

## 46. 既存施設を活用した都市施設の再配置モデル

- メディアン型およびカバリング型条件付き施設配置モデルの一般化と統廃合への応用 -

Facility Relocation Models Utilizing Existing Facilities

- Generalization and Application of Conditional  $p$ -median and Maximal Covering Models -

鈴木 勉\*

Tsutomu Suzuki\*

The paper presents facility relocation models that provide with solutions for the problem which facilities to be closed and to be newly opened, with the constraint of the number of opening and closing facilities. The objectives are the minimization of total travel distance from the patrons to their closest facility, or the maximization of the number of patrons covered by the facilities with predetermined radius from the facilities. The models can be applied for both of the cases: the total number of facilities is increasing and decreasing. They are useful for selecting facilities to close and determining the location of facilities to open, when we face with financial exigency and are forced to utilize existing facilities. Through two case studies, we observed that only a few relocation of existing facility can improve current status and realize nearly optimal status in travel distance or demand covering.

**Keywords:** facility location,  $p$ -median model, maximal covering model, relocation, consolidation

施設配置,  $p$ -メディアンモデル, 最大被覆モデル, 再配置, 統廃合

### 1. はじめに

都市施設の配置案を策定したり、現状の配置を評価したりする際に、多くの施設配置モデルが応用されてきた。代表的な施設配置モデルとして、 $p$ -メディアンモデル、 $p$ -センターモデル、集合被覆(set covering)モデル、最大被覆(maximal covering)モデルなどがあり、これらを基礎にして配置の目的や評価の観点に応じて様々なモデルが開発されてきた。しかし、上述のモデルはほとんどがいわば新たに都市を設計する際に用いることのできるものである。都市計画の現場では、財政的制約や資源の有効活用、歴史的経緯の重視など様々な理由から、既存施設を有効に活用しながら、施設の新設や統廃、再配置などを徐々に行って、社会情勢や時代のニーズの変化に対応してきたと見るのが一般的である。実際には、既存の施設を活用しながら新たな施設を建設し、不要になったものを廃止して施設システムを徐々に変更していると考えられる。

そこで本論文では、施設数の増設・廃止の両方に対応することのできる既存施設を活用した施設再配置モデルを提案する。基礎とするモデルは $p$ -メディアンモデル及び最大被覆モデルである。そして、小学校および投票所の統廃合を例として、これらのモデルの有効性を提示することを目的とする。

続く2章で、施設配置モデルの概観を行った後、第3章でメディアン型及びカバリング型の2つの施設再配置モデルの定式化を行う。そして第4章では、少子化の進む地域での小学校の統廃合の例と、町村合併と人口減少に伴う国政選挙投票所の統廃合の例を取り上げて、ケーススタディとしてモデルの当てはめを行い、統廃合の評価を行うと同時にモデルの有効性を示す。最後に5章で、本論文の結論と今後の課題を提示する。

### 2. 施設配置モデル

施設配置問題の代表的なものとしては、 $p$ -メディアンモデル、 $p$ -センターモデル、集合被覆モデル、最大被覆モデルなどが挙げられる。<sup>4)</sup>一般に、施設配置問題は、全ての施設を新たに設置することを想定している。しかし、ニュータウン建設のような場合を除いて、現実の地域施設の配置は、既に存在する施設が立地し、サービスを提供しているという条件下で、それらの施設の廃止や新たな施設の設置を行うことによって決定されている。

Suzuki *et al.*は、施設を1つずつ建設することを想定した逐次型施設配置をモデル化しており、逐次型による最適配置が同時配置の場合と異なることを示している。<sup>8)</sup> 淵田・大澤・尾崎は、施設を廃止する過程についても分析しており、平均移動距離については同時配置の場合と大差ないことを明らかにしている。<sup>5)</sup> これらは施設を1つずつ加えたり減らしたりしているが、Berman and Simchi-Levi<sup>1)</sup>やDrezner<sup>3)</sup>は、条件付き施設配置問題(conditional location problem)として、いくつかの既存施設が存在するという条件で新たに設置する複数の施設の配置場所を求める問題を定式化している。鈴木は、これを用いて、高速交通路が存在する中での施設配置最適化を行っている。<sup>7)</sup> また、Campbell<sup>2)</sup>は施設数増加過程、ReVelle *et al.*<sup>6)</sup>は減少過程のモデル化を行っている。

