

# 人口の時空間分布に基づく フロー需要施設の最適配置の研究

小川 純平<sup>1</sup>・山口 裕通<sup>2</sup>・中山 晶一朗<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:jfbd0410@stu.kanazawa-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢大学助教 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 金沢大学教授 融合研究域融合科学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

新型コロナウイルスの感染拡大により、人々の日常的な移動行動は大きく変化した。とくに、テレワーク等による就業場所の変化は、ある程度継続する可能性が高いと推測される。これは、人々の時空間分布が大きく変わることを意味し、施設配置にも影響があるものと思われる。その中でも、人々の移動の途中（フロー需要）をターゲットとして立地している商業施設・公共サービス等は、時空間分布の変化によって、配置が大きく変わる可能性がある。そこで、本研究では、フロー需要をターゲットとした施設に焦点を当て、移動行動を反映した人口の時空間分布と施設立地の関係の把握を試みる。利潤を最大化するよう流動を中継する拠点施設の配置・数を導出するフロー需要施設配置問題を混合0-1計画問題として定式化し、数値シミュレーションを行った。その結果として、人口の時空間分布が変わることに連動する施設配置構造の方向性を明らかにすることに成功した。

**Key Words** : Facility location, Flow-based demand, Spatio-temporal distribution of population, Behavioral change

## 1. はじめに

新型コロナウイルスは、2019年12月中国湖北省武漢市で世界初の感染者が確認されてから、世界中に感染拡大した。現在（2022年9月22日）に至るまで、全世界で6億人1000万人以上の感染者が確認され、死亡者は653万人に達している<sup>1)</sup>。日本においても、2020年1月16日に日本初の新型コロナウイルス感染者が確認されてから、日本全国に感染拡大し、約2000万人の感染者が確認され、死亡者は約44000人に至る<sup>2)</sup>。こうした新型コロナウイルスの感染拡大により、人々の日常的な移動行動は大きく変化した。とくに、テレワーク等による就業場所の変化の一部は、今後も継続する可能性が高いと推測される。それは、新型コロナウイルスの感染拡大の下で感染症に対応した柔軟な働き方が進んでいったためである。日比野<sup>3)</sup>らは、働き方改革の取り組みの一つであるテレワークの普及推進が、就業者の生活・行動に与える実態調査を行っている。ここで、就業者の主要な勤務先への訪問日

数の低下、郊外移住を愛好、サテライトオフィスやコワーキングスペース整備を望むことが明らかになっている。つまり、今後就業場所や居住地が大きく変化していく可能性がある。これは、人々の時空間分布が大きく変化していくことを意味し、人々の行動変化によって、施設配置にも影響があるものと思われる。

ここで、既往研究について整理する。都市構造を決める施設立地に関する研究として鈴木<sup>4)</sup>がある。鈴木<sup>4)</sup>による研究では、需要の構成変化が最適施設配置に及ぼす影響を明らかにしている。この中で、施設利用の需要のパターンとして、2種類述べられている。一つ目は、施設が移動の主目的となっている場合である。これは、住宅等から施設利用の需要が直接発生するものである。対象となる施設としては、大学等の教育機関、就業地などがある。二つ目は、施設が移動のついでに利用される場合である。これは、起点と目的地の移動上に施設利用の需要が発生することを想定している。この需要をフロー需要と呼ぶ。このフロー需要が対象となる施設としては、駅やターミナルなどの交通拠点、ショッピングセンター

やコンビニなどの商業施設、保育所やガソリンスタンドなどの公共サービス施設がある。

現在、フロー需要をターゲットとした施設は、多くの人がついでに利用しやすい（最適な）位置に立地されている。そのため、人々の時空間分布が変化することで、施設の立地も大きく変化することが考えられ、都市構造に大きな影響を与えると思われる。

そのため、新型コロナウイルスによる人々の行動変化は、フロー需要を対象とした施設の立地の変化につながり、都市構造が変化していく可能性がある。ここで、人々の行動変化による都市構造の変化を把握しておくことは、将来的な都市構造の設計において重要な参考指標となると考えられる。

そこで、本研究では、フロー需要を扱った最適な施設配置問題を作成し、人々の時空間分布の変化に対する「最適な施設配置」の変化の把握から今後の都市構造変化に対する考察を行う。そして、新型コロナウイルス禍における行動変化は、どのくらいフロー施設の最適配置の変化を引き起こしうるのか？都市構造を変化させるのか？といった疑問に答えていくことを目的とする。

