行う。その上で、2(3)で述べた手順で分析を行う。

##### (1) (ア) 長期的な都市の中心地の場所

代表的な計算結果として図4に、世代間のパレート最適点から、各時期の居住地数と中心地の場所を点で表し、これの経時的変化パスを線で表している。自動運転の普及シナリオごとと世代集合の分別ごとに10回分の計200存在する4時点の都市構造を時期別に分け、合計800の都市構造からプロットされている。最適解として出現する都市構造には共通性がみられ、中心地の場所と居住地の数に注目すれば49通りであり、さらにその変化パスに着目してまとめると8本となる。いずれのパスでも第1期において設定された中心地の場所は変わらず、都市の広さだけが狭まっていく様子が確認できる。

したがって、長期的な中心地の場所の決定には選択肢は多数存在せず、基本的にはトレードオフが存在しない。

##### (2) (イ) 中心地の場所ごとの最終的な居住地の場所

図4の点はある時期の都市構造の居住地の数と中心地の場所を示すが、特に菱形のプロットは最終期を表す。200あるパレート最適解は、最終期の居住地は一か所に

集約される解あるいは小数の地区に集約される解が得られていることが分かる。居住地が一か所に集約される解では中心地と同一の地区に居住地が設定され、複数の地区に集約される解では中心地およびその周辺地区に居住地が設定されている。

このため、都市内の居住地について、居住地として残す地区といずれ廃止する地区とを分ける問題は、居住地として残す地区数さえ決まれば選択肢が多く存在する問題ではなく、その場所をめぐっては基本的にはトレードオフが存在しない。

### (3) (ウ) 居住地の集約プロセス

世代および規範の分け方は多数存在するが、代表的な計算結果として、世代1と世代2,3,4,5,6のパレート最適を計算した場合の計算結果を示す。図5に居住地の変遷のパスを示す。パスが複数存在するため、2(3)の手順に従い、個別の選択肢を固定した上で再度パレート最適を計算する。具体的には、各パレート最適解と同じ各期居住地分布に固定する制約を追加し、その上で再度パレート最適を計算して、居住地集約プロセスの選択が各世代の費用負担の実現可能な範囲を制限するか?ということ を明らかにする。結果を図6に示す。図中の黒点は、居住地分布を固定していない条件でのパレート最適解を表し、これに図2中の $\alpha$ を用いて、 $\alpha$ 番( $\alpha = \{0,1,2, \dots, 9\}$ )という番号をつける。色つきの点は、 $\alpha$ 番のパレート最適の各期の居住地分布を固定した場合のパレート最適解を表す。色付きのL字型の破線は対応する色の点の左端と下端を表しており、「ある居住地廃止プロセスを指定した場合に、縦軸の費用は横線まで、横軸の費用は縦線までしか最小化できない」という線を意味する。この破線の位置と黒点の存在する範囲が乖離していることから、居住地廃止プロセスを決めることは各世代の費用負担の実現可能な範囲に影響を与えるといえる。このため、居住地廃止プロセスの選択をめぐる世代間のトレードオフが存在すると言える。

## 4. おわりに

インフラ投資の判断材料としての、「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については、選択肢が多く存在する問題ではない。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計画には選択肢が多く、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。時空間的に細かいスケールの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、他の政策の早期検討につながる可能性が本研究で示された。

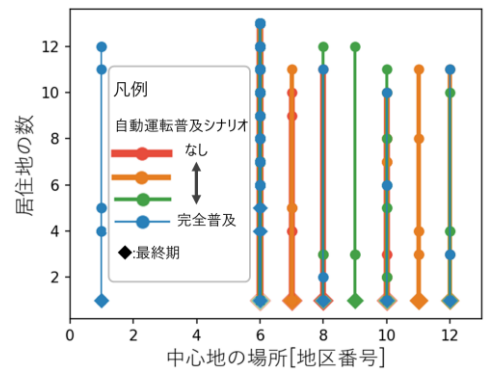


図4 中心地と居住地数の変遷

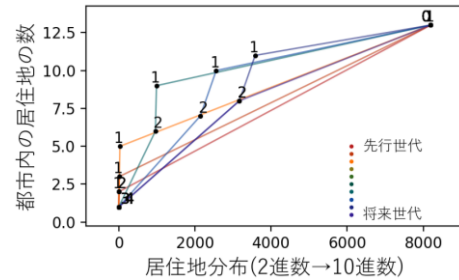


図5 居住地分布の変化パス

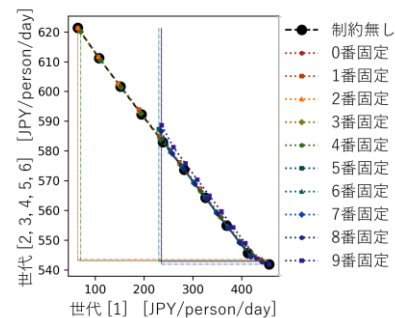


図6 居住地集約プロセス選択をめぐるトレードオフ

### 参考文献

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, 再集約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, No. 284, 2011.

(2018年2月1日提出)