このように、既存施設を前提として追加したり廃止したりする施設配置の研究は散見されるが、廃止と新設を同時に決定するモデルはWang *et al.*<sup>10)</sup>を除いて見あたらない。Wangらは、既存施設と施設廃止・新設の単価が与えられたときに予算制約下で廃止・施設の施設数と位置を決定するモデルとその解法を提示している。しかし、廃止・新設する施設数とそれによる移動費用の削減効果については明示的に示されていない。本論文では、廃止・新設施設数の

\*正会員・筑波大学システム情報系社会工学域(University of Tsukuba)

大小と移動費用の関係を明示的に示すために費用の議論を避け、廃止施設数と新設施設数が決まっているときのそれらの最適配置を求める問題を定式化することを目的とする。

### 3. 施設再配置モデルの定式化

#### 3.1 メディアン型再配置モデル

需要の分布が所与の場合に、 $p$  個の施設を需要地から施設までの総距離が最小になるように新たに配置するモデルである  $p$ -メディアンモデルは、以下のように定式化される。

$$\min_{x_{ij}, y_j} \sum_i w_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i, j \in N \quad (3)$$

$$\sum_j y_j = p \quad (4)$$

ただし、

- $w_i$ : 需要  $i$  における需要量 (人口)
- $d_{ij}$ : 需要  $i$  から施設  $j$  までの距離
- $x_{ij}$ : 需要  $i$  のノード  $j$  の施設への割当を表すバイナリ変数
- $y_j$ : ノード  $j$  における施設の有無を表すバイナリ変数
- $p$ : 施設数
- $N$ : ノードの集合

である。この問題の解により、 $p$  個の (新たな) 施設の配置が同時に決定される。

これに対して、図1に示すように、 $p$  個の施設は予め配置されていて、そのうち  $r$  個 ( $r \leq p$ ) の施設を廃止し、新たに  $q$  個の施設を追加する問題を考える。 $p$  個の既存施設の配置は任意とする。再配置の評価基準は総距離の最小化であるとし、これを  $(p,r,q)$  メディアン型再配置モデルと呼ぶことにする。

$(p,r,q)$  メディアン型再配置モデルの定式化は至って簡単である。すなわち、変更前の  $p$  個の既存施設の配置を  $y_j^*$  (1 ならば配置されていて、0 ならば配置されていない) で表すことにすれば、変更後の施設数は  $p-r+q$  となり、施設の変更箇所の最大数は  $r+q$  となるので、メディアン型の施設再配置モデルは以下のように定式化できる。

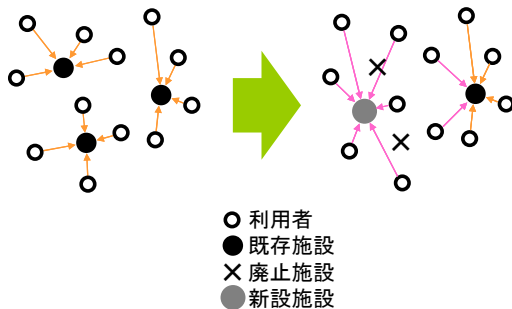


図1 施設の再配置 ( $p=3, r=2, q=1$  の例)

$$\min_{x_{ij}, y_j} \sum_i w_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

subject to (2), (3),

$$\sum_j y_j = p - r + q \quad (4)'$$

$$\sum_j z_j = r + q \quad (5)$$

$$-z_j \leq y_j - y_j^* \leq z_j, \quad \forall j \in N \quad (6)$$

ただし、

- $p$ : 既存施設数
- $r$ : 廃止施設数
- $q$ : 新設施設数
- $z_j$ : ノード  $j$  に関するバイナリのダミー変数 (施設有無の変更があれば必ず1をとる)

である。

ここで、 $(p,0,q)$  の場合は、 $p$  個の既存施設を所与とした条件付き  $q$ -メディアンモデルと同等である。また、 $(p,p,q)$  の場合は  $q$ -メディアンモデルと同等である。 $(p,r,0)$  の場合は、 $p$  個の既存施設の立地場所のみを候補地とした  $(p-r)$ -メディアンモデルと同等である。

#### 3.2 カバリング型再配置モデル

一方、需要の分布が所与の場合に、 $p$  個の施設を、それらの施設からカバー距離  $u$  (定数) 以内にできるだけ多くの需要が入るように新たに配置するモデルである最大被覆 (最大カバリング) モデルは、3.1 の変数の定義を用いれば

$$\max_{x_{ij}, y_j} \sum_i \sum_j a_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

subject to (2), (3), and (4).

