

### 31. 高速交通路が都市空間構造に与える影響について

- 逐次型施設配置モデルを用いた分析 -

On the Effect of Fast Transportation Routes on Urban Spatial Structure

- An Analysis Using Conditional Facility Location Models -

鈴木 勉\*

Tsutomu Suzuki\*

Fast transportation routes such as railways and highways in a city have an effect on locational decision making and urban spatial structure. This paper investigates optimal locational pattern of focal points in several ideal cities with fast transportation routes using conditional facility location models that minimize total travel distance. Optimal solutions with seven patterns of fast transportation routes are compared for two types of location model: traditional  $p$ -median model and flow-demand  $p$ -median model. Results show that fast routes significantly affect locational patterns, especially for flow-demand models. Travel speed on fast routes also plays an important role in deciding optimal location. We observe that rectangular lattice and orbital route can reduce the concentration at the center and that hierarchical structure of facility location in flow-demand setting.

**Keywords:** facility location, flow, transportation network, fast route, urban spatial structure

施設配置, フロー, 交通網, 高速交通路, 都市空間構造

#### 1. はじめに

鉄道や道路などの交通路は、都市軸となって都市の空間構成を様々に規定し、都市構造を決定する重要な要素となる。とりわけ我が国の大都市圏では、都市の成長、都市域の拡大に伴って、その地理的範囲の拡大を補うように、鉄道や地下鉄、都市高速道路等の交通路（本稿では**高速交通路**と呼ぶ）が整備され、それが都市内の移動時間を一定水準に保つ機能を果たすとともに、拠点形成に影響を与えてきた。

高速交通路の存在は、都市内の移動時間を短縮する効果を持つが、同時に、最短時間移動経路を変える効果も持ち、ひいては都市における流動量分布にも影響を及ぼす。したがって、都市内の拠点施設的最適配置も高速交通路の有無によって異なるものとなると考えられる。もっと具体的に言えば、高速交通路は、その近隣の施設の圏域を広げる効果がある一方、施設にやってくる利用者数を増やす効果も持つ。前者には、ストロー効果という言葉に代表されるように、施設の必要数を減少させる働きがあるが、後者には、新線開発による鉄道駅周辺への集積に見るように、施設の集中を促進する働きがあると考えられる。

本論文では、これを施設配置モデルによって説明することを考える。すなわち、最寄りの施設利用を仮定する一般のミニサム型施設配置問題では、高速交通路は近隣の施設の圏域を広げる効果がある一方、移動の途中で施設に立ち寄ることを考えたフロー需要を対象とした施設配置問題では、高速交通路は近隣の施設利用者数を増加させる効果がある。鈴木<sup>5)6)</sup>は均一な需要を仮定して、両者の問題の解はともに均等な配置パターンとなるが異なること、後者の問題では流動量分布に対応して中心に近い施設ほど利用者数

が多くなること、容量制約の考慮により中心部の施設必要数が多いことを説明できることを示した。しかし、高速交通路の効果の違いに着目した分析はなされていない。

このような観点から、本論文では、逐次型の  $p$ -median 問題およびフロー需要  $p$ -median 問題を用いて、高速交通路が最適な施設配置や補足する需要によってできる空間構造に与える影響を明らかにする。逐次型の意味、及びその問題を扱う理由については後ほど詳しく説明する。

#### 2. 逐次型施設配置モデル

##### 2. 1 $p$ -median 問題とフロー需要 $p$ -median 問題

需要が地点毎に与えられたとき、最寄りの施設を利用する場合のミニサム型施設配置問題である  $p$ -median 問題は、 $v_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) を需要点、 $a_k$  ( $k=1, \dots, l$ ) を施設候補地として、以下のように表される。

$$\min_{x_{ik}, y_k} z = \sum_{i,k} w_i d_{ik} x_{ik} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k x_{ik} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

$$x_{ik} \leq y_k, \quad \forall i, k \quad (3)$$

$$\sum_k y_k = p \quad (4)$$

$x_{ik} \in \{0,1\}$ : 地点  $i$  の需要の施設候補地  $k$  への配分

$y_k \in \{0,1\}$ : 施設候補地  $k$  における施設の存在

$w_i$ : 地点  $i$  の需要量

$d_{ik} \equiv d(v_i, a_k)$ : 地点  $i$  の需要が施設  $k$  を利用する時の最短距離

$p$ : 施設数

\*正会員 筑波大学 (University of Tsukuba)