## 2. モデルの提案

### (1) 分析モデルの概要

本モデルでは、ある施設タイプの商圈と必要人口を設定した上で、その施設が必要人口を満たしつつ、最大の顧客を獲得できるような施設配置を求める問題を考える。なお、このとき人々は通勤・通学等によって日常的な行動を行っていると考え、その利用者が顧客になりうるかどうかは、各店舗の商圈と重複するかどうかで考えるとする。このモデルでは、人口の居住地-勤務先分布（通勤OD表）は所与であると仮定する。この問題は、操作変数に施設を経由する流動量、拠点間の距離、そして拠点の有無の0-1変数を含み、施設ごとの必要人口を満たすという制約下で、カバーする顧客を最大化する混合整数計画問題として定式化される。

この時、解の実行可能性を保証するために、施設を利用する流動量が拠点間の流動量以下であるという制約と、商圈外からの施設を経由して移動する流動量は発生しないという制約、施設を経由する流動量が施設が配置されない拠点には発生しないという制約を置いている。なお、本研究では、個々の利用者の経路選択行動は考慮せずに全体最適となるように行動するものとするが、混雑や施設のキャパシティ等は考慮しないために、個人の行動範囲の中に商圈が重複する施設がある場合、最も近い施設が選択されることとなる。

### (2) フロー需要を扱う最適施設配置問題の定式化

本節で具体的な定式化について述べていく。ネットワーク空間で表される2次元都市を想定することとする。

外生的に与える変数は以下のとおりである。出発地（居住地）ノード*i*と着地（目的地）ノード*j*間の距離を $d_{ij}$ 、流動量 $L_{ij}$ とする。施設が一人当たり得ることができる利益を $P$ 、施設を配置する際にかかる費用を $C$ とする。さらに、追加移動許容量（施設の利用のためにかけることができる追加の移動限度）を $R$ とする。

内生変数は施設を経由する流動を表す変数と、施設を経由する際にかかる総移動距離を表す変数、施設配置の有無を表す0-1の変数の合計3つの変数である。拠点*i*から拠点*j*へ施設*k*を経由する流動量を $w_{ijk}$ 、拠点*i*から拠点*j*へ施設*k*を経由する際にかかる総移動距離を $d_{ik} + d_{kj}$ 、候補地*k*における施設の有無を $y_k$ とする。

以上の変数を用いてモデルを定式化していく。施設の利潤を最大化するフロー需要施設配置を求める問題は、

$$\max_{w_{ijk}, y_k} \quad Z = \sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} \sum_{k \in K} P w_{ijk} - \sum_{k \in K} C y_k \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in K} w_{ijk} \leq L_{ij}, \quad \forall i, j, k \quad (2)$$

$$w_{ijk} = 0, \quad \text{if} (d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}) > R \quad (3)$$

$$0 \leq w_{ijk} \leq M \cdot y_k, \quad \forall i, j \quad (4)$$

となる。ただし、

$M$  : 十分に大きな値 ( $L_{ij}$ の最大値)

である。制約式について述べていく。施設を経由して移動する流動量は、拠点間の流動量の範囲内にある必要があり、制約式(2)のように定式化する。制約式(3)は設定した商圈より外側の拠点から施設を利用する客が来ないことを表す。加えて、施設を配置しないとき、その拠点を經由して移動する流動量は0である必要があるため、これを十分に大きな定数 $M$ を用いて制約式(4)のように定式化している。

## 3. モデルを用いた数値シミュレーション

本章では、上述したモデルを用いて、人口の空間の分布に対する施設配置の特徴を考えていく。

### (1) 分析概要

#### a) 想定するネットワーク

本研究では、図1に示すような3x3の9拠点で構成されたシンプルな仮想ネットワークを考える。将来的には、メッシュ単位の人口データを活用する予定であり、本稿では、その予備解析としてこのような仮想ネットワークの分析を行う。

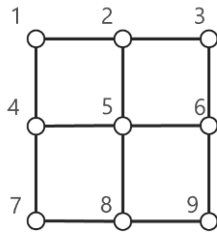


図1 シミュレーションで用いた仮想ネットワーク

b) 人口の通勤 OD 表の設定

各拠点の夜間人口（居住量）と昼間人口（通勤・流動量）を以下の表 1 のように設定した。夜間人口はどの拠点も変わらず 10 に設定し、昼間人口は、中心部である拠点 5 が多くなっている。これは、中心部である拠点 5 に他の拠点から人々が移動してくることを表している。