のように定式化される。ただし、

- $a_{ij}$ : 施設  $j$  の立地によって距離  $u$  以内でカバーされる需要  $i$  の需要量 ( $d_{ij} < u$  ならば  $w_i$ , さもなくば 0)
- である。

同様に、 $p$  個の施設はあらかじめ配置されていて、そのうち  $r$  個の施設を廃止し、新たに  $q$  個の施設を追加する問題を考える。 $p$  個の既存施設の配置は任意である。再配置の評価基準はカバーする需要量の最大化であるとし、これを  $(p,r,q)$  カバリング型再配置モデルと呼ぶことにする。 $(p,r,q)$  カバリング型再配置モデルも以下のように定式化することができる。

$$\max_{x_{ij}, y_j} \sum_i \sum_j a_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

subject to (2), (3), (4)', (5), and (6).

ここで、 $(p,0,q)$  の場合は、 $p$  個の既存施設を所与とした条件付き  $q$ -最大カバリングモデルと同等である。また、 $(p,p,q)$  の場合は  $q$ -最大カバリングモデルと同等である。 $(p,r,0)$  の場合は、 $p$  個の既存施設の立地場所のみを候補地とした  $(p-r)$ -最大カバリングモデルと同等である。

次章では、現実の施設再配置を例に、これらの再配置モデルを適用し、再配置の評価を行うとともに、モデルの有

効性を確認する。なお、求解にはNUOPT12を用いた。CPUはIntel Core2 DUO 1.4GHz, 3.4GB RAMである。

#### 4. 再配置モデルの応用例

##### 4.1 C区における小学校統廃合

大都市都心部のC区では1990年代に、都心人口の減少と少子化の進行に対応して、学校統廃合を実施し、小学校14校を8校に再編成した。一部は建替による公共施設との複合化も行っているが、8校の全ては既存の小学校用地を有効に活用している。つまり、変更後に小学校の配置された8町丁目は全て、変更前にも小学校が配置されていた。

小学校の残された8町丁目は適切に選択されていたであろうか。これを調べるために、前章の2つの再配置モデルを適用する。距離 $d_{ij}$ には直線距離を用いる。

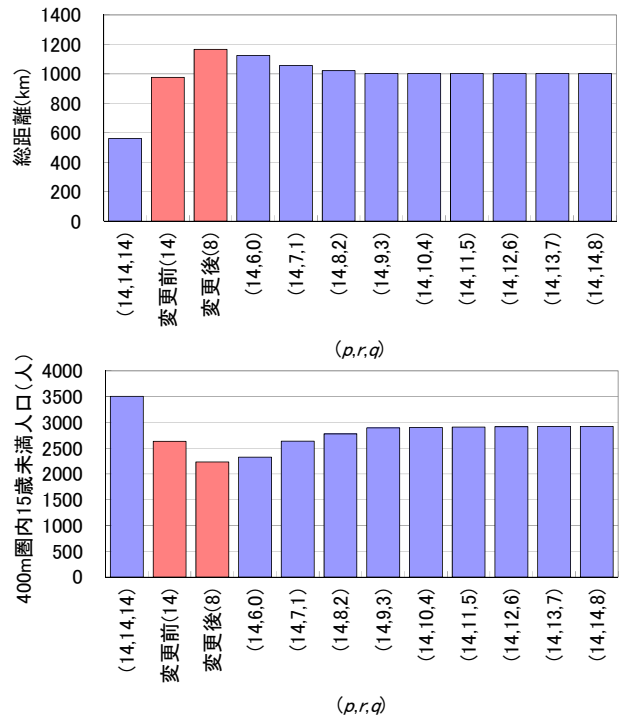
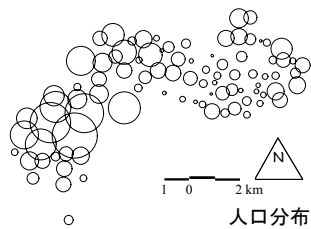