一方、需要がフローとして与えられたとき、施設までの立ち寄りのための迂回距離を含めた総移動距離が最小になるような施設を利用する場合のミニサム型施設配置問題である Hodgson<sup>3)</sup>, Berman<sup>1)</sup>等によって定式化されたフロー需要  $p$ -median 問題は、以下のように表される。

$$\min_{x_{ijk}, y_k} z = \sum_{i,j,k} w_{ij} d_{ijk} x_{ijk} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k x_{ijk} = 1, \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$x_{ijk} \leq y_k, \quad \forall i, j, k \quad (7)$$

$$\sum_k y_k = p \quad (8)$$

$x_{ijk} \in \{0,1\}$  :  $ij$  間のフローの施設候補地  $k$  への配分

$y_k \in \{0,1\}$  : 施設候補地  $k$  における施設の存在

$w_{ij}$  :  $ij$  間のフロー需要量

$d_{ijk} \equiv d(v_i, a_k) + d(v_j, a_k)$  :  $ij$  間のフローが施設  $k$  を利用する場合の最短距離

$p$ : 施設数

フロー需要  $p$ -median 問題は 1-stop multiple allocation  $p$ -hub median 問題とも同じ問題であり<sup>4)</sup>、これは  $p$ -median 問題に帰着するが、フローの起終点数が増大すると大規模な問題になって多大な計算時間を要し、本論文で対象とする問題を実行可能な時間内に解くことは困難である。

### 2. 2 逐次型 $p$ -median 問題と逐次型フロー需要 $p$ -median 問題

そこで本論文では、短い計算時間で求解可能なこれらの問題の逐次型問題(それぞれ逐次型  $p$ -median 問題, 逐次型フロー需要  $p$ -median 問題と呼ぶ)を考える。すなわち、最初に1個の施設を配置した後、既設の施設配置は所与とした上で、新たに施設を1個ずつ、施設総数が  $p$  個になるまで追加していく問題である。一般に、 $m$  個の所与の施設配置のもとで  $p$  個の施設を総移動距離が最小となるように追加して配置する問題は、Berman and Simchi-Levi により条件付  $p$ -median 問題として以下のような解法が示されている<sup>2)</sup>

- (i)  $p$ -median 問題(1)~(4)において、新たな需要点  $v_0$  および新たな施設候補地  $a_0$  を追加する。
- (ii)  $v_0$  には任意の正の需要  $w_0$  を与える。

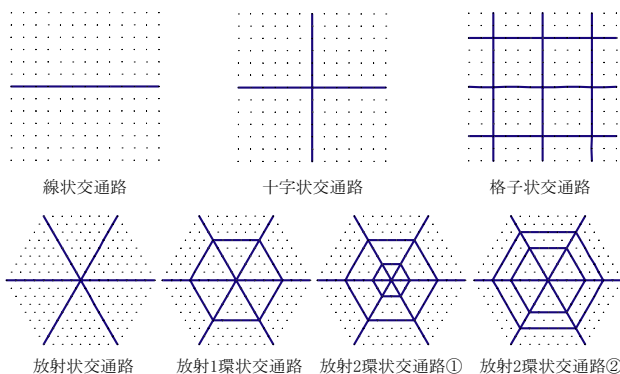


図1 仮想都市空間

- (iii) 距離を  $d(v_0, a_0) = 0$ ,  $d(v_0, a_k) = M$  ( $k=1, \dots, l$ ),  $d(v_i, a_0) = \min_k \{d(v_i, u_k)\}$  ( $i=1, \dots, n$ ) と設定する。但し、 $u_k (k=1, \dots, m)$  は既設の施設の位置を表し、 $M$  は十分大きな数とする。

- (iv) 以上の設定で  $(p+1)$ -median 問題を解く。  $a_0$  は  $v_0$  に対応して必ず施設が配置され、全ての  $u_k$  に施設が配置されることを意味する。  $a_0$  以外の解が追加する  $p$  個の施設の位置である。

フロー需要  $p$ -median 問題に対しても同様に、条件付フロー需要  $p$ -median 問題を定義できる。この解法を用いて、追加施設数  $p$  を1と読み替え、所与の施設数  $m$  を0から順次  $p-1$  まで増やしながら繰り返し適用することによって、2つの逐次型配置問題を解く。なお、需要は前者では需要点に一樣に、後者では全2点間のフローに一樣に発生するものとする(すなわち  $w_b, w_j$  は全て1とする)。