表 1 人口 OD 表の設定

	夜間人口	昼間人口
拠点 1	10	5
拠点 2	10	7
拠点 3	10	8
拠点 4	10	5
拠点 5	10	38
拠点 6	10	7
拠点 7	10	5
拠点 8	10	7
拠点 9	10	8

c) 拠点間 OD 需要の設定

b) で設定した各拠点の夜間・昼間人口 OD 表から各拠点間の OD 需要を以下の図 2 のように仮定した。成分  $(i, j)$  は拠点  $i$  から拠点  $j$  への流動量を表している。横ベクトルの和は各拠点の居住量（夜間人口），縦ベクトルの和は各拠点への通勤・流動量（昼間人口）を表している。対角成分は、夜間と昼間の滞在量が同じである人口量を表している。つまり、居住地近辺で昼間の時間を過ごす人を想定している。

	昼間滞在地									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	和
1	0.93	0.93	0.86	0.66	4.10	0.65	0.54	0.65	0.67	10
2	0.58	1.15	0.93	0.48	4.44	0.67	0.41	0.67	0.66	10
3	0.52	0.89	1.44	0.45	3.95	0.89	0.40	0.63	0.83	10
4	0.60	0.68	0.68	0.85	4.55	0.68	0.60	0.68	0.68	10
5	0.40	0.69	0.65	0.50	5.32	0.69	0.40	0.69	0.65	10
6	0.41	0.66	0.93	0.47	4.39	1.14	0.41	0.66	0.93	10
7	0.54	0.65	0.67	0.66	4.10	0.65	0.93	0.93	0.86	10
8	0.41	0.67	0.66	0.48	4.44	0.67	0.58	1.16	0.93	10
9	0.40	0.63	0.83	0.45	3.95	0.89	0.52	0.89	1.44	10
和	5	7	8	5	38	7	5	7	8	

図2 各拠点の OD 需要

(2) シミュレーション結果

本節で、(1) で述べた設定の下、シミュレーションを実施した結果を述べる。

以下の図3は、横軸に追加移動の許容量である  $R$ ，縦軸に必要商圏人口  $C/P$ （施設がサービスを提供するために必要となる人数）をとり、許容できる追加移動の限度と様々な商業規模ごとの施設配置の傾向をまとめた。

この図を見ると、まず必要商圏人口が低い施設（小規模施設）の場合、追加の移動距離に関わらず、中心部とその隣の2拠点に施設が配置された。次に必要商圏人口が30, 40人の施設（中規模施設）では、許容できる追加の移動が小さいとき、中心部の1箇所のみで施設が配置された。一方で、より追加移動が許容できる際には小規模施設と同様、中心部とその隣の2拠点に施設が配置された。必要商圏人口が50以上（大規模施設）では、配置がされないという結果が得られた。これは、人口分布の設定で、想定したネットワークにおける人口の全体が90と小さかったことが原因である。また、結果として商業規模に関わらず、流動量が多くなる中心部に施設が配置されやすい傾向があることが確認された。

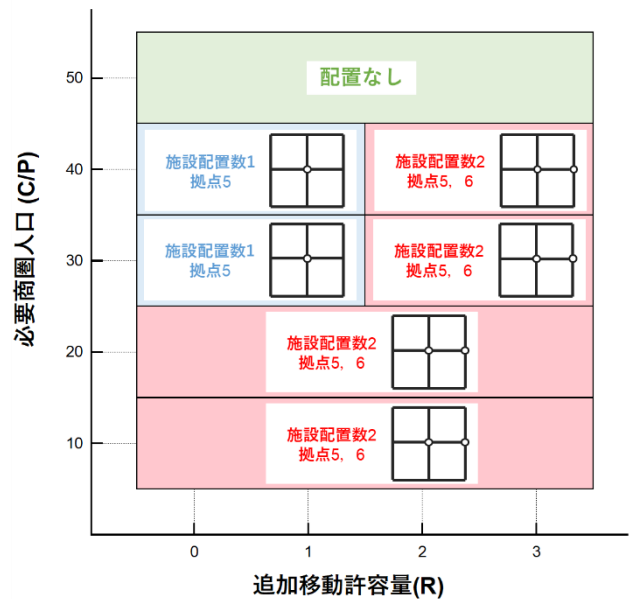


図3 追加移動の許容量と商業規模ごとの施設配置結果

4. 中心部への流動量を減少させた数値シミュレーション

本章では、3章で行ったシミュレーションから、中心部への流動量を減少させた場合における施設配置の変化を考えていく。このような変動は、新型コロナウイルス禍で起き、新たな働き方により今後も起きる可能性があると考えられる。こうした行動変化に対する施設配置の変化の把握を試みる。