図3 C区小学校再配置モデルの目的関数値

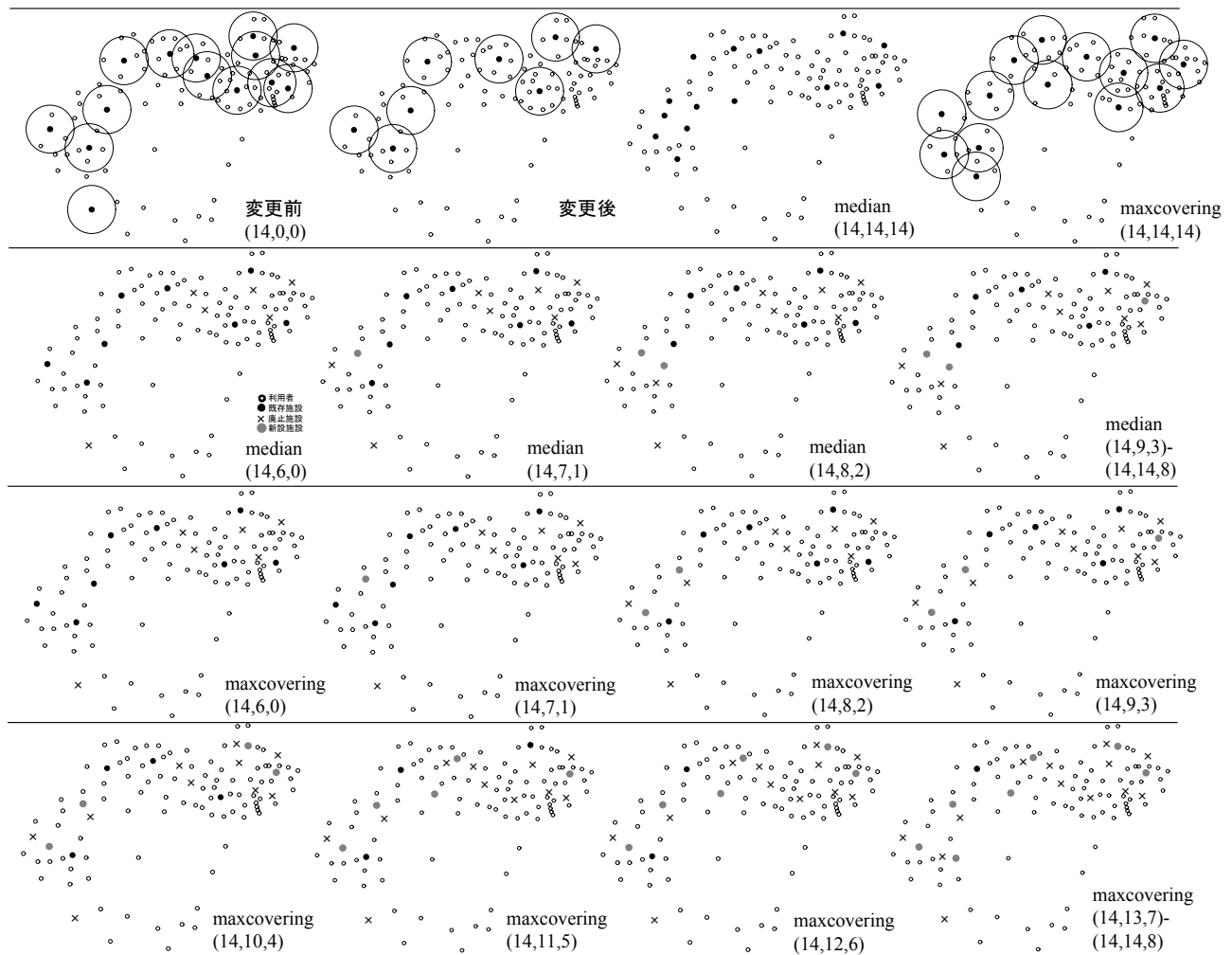


図2 C区における小学校の再配置と(p,r,q)メディアン型再配置モデル・(p,r,q)カバリング型再配置モデルの解

配置変更前の小学校は14校、変更後は8校である。変更前の小学校を既存施設として、変更後の小学校数を再配置することを想定する。すなわち、 $p=14, p-r+q=8$ である。廃止施設数 $r$ を0から8まで変化させ、新設施設数 $q$ をそれと連動させて設定することとする。つまり、(14,6,0)から(14,7,1),(14,8,2)と続き、(14,14,8)まで設定して解を求める。需要は平成12年国勢調査による町丁目別15歳未満人口で代替し、その位置及び施設候補点を表すノードは108町丁目を用いた。需要ノード数はあまり多くなく、実用的な解を得るためには移動費用の精度は十分とは言えないが、ここではモデルの解の性質の例示を主旨と考える。全町丁目を配置候補点とするのは、多くの施設を配置することを意味するものではなく、新設の可能性のある場所の選択肢を多くとるという意味である。

図2最上段にC区の人口分布を示す。記号の意味は図1と同じである。東南部の土地利用は業務商業に特化しており、夜間人口は東北部から西部にかけて帯状に分布している。その中間も商業が卓越しており、人口は西部や北東部に偏っている。

図2の2段目に変更前、変更後の小学校の配置を示している。施設を中心とした円は、カバリング型で用いるカバー距離 $u=400m$ を半径としている。北東部の小学校が特に統合されている様子が読み取れる。続いて、施設数を14のままとしたときの $p$ -メディアンモデル、最大被覆モデルの解を示している。これらは、 $(p,r,q)=(14,14,14)$ とした再配置モデルと見なすことができる。

メディアン型再配置モデルによる解は、3段目に示されている。(14,6,0)の場合の6廃止施設のうち5箇所は北東部に位置する結果となる。また、この配置は実際の変更後の配置と非常によく似ている。さらに $r$ を増やしていくと、小学校の再配置が進んでいく様子がわかる。