## 3. 仮想都市における最適施設配置と高速交通路の影響

### 3. 1 仮想都市空間

本論文では、形状による結果の差違を明らかにするため、図1のように、正方格子状に並んだ169個の需要点(かつ施設候補地)からなる正方形、三角格子状に並んだ217個

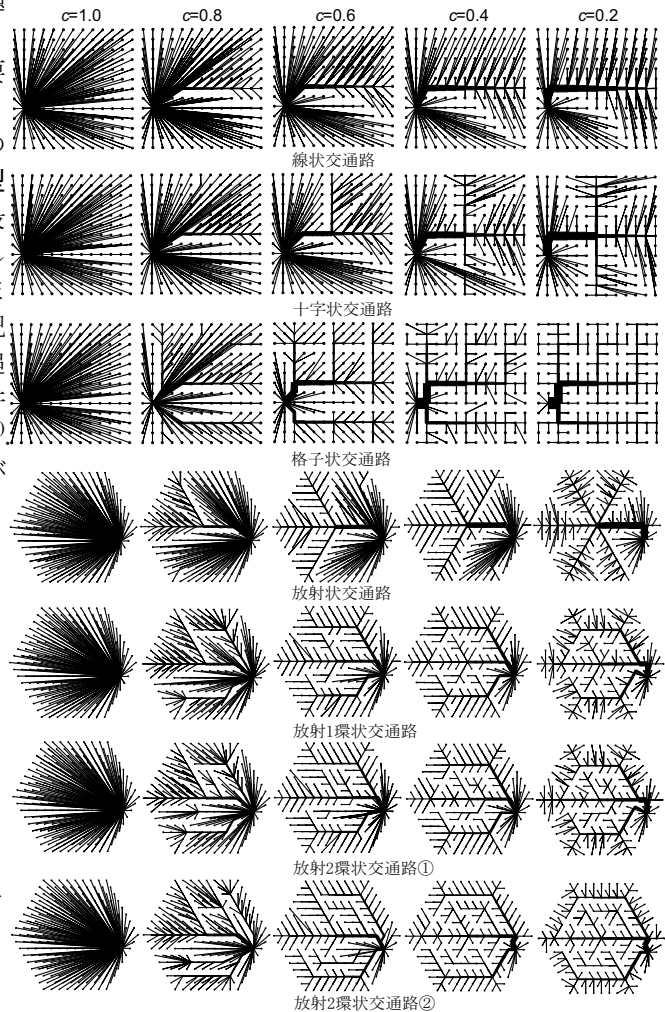


図2 最短経路

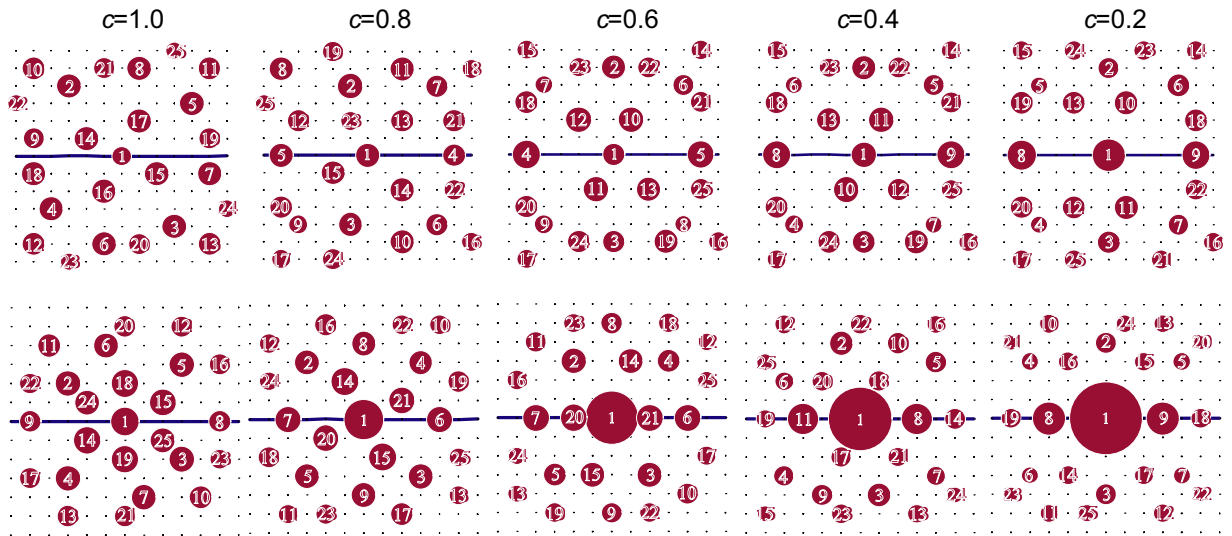


図3 線状交通路での逐次型 $p$ -median問題(上), 逐次型フロー需要 $p$ -median問題(下)の解( $p=25$ )