(1) 分析概要

a) 人口 OD 表の設定

各拠点の夜間人口（居住量）と昼間人口（通勤・流動

量)を以下の表2のように設定した。夜間人口は、3章と変わらずどの拠点も10に設定している。昼間人口は、中心部である拠点5への他の拠点からの流動量を減少させた。これは、テレワーク等による人々の行動変化など今後も継続的に起こるであろう変動を表している。

表2 人口OD表の設定

	夜間人口	昼間人口
拠点1	10	8
拠点2	10	9
拠点3	10	9
拠点4	10	8
拠点5	10	21
拠点6	10	9
拠点7	10	8
拠点8	10	9
拠点9	10	9

b) 拠点間OD需要の設定

a)で設定した各拠点の夜間・昼間人口OD表から各拠点間のOD需要を以下の図4のように仮定する。

		昼間滞在地									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	和
居住地	1	1.45	1.16	0.95	1.03	2.21	0.82	0.84	0.82	0.73	10
	2	0.95	1.52	1.07	0.78	2.50	0.88	0.67	0.88	0.76	10
	3	0.83	1.14	1.61	0.72	2.18	1.14	0.64	0.81	0.93	10
	4	0.96	0.88	0.77	1.36	2.53	0.88	0.96	0.88	0.77	10
	5	0.71	0.97	0.79	0.87	3.21	0.97	0.71	0.97	0.79	10
	6	0.67	0.87	1.07	0.78	2.49	1.51	0.67	0.87	1.07	10
	7	0.84	0.82	0.73	1.03	2.21	0.82	1.45	1.16	0.95	10
	8	0.67	0.88	0.76	0.78	2.50	0.88	0.95	1.52	1.07	10
	9	0.64	0.81	0.93	0.72	2.18	1.14	0.83	1.14	1.61	10
和		8	9	9	8	21	9	8	9	9	

図4 各拠点のOD需要

(2) シミュレーション結果

(1)で述べた設定の下シミュレーションを実施した結果を述べる。以下の図5に許容できる追加移動の限度と様々な商業規模ごとの施設配置の傾向をまとめた。

図5を見ると、まず必要商圏人口が10以上の施設の場合、追加移動の許容量に関わらず、3拠点到施設が配置された。加えて、許容できる追加移動が多くなると中心部である拠点5ではなく、郊外の拠点到施設が配置されるようになった。次に、必要商圏人口が20以上の施設の場合、許容できる追加移動が小さいとき、中心部への流動量を減少させる前と同様、中心部とその隣の2拠点到施設が配置された。許容できる追加移動が大きい場合、中心部と郊外を含む3拠点到施設が配置された。これから、小規模施設の施設配置の傾向は、中心部への流動量を減少させる前と比べ、中心部以外の郊外の拠点到施設も配置されるようになり、また、配置数も増える傾向にあることが確認された。

一方で、必要商圏人口が30以上の施設は、配置されな

いという結果が得られた。大規模な施設が配置されにくい傾向にあることが確認された。ここから、新型コロナウイルス禍の行動変化により商圏に来る人数が減少したことで、施設配置が変化し施設を利用できない方々が増加することが分かる。このように、本研究のモデルを用いると、人口の居住-勤務OD表の変化を用いて、一定の条件を満たす施設へのアクセス可能性の変化を推定することができる。