図3上に、14-メディアン、変更前後、及びメディアン型再配置モデルの解による総距離の値を比較している。これを見ると、変更前の配置では14-メディアンで実現される総距離よりもかなり大きく、14施設が適切に配置されているとは言えない状態であったことがわかる。また、8施設に変更することで総距離の増加は止むを得ないが、変更後の総距離は(14,6,0)の総距離と大差なく、廃止施設は適切に選択されていたことがわかる。さらに、施設再配置による新設を許すことで変更前の総距離と変わらない水準まで減少させることができるが、3施設の再配置のみで8-メディアンモデルの配置と最小距離が実現されることもわかる。

一方、カバリング型再配置モデルによる解は、図2の4段目から5段目にかけて示されている。ここではカバー距離 $u$ を400mとしている。(14,6,0)の廃止施設の位置はメディアン型の場合と同一であるが、 $r$ を増やしていくプロセスにおける配置はメディアン型と異なる。メディアン型の場合は、人口の多い町丁目に配置する傾向が強いのに対して、カバリング型はなるべく等間隔になる

ように配置が決まる傾向が強いためである。しかし、いずれのモデルでも、北東部に廃止施設が多く、西部に新設施設が見られるという特徴は同じである。

図3下に、14-最大カバリングモデル、変更前後、及びカバリング型再配置モデルの解による400m圏内15歳未満人口(以下、被覆人口)の比較を示す。これを見ると、変更前の配置では14-最大カバリングで実現される被覆人口よりもかなり小さく、14施設が適切に配置されているとは言えない状態であったことがわかる。また、8施設に変更することで被覆人口のさらなる減少は止むを得ないが、変更後の被覆人口は(14,6,0)の被覆人口と大差なく、廃止施設は適切に選択されていたことがわかる。さらに、施設再配置による新設を許すことで変更前の被覆人口を上回る水準まで増加させることができ、7施設の再配置まで増加は続く。しかし、被覆人口の増加は少数の小学校の再配置だけで実現されることもわかる。