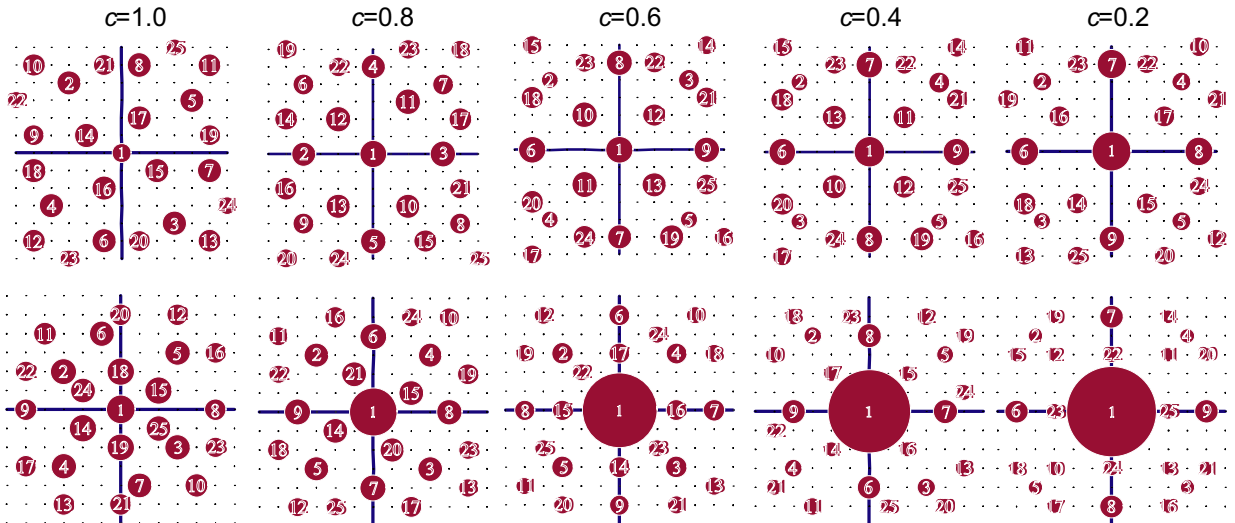


図4 十字状交通路での逐次型 $p$ -median問題(上), 逐次型フロー需要 $p$ -median問題(下)の解( $p=25$ )

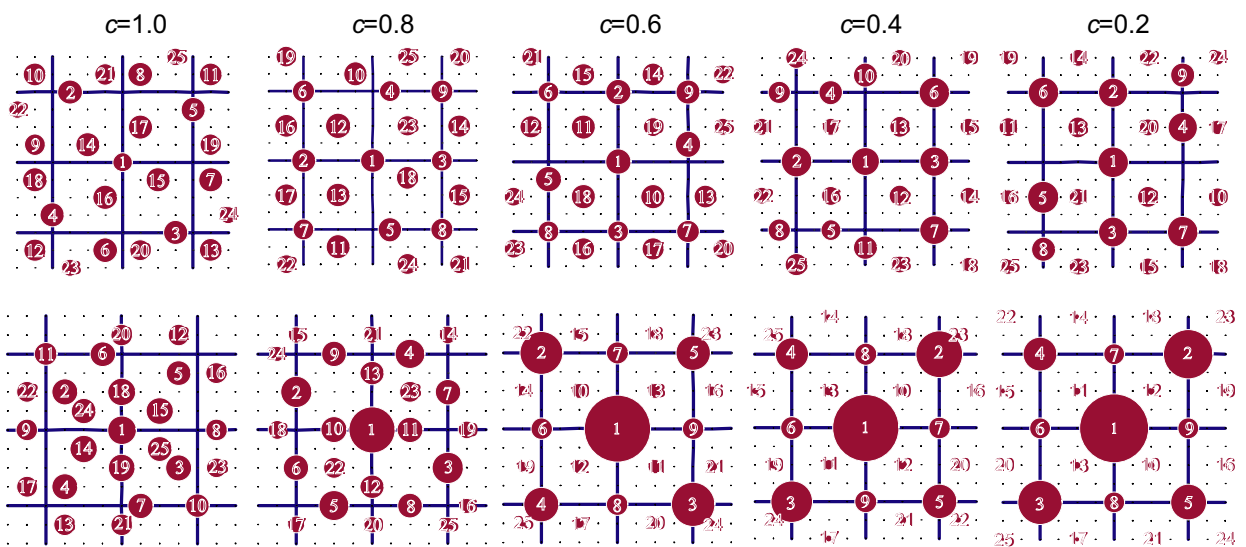


図5 格子状交通路での逐次型 $p$ -median問題(上), 逐次型フロー需要 $p$ -median問題(下)の解( $p=25$ )

の需要点からなる正六角形の仮想都市空間を考える(各需要点の位置は格子点から少しずつずらしている). クロスポイント(CP)への集積や格子状網や環状路の分散効果を調べるために, 正方形の仮想都市には線状, 十字状, 格子状の高速交通路を有する場合3種類を, 正六角形の仮想都市には, 放射状, 放射1環状(放射状に1本の環状路が入ったもの, 環状路の位置はほぼ藤田・鈴木<sup>7)</sup>による最適配置), 放射2環状の2パターン(①は放射1環状に中心部近くに環状を加えたもの. ②は藤田・鈴木<sup>7)</sup>の最適配置とほぼ同じパターン)の高速交通路を有する場合4種類, 計7種類を考える.