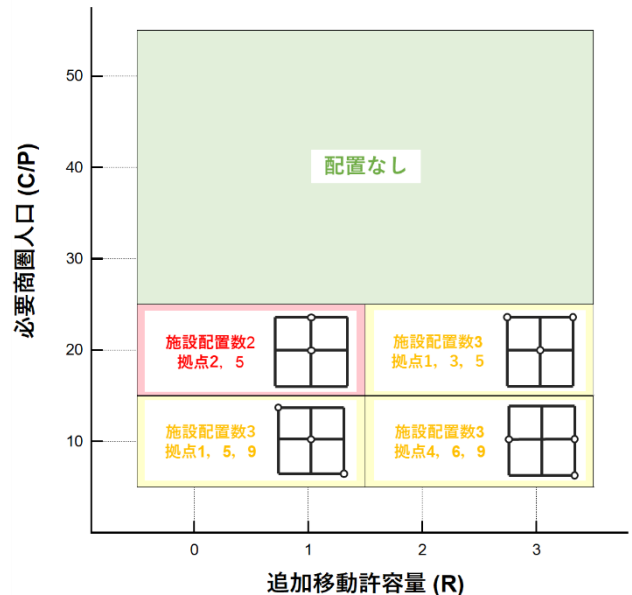


図5 追加移動の許容量と商業規模ごとの施設配置結果

5. おわりに

本研究では、人々の移動の途中（フロー需要）をターゲットとする施設に焦点を当て、テレワーク等による就業場所の変化など、新型コロナウイルスの感染拡大から今後も継続的に起きるであろう人口の時空間分布の変化に対する施設配置の変化の把握するために、フロー需要施設配置問題を定式化したのち簡単な仮想ネットワークで数値シミュレーションを行った。

まず、2章で述べたモデルを用いて、3×3の9地点の仮想ネットワークにおける追加移動の許容量と商業規模ごとの施設配置の変化を分析した。その結果、商業規模に関わらず、他拠点からの流動量が多くなる中心部に施設が配置されやすい傾向にあることが分かった。また、多くの商圏人口が必要になる大規模な施設は配置されにくい傾向にあることが確認された。

次に、中心部への流動量を減少させた場合の数値シミュレーションを行った結果、流動量を減少させる前と比べ、小規模な施設は中心部以外の郊外の拠点到施設も配置されるようになり、また、配置数も増える傾向にあることが確認された。一方で、中規模以上の施設は配置

されないといった結果が得られ、ここから、中心部への流動が減少したことで施設配置が変化し、施設を利用できず困る人が増加するのではないかと考えられる。

今後は、携帯電話位置情報によるモバイル空間統計データといった実データを活用した分析を行っていく方針である。最終的には、金沢市、富山市、東京都など様々な都市規模の地点で分析を行い、地点の違いによる施設配置の変化の特徴・パターンを把握することを目標とする。

#### 参考文献

- 1) 新型コロナウイルス感染 世界マップ：日本経済新聞  
 < <https://vdata.nikkei.com/newsgraphics/coronavirus-world-map/> > (参照 2022-09-22)
- 2) 東洋経済オンライン 新型コロナウイルス 国内感染の状況 <<https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/>> (参照 2022-09-22)
- 3) 日比野直彦, 坂本雅彦, 奥ノ坊直樹, 森地茂：働き方の変化が通勤行動と就業場所・居住地選考に与える影響の把握に向けた基礎的分析, 土木学会論文集 D3, Vol.75, No.5, I\_627-I\_640, 2019.
- 4) 鈴木勉：フロー需要に基づく施設配置モデルと需要構成が施設配置に与える影響, 第 37 回日本都市計画学会学術研究論文集, 2002.
- 5) モバイル空間統計 <<https://mobaku.jp/about/>> (参照 2022-09-28)

(2022.09.30 受付)

### Based on the spatio-temporal distribution of population Optimal location of flow-based demand facilities

Junpei OGAWA, Hiromichi YAMAGUCHI and Shoichiro NAKAYAMA

The spread of the novel coronavirus has greatly changed people's daily mobility behavior. In particular, it is highly likely that changes in the location of workplaces due to teleworking, etc., will continue to some extent. This means that the spatio-temporal distribution of people will change significantly, and this is expected to have an impact on the layout of facilities. In particular, commercial facilities and public services targeting people in the middle of their journeys (flow-based demand) are likely to change their locations significantly due to changes in the spatio-temporal distribution of people. In this study, we focused on facilities targeting flow demand and attempted to understand the relationship between the spatio-temporal distribution of the population and the location of facilities, which reflects travel behavior. We formulated the flow demand facility location problem as a mixed 0-1 programming problem to derive the location and number of facilities that relay the flow to maximize the profit, and conducted numerical simulations.