#### 4.2 I市における国政選挙投票所の再配置

もう一つの事例として、地方部に目を向け、I市における国政選挙投票所の再配置を取り上げる。I市は4町村が合併して誕生した市であり、国政選挙で設置していた投票所の市内地域間格差が見られた。経費削減のために全国的に投票所数を削減する動きが見られる中、I市でも上記の格差を是正する方向で、38箇所(2005年9月11日第44回衆議院議員総選挙)から34箇所(2007年7月29日第21回参議院議員通常選挙)、27箇所(2009年8月30日第45回衆議院議員総選挙)へと削減した。なお、同時期に期日前投票制度が普及したことも連動している。

I市の町丁字の広さはまちまちであり、1町丁字に2箇所以上の投票所も見られるため、同一町丁目内の複数の投票所は1箇所と数え、第44回衆院選時の34箇所(変更前)から、第45回衆院選時の24箇所(変更後)に減少したと見なし、このプロセスをモデルに当てはめることとする。すなわち、 $p=34, p-r+q=24$ とし、廃止施設数 $r$ を10から34まで変化させ、新設施設数 $q$ をそれと連動させて設定することとする。(34,10,0)から(34,11,1),(34,12,2)と続き、(34,34,24)まで設定して解を求める。需要は有権者数の代わりに平成17年国勢調査による人口で代替し、その位置及び施設候補点を表すノードは87町丁目を用いた。ここでもモデルの解の性質の例示を主旨と考え、需要ノード数が移動距離計算の精度上少ないことは問題としないことにする。

図4最上段に、I市の人口分布、変更前後の投票所の配置、34-メディアンおよび34-最大カバリングの解を示す。人口は西部の方が高密度であるが、投票所は市中央部に偏って設置されていた。そのため、変更後は市中央部の投票所が整理統合された。変更後の24箇所はいずれも変更前にも投票所が設置されていた町丁目であり、投票所が設置されていない町丁目に新設されたものはない。34-メディアンや34-最大カバリングの解から、むしろ人