### 3. 2 高速交通路による最短時間経路の変化

さらに, 一般の交通路は全方向に稠密に存在するものとし, 2点間はそれらを結ぶ直線上を移動できるとする. また, 高速交通路上の移動時間は一般のリンク上の  $c$  倍 ( $0 < c < 1$ ) で済むものとする ( $c$  は一般交通路に対する高速交通路の速度の逆数). 2点間の移動経路は, 一般交通路のみの経路および, 需要点を高速交通路へのアクセス・イグレス

スを行う地点(アクセス・イグレス点と呼ぶ)とする高速交通路経路のうち, 最短移動時間をもたらす経路とする. 同じ2点間の経路でも  $c$  に応じてアクセス・イグレス点は変化し, Snell の法則に従って高速交通路の速度に応じて出発点からアクセス点までの経路と高速交通路とのなす角度が決定される. 各仮想都市空間におけるある出発点からの最短時間経路を図2に示す. 線の太さは流動量に比例している. 高速交通路の速度が速くなるにつれて, 流動は高速交通路に引き寄せられていく様子がわかる.

### 3. 3 最適施設配置

高速交通路の各パターンについて,  $c$  を 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 と変化させ, 施設数が  $p=25$  となるまで両問題を解いた結果を図3~図9に示す(数字は順序を表す). 各図の上段は逐次型  $p$ -median 問題, 下段は逐次型フロー需要  $p$ -median 問題の解である. 円の大きさは施設利用者数を表している.  $c=1.0$  の場合は高速交通路の影響はないので, そのパターンに依らず同一の結果となるが, 鈴木<sup>7)</sup>により明らかとされ

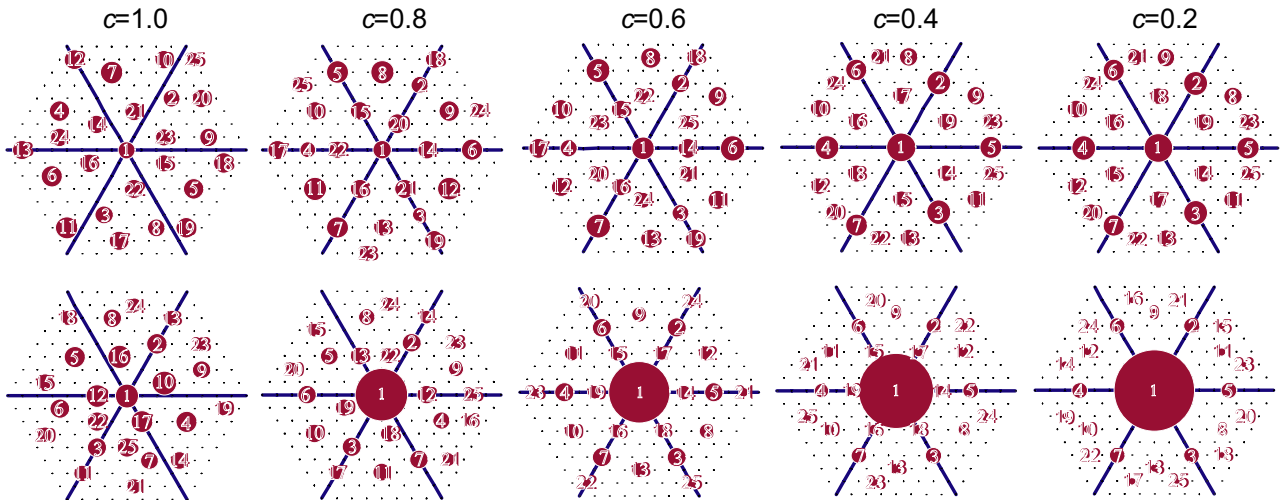


図6 放射状交通路での逐次型  $p$ -median 問題(上), 逐次型フロー需要  $p$ -median 問題(下)の解 ( $p=25$ )