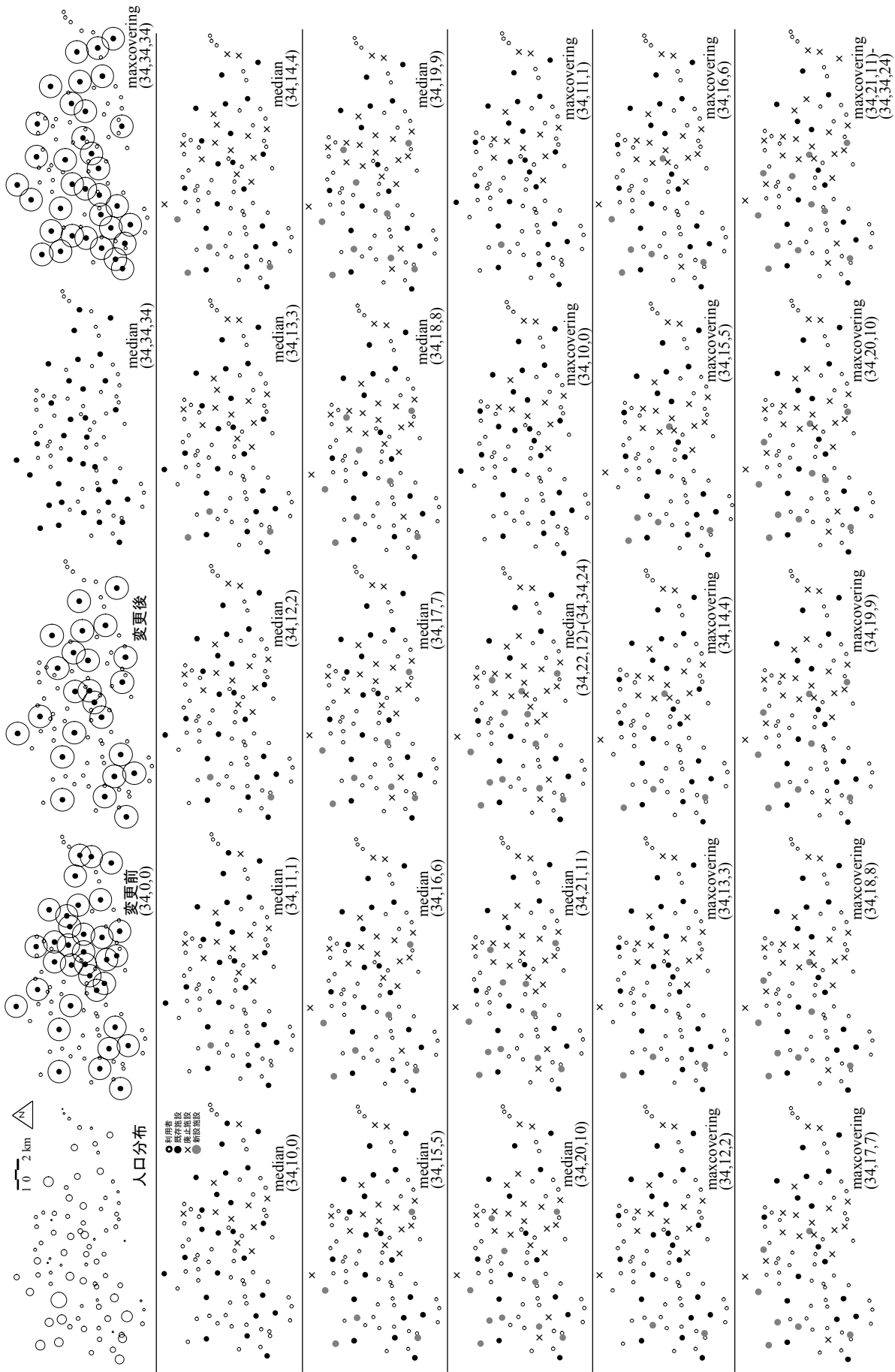


図4 I市における投票所の再配置と(p,r,q)メディアン型再配置モデル・(p,r,q)カバリング型再配置モデルの解



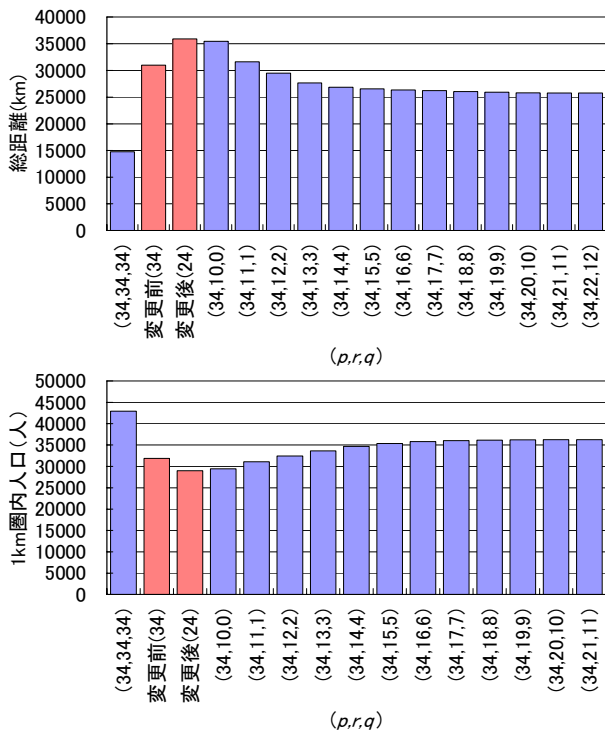


図5 I市投票所再配置モデルの目的関数値

口の多い西部の投票所が充実されるべきであることが窺い知れる。

メディアン型再配置モデルによる解は、2段目から4段目にかけて示されている。(34,10,0)の場合の廃止施設は市域の中央部と東部、特に中央部に集中していることがわかる。 $r$ を増やしていくと、中央部の投票所をさらに廃止し、その分を西部に新設していくべきであることが読み取れる。また、(34,15,5)以降を見ると、中央部の投票所をさらに整理統合して数を減らすのが好ましいことがわかる。