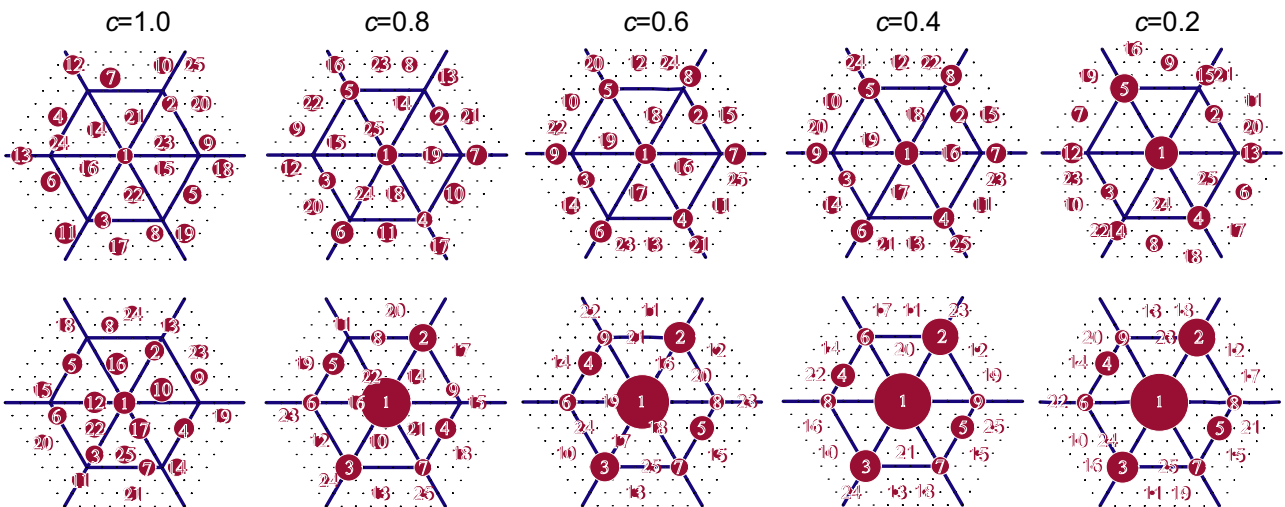


図7 放射1環状交通路での逐次型  $p$ -median 問題(上), 逐次型フロー需要  $p$ -median 問題(下)の解 ( $p=25$ )

たように、 $p$ -median, フロー需要  $p$ -median の両問題とも概ね様な配置となる。しかし、高速交通路の速度が速くなるにつれ、そのことが最適配置に影響を及ぼす。高速交通路のパターン毎に異なる最適配置の特徴が見られるが、共通して以下の点が指摘できる。

逐次型  $p$ -median 問題では、高速交通路上への施設立地により圏域を広げることのできる施設が現れ、その周辺の施設密度は減少するが、高速交通路上に立地した施設が獲得する利用者数は他の施設より若干多いだけである。

一方、逐次型フロー需要  $p$ -median 問題では、高速交通路が施設立地を引き寄せる傾向が明確に見られ、施設が高速交通路上に立地するケースが多く見られると同時に、そうした施設の引き寄せる利用者数は大きく、高速交通路上にない施設との間に大きな格差が生じる。特に、領域の中心部(都心)に利用者が集中する傾向が顕著である。そして、利用者数の大小による空間的階層構造が表現されている。

### 3. 4 線状・十字状・格子状交通路での最適施設配置

図3～図5の正方形仮想都市における線状、十字状、格

子状の高速交通路を有する場合の最適施設配置を詳しく見ると、いずれのパターンでも高速交通路の速度が速くなる( $c=0.8\sim 0.2$ )と施設が高速交通路に引き寄せられていることがわかる。配置順序には明確なパターンはないが、まず中心に置かれた後、交通路上にない地域をカバーするように配置され、比較的早い段階で交通路上に置かれるケースが多い。高速交通路上に立地する施設に集まる需要の量は  $p$ -median ではそれほど大きくはないが、フロー需要  $p$ -median では顕著に大きく、特に中心の施設に集中する。その集中度は線状より十字状の方が顕著であるが、格子状では中心以外の格子点に分散され、中心の施設への集中は緩和される。中心から遠ざかるほど、線状ではその大きさは小さくなるが、十字状では後背地が扇状に広がっていくため、中心から遠い方が需要の大きい施設が見られる。これによって、施設の階層構造パターンが形成される。格子状では必ずしも格子点(CP)に施設が立地するとは限らないが、これは問題が逐次型であるためであると考えられる。フロー需要  $p$ -median で速度が速い場合( $c=0.6\sim 0.2$ )では、高

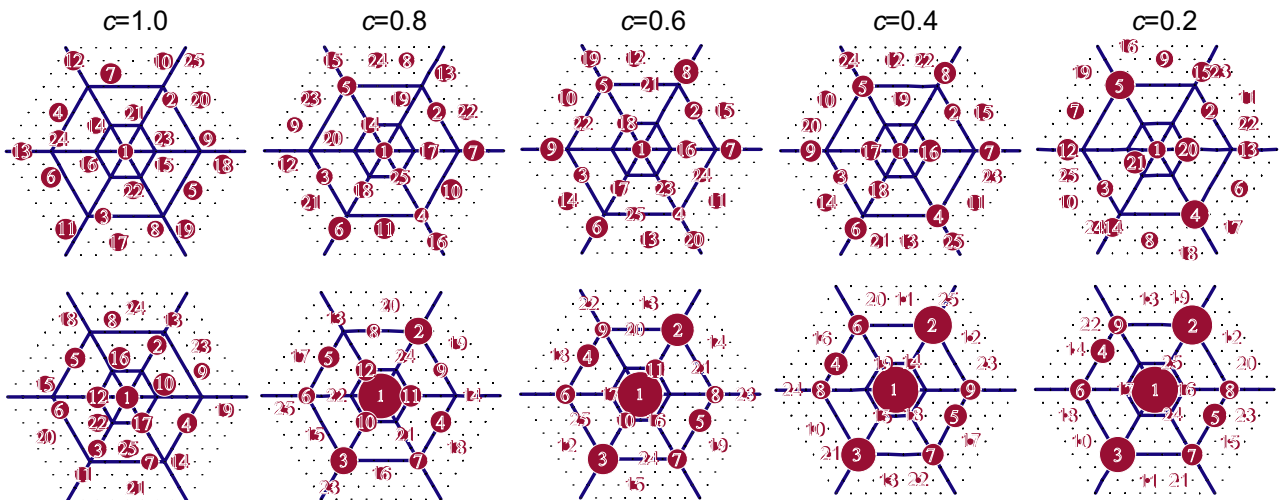


図8 放射2環状交通路①での逐次型  $p$ -median 問題(上), 逐次型フロー需要  $p$ -median 問題(下)の解( $p=25$ )

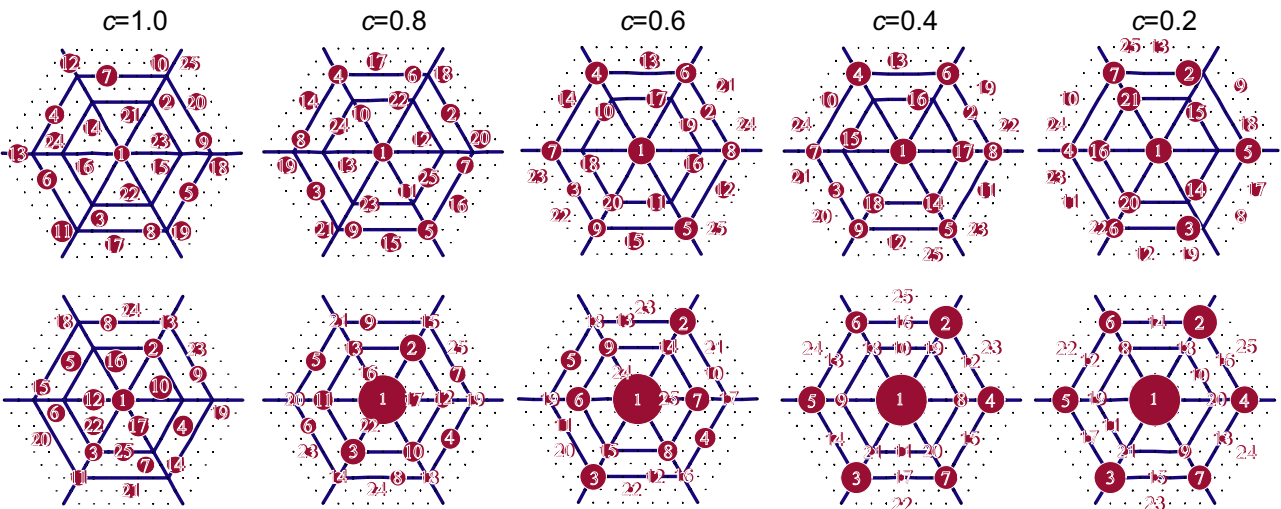


図9 放射2環状交通路②での逐次型  $p$ -median 問題(上), 逐次型フロー需要  $p$ -median 問題(下)の解( $p=25$ )

速交通路上の施設は全て格子点に立地している。

### 3. 5 放射・放射1環状・放射2環状交通路での最適施設配置

図6～図9の正六角形の仮想都市における放射状、放射1環状、放射2環状①②の高速交通路を有する場合の最適施設配置を詳しく見ると、高速交通路上への施設の立地と需要の集中については前記と同様の特徴が見られる。高速交通路の速度が速くなると施設が高速交通路上に配置されるが、速度が速くなるにつれて高速交通路上の施設の数は少なくて良いようになる。放射状では、環状路がなくても放射路上に副都心のようなパターンが形成される。放射環状は副都心への施設立地と需要の集中を促進し、中心の施設への集中を緩和する働きを持つ。しかし、放射1環状と放射2環状を比較すると、環状路が複数になっても中心の施設への集中緩和にはほとんど寄与しないことがわかる。放射2環状①は東京の山手線のような中心に近い環状路上への集積を調べることを意図しているが、フロー需要  $p$ -median の解を見ると、高速交通路上の速度がそれ程速くない場合は相応の集中が見られる。しかし、中心部付近の集積のパターンは放射1環状や放射2環状②の場合と大差ない。2つの環状路の位置の違いによる解の違いは、むしろ周辺の需要集中が高速交通路の結節点に引き寄せられることに現れる。高速交通路上の速度が速くなるほど、より外側の環状路への集中が促進される。