図5上に、34-メディアン、変更前後、及びメディアン型再配置モデルの解による総距離の値を比較している。これを見ると、変更前の配置では34-メディアンで実現される総距離よりもかなり大きく、変更前の投票所が適切に配置されているとは言えない状態であったことがわかる。また、変更後の総距離は(34,10,0)の総距離と大差なく、廃止施設は適切に選択されているが、施設再配置による新設を許すことで変更後の総距離もさらに減少させる余地が大きいことが読み取れ、2,3の施設の再配置だけでも十分な効果があることもわかる。

一方、カバリング型再配置モデルの解は、図4の4段目から最下段にかけて示されている。ここでは、徒歩での投票行動を想定し、カバー距離 $u$ を1kmとしている。(34,10,0)の廃止施設の位置はメディアン型の場合と異なるが、 $r$ を増やしていくプロセスにおける配置も含めて、中央部の投票所を廃止し、その分を西部に新設していくという特徴は同じである。I市の投票所の例では、再配置モデルの解がメディアン型とカバリング型とで傾向の違いは顕著には見られない。I市の市域が広いいため、1kmというカバー距離

では隣接する町丁目をカバーしにくいことが影響している。

図5下に、34-最大カバリングモデル、変更前後、及びカバリング型再配置モデルの解による1km圏内人口(被覆人口)の比較を示す。変更前の配置では34-最大カバリングで実現される被覆人口よりも小さく、変更前に適切に配置されているとは言えないことがわかる。また、24施設に変更することで被覆人口はほとんど減少せず、(34,10,0)の被覆人口とも大差ないことから、廃止施設は適切に選択されているものの、さらに施設再配置による新設を許すことで被覆人口を一層増加させることができることもわかる。

## 5. おわりに

本論文では、施設数の増設・廃止の両方に対応することのできる既存施設を活用した2つの施設再配置モデルを提案し、小学校および投票所の統廃合を例としてこれらのモデルを適用した結果、以下のことを明らかにした。

- (1)  $p$ -メディアンモデルと最大被覆モデルを基礎として、メディアン型および最大カバリング型の2つの再配置モデルの定式化を行うことができることを示した。
- (2) 再配置を許す施設数の増加に応じて、施設までの移動距離の減少、あるいは施設から一定距離でカバーする需要量の増大を定量的に評価できるなど、ケーススタディを通じてモデルの有効性・有用性が確認された。
- (3) 少数の施設の再配置だけで施設までの移動距離や需要のカバー率を大きく改善することができることが確認された。

施設容量制約や確率的需要の考慮をはじめとして、一般の施設配置モデルと同様の一般化が課題として挙げられる。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(A))およびユニバーサル財団研究助成による研究の一部である。匿名の査読者には貴重なコメントを頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Berman, O. and Simchi-Levi, D. (1990): Conditional location problems on networks, *Transportation Science*, 24(1), 77-78.
- 2) Campbell, B. F. (1990): Locating transportation terminals to serve an expanding demand, *Transportation Research B*, 24B(3), 173-192.
- 3) Drezner, Z. (1995): On the conditional  $p$ -median problem, *Computers and Operations Research*, 22(5), 525-530.
- 4) 日本建築学会編(1992): 建築・都市計画のためのモデル分析の手法, 井上書院.
- 5) 洲田隆臣・大澤義明・尾崎尚也 (2009): 縮小時代における施設逐次配置モデル: けちけち算法とどん欲算法との比較, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季発表会アブストラクト集, 122-123.
- 6) ReVelle, C., Murray, A.T., and Serra, D. (2007): Location models for ceding market share and shrinking services, *Omega*, 35, 533-540.
- 7) 鈴木 勉 (2006): 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—, 都市計画論文集, 41(3), 181-186.
- 8) Suzuki, T., Asami, Y., and Okabe, A. (1991): Sequential location-allocation of public facilities in one- and two-dimensional space: Comparison of several policies, *Mathematical Programming B*, 52(1), 125-146.
- 9) 谷村秀彦・池田二郎・梶秀樹・腰塚武志 (1986): 都市計画数理, 朝倉書店.
- 10) Wang, Q., Batta, R., Bhadury, J., and Rump, C. M. (2003): Budget constrained location problem with opening and closing of facilities, *Computers and Operations Research*, 30, 2047-2069.