### 3. 6 高速交通路の形状・速度との関係

十字状交通路や放射状交通路では、セクターの後背地が扇状になるため、郊外に中央の施設に次ぐ副次的拠点が形成され、全体として施設の階層構造が生じる。このことは、空間が2次元平面上に展開していることによるものであり、都市空間の持つ特徴と理解できる。また、格子状や放射環状は中心を通らない高速交通路があるため、結節点が中心以外に現れ、その相対的な地理的優位性が周辺への分散と中心への集中緩和をもたらす。

また、高速交通路の速度が速くなるほど、いわゆる「ストロー効果」が見られ、その傾向は  $p$ -median に比べてフロー需要  $p$ -median の方が著しく、より少数の特定の施設への集中が顕著である。すなわち、高速交通路上に配置される施設の「集客力」はフロー需要  $p$ -median の方が強く、そのために鮮明に施設の階層構造が表現されている。

なお、施設数  $p$  が 25 以外の場合の配置パターンについても議論すべきであるが、本論文の解は逐次型の問題についてのものであり、基本的な解の特徴は  $p$  に依らずほぼ同じである。むしろ逐次型でない解とどの程度一致するかということの検証が課題として残されている。

## 4. 結論と今後の課題

本論文では、高速交通路が都市活動の分布に与える影響を最適配置問題から分析することを試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

①高速交通路の存在は最適配置に影響を及ぼすが、施設利

用者数に与える影響の度合は  $p$ -median 問題よりもフロー需要  $p$ -median 問題の方が顕著である。

②高速交通路は施設を引き付け、高速交通路上へ立地するようになるが、高速交通路上の移動速度が高速になるとその周辺の施設密度は減少する。

③フロー需要  $p$ -median 問題では、中央の施設ほど多くの需要を獲得するが、高速交通路の存在とその高速化によってその程度は増幅される。

④十字状交通路や放射状交通路では、セクターの後背地が扇状になるため、郊外に中央の施設に次ぐ副次的拠点が形成され、全体として施設の階層構造が生じる。

⑤格子状交通路や環状交通路の存在は、中央の施設への需要の集中を緩和する効果を持つ。しかし二重環状路は、結節点への立地誘導効果はあるものの、大きな違いはもたらさない。

高速交通路の存在する都市では、速度場が一律でなく歪んでいるため、施設の適正な密度もその歪みに従って影響を受ける。究極的には、そのような連続場における適正施設密度論に展開していくことが目標であるが、高速交通路は線的であるため、その取り扱いが困難である。本論文は離散型の立地問題に置き換えて、この問題の解の特徴を明らかにすることを試みたものと言えるであろう。

本論文では需要を一様としたが、一般の交通需要での検討や分布交通量モデル（例えば本間・栗田<sup>8)</sup>）との結合といった議論も必要であろう。また、本論文では高速交通路を与件として議論したが、一般に都市活動の分布と高速交通路設計は鶏と卵の関係にあると考えられる。都市成長過程における輸送需要の変化とネットワーク設計問題との結合も今後の課題としたい。

なお、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金、ユニオン造形文化財団、旭硝子財団および筑波大学大学院システム情報工学研究科教育研究費重点配分による成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) Berman, O. (1997) Deterministic flow-demand location problems. *Journal of Operational Research Society*, **48**(1), 75-81.
- 2) Berman, O. and Simchi-Levi, D. (1990) Conditional location problems on networks. *Transportation Science*, **24**(1), 77-78.
- 3) Hodgson, M. J. (1981) The location of public facilities intermediate to the journey to work. *Regional Studies*, **15**, 493-506.
- 4) Sasaki, M., Suzuki, A. and Drezner, Z. (1999) On the selection of hub airports for an airline hub-and-spoke system. *Computers and Operations Research*, **26**(14), 1411-1422.
- 5) 鈴木 勉 (2002) 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。都市計画論文集, **37**, 115-120.
- 6) 鈴木 勉 (2003) 都市内流動を最小化するフロー需要施設配置モデルを用いた拠点立地に関する考察。都市計画論文集, **38**(3), 391-396.
- 7) 藤田学洋・鈴木 勉 (2003) 複数の環状路をもつ円盤都市における平均移動距離と流動量。都市計画論文集, **38**(3), 421-426.
- 8) 本間裕大・栗田 治 (2005) 立ち寄りを伴うトリップのための空間的相互作用モデル -ウィルソンのエントロピー最大化法の一般化とその応用。都市計画論文集, **40**(3), 109-114.