2024 年度　卒業研究論文

千葉県市川市における小児科病院の施設配置

指導教員

五島洋行　教授

法政大学　理工学部　経営システム工学科

経営数理工学研究室

21X4018 金子奈々美

21X4127 松井叶歩

学科名	経営システム工	学籍番号	21X4018 21X4127
申請者氏名		金子奈々美 松井叶歩	
指導教員名		五島洋行	

論文要旨

論文題目	千葉県市川市における小児科病院の施設配置

本研究では，市川市における小児科病院の最適配置を検討するために，施設配置問題を組み合わせて分析することで，医療サービスの質とコスト効率の両立を図り，市川市に最適な小児科病院の配置計画を提案する．

また，個々の患者の医療サービス環境の改善を目的としているため，需要点と最寄りの施設の間の距離が最も長いものをできるだけ最小化する p-center 問題を使用した．より最適な結果を求めるため，小児科病院の新設や，需要点・供給点の重みづけを条件として加え，実験を行った．結果として，施設配置の分布はそれぞれの条件設定によって大きく異なったため，目的に応じた最適な施設配置が行えたといえる．

今後の課題として，これらの結果を踏まえたさらなる調整や検討が求められる．特に，地域運営のためのコストカットに向け，既存施設の最適な活用と新設施設の計画的配置の両面からのアプローチが必要となる．

目次

第 1 章　序章

1.1. 研究背景と目的

千葉県市川市は，東京都心へのアクセスが良いという地理的な利点から，近年ファミリー層の流入がさらに活発に進んでいる． 2024 年の最新統計によると，市川市の子供人口は約 7 万 2 千人に達しており，これは同規模の都市と比較しても依然として多い数値である．子供の人口が多いことは，小児医療の需要の高さを示しており，これに応じた医療サービスの整備が急務となっている．小児科病院の適切な配置が求められる背景には，市川市が抱える外来患者の医療アクセスと，限られた医療リソースをいかに効果的に活用するかという課題が存在する．

市川市の医療サービスの現状を詳しくみると，小児科病院の数は一定数確保されているものの，その分布に偏りがあることが指摘されている．特に市内の一部の地域では，小児科病院へのアクセスが悪く，外来患者が病院に到達するまでの時間が長くなっている．2024 年 9 月現在もこの問題は解決されておらず，市内中心部の病院には患者が集中し，外来患者数の増加による診療待ち時間の長さや医師の負担増が深刻な問題となっている．一方で，市の周縁部では病院が不足しているため，緊急時に適切な医療を受けることが難しい状況が続いている．このような医療サービスの不均衡は，市川市の住民にとって重大な懸念事項であり，特に子供たちの健康を守るためには，より公平かつ迅速な医療提供体制の構築が求められている．

さらに，市川市は医療サービスに関する費用の増大という財政的な課題も抱えている．市全体で医療サービスにかかる費用は年々増加しており，2024 年時点では高齢化の進展に伴って医療費の負担がますます重くなっている．この状況では，小児医療に多くの予算を割くことはますます困難になっており，効率的な医療資源の配分が求められている．市川市の予算は限られているため，無駄を省いた運営体制を構築しなければならない．こうした財政状況の中で，高品質な医療サービスを持続可能な形で提供することが今後の医療政策における重要な課題である．

本研究では，市川市における小児科病院の最適配置を検討するために，施設配置問題を組み合わせて分析することで，医療サービスの質を図り，市川市に最適な小児科病院の配置計画を提案する．最適な配置を実現することで，地域住民が安心して生活できる持続可能な医療体制の構築が期待される．市川市の特性を踏まえた柔軟なアプローチにより，小児医療の質向上と医療リソースの限られた状況において，効率的かつ公平な医療サービス提供の実現を目指すことが本研究の目的である．

また，本稿において「小児科病院」とは，小児を対象とする医療機関全般を指し，病院および診療所を含むものとする．

1.2. 先行研究

先行研究である島井史子・鈴木里歩の小児科病院配置に関する研究[1]は，地域医療における重要課題である小児科医不足とその分布の不均衡に焦点を当てている．具体的には，二つの数理モデルを活用して最適配置を模索している．

一つ目は，患者の居住地を需要点とし，そこから小児科医院までの距離の総和を最小化する「ミニサム型モデル」である．このモデルは，患者が通院する際の移動負担を軽減することを重視している．名古屋市内の人口分布データを基に需要点を設定し，各需要点から小児科医院までの移動距離を計算し，その総和を最小化する配置を導き出した．この手法により，特に交通アクセスが不便な地域での医療利用を促進することが期待される．

二つ目は，小児科医院がカバーできる患者数を最大化する「最大被覆型モデル」である．このモデルは，患者が一定の距離または時間内でアクセスできる範囲（カバーエリア）を設定し，その範囲内の人口を評価するものである．カバー人口を最大化する配置を算出することで，限られた医療資源を効率的に活用し，地域間の医療アクセス格差を是正することを目的としている．さらに，既存の小児科医院の配置を考慮しながら，新たに必要となる医院の最適な配置を提案している．

これら二つのモデルは，患者の利便性を重視する視点と，医療資源の効率的な利用を目指す視点という異なる側面から最適解を導き出すものである．両モデルの結果を比較することで，名古屋市の地域特性や人口分布に応じた柔軟な配置計画を提案することが可能となった．

ただし，本研究では，個々の患者の医療サービス環境の改善を目的としている．先行研究で使用しているミニサム型モデルでは，患者から小児科病院までのそれぞれの距離ではなく距離の総和の最適化を行っており，最大被覆型モデルでは，カバー人口の最大化をテーマとしているため，個々の患者に対するサービス環境を完全に考慮しているとは言えない．そこで，本研究では，需要点と最寄りの施設の間の距離が最も長いものをできるだけ最小化する p-center 問題を使用する．

第 2 章　関連知識

本章では，本研究で主に扱う施設配置問題とそれに関連する知識，また本研究で使用するソフトウェア QGIS についても説明する．

2.1. 施設配置問題

施設配置問題（Facility Location Problem）は，有限の資源を効率的に活用し，需要拠点に最適なサービスを提供するために，施設の配置を決定する問題である．この問題は，設置コスト，運営コスト，輸送コストなどの要素を考慮し，これらの総費用を最小化する一方で，需要に対する十分なカバーや品質の高いサービス提供を確保することを目指す．施設配置問題は，離散最適化の一種であり，整数計画問題として定式化される事が多い．具体的には，施設の配置の選択を 0-1 変数でモデル化し，制約条件として，需要拠点への供給バランスやキャパシティ制約が含まれる．これにより，問題の複雑性は NP 困難となり，最適解の探索には効率的なアルゴリズムが求められる．施設配置問題は，都市計画，物流，医療サービスなど，幅広い分野で重要な役割を果たす．

ここで，施設配置問題に含まれる問題の関連知識について説明する．

2.2. 集合被覆問題

集合被覆問題（Set Covering Problem）は，与えられた集合とその部分集合の集合から，すべての要素を含む最小数の部分集合を選択することを目的とする組合せ最適化問題である．この問題は，有限の資源を効率的に割り当て，必要な要件を満たすためにしばしば用いられ，特に施設配置問題やネットワーク設計などに応用される．形式的には，すべての需要点が少なくとも一つの配置された施設からサービスを受けられるように，最小のコストで施設を配置する問題として定式化されることが多い．集合被覆問題は，整数計画問題として記述でき，0-1 変数を用いて，各部分集合が選択されたか否かを表現する．厳密解を求めるためには計算量が膨大となることが多いため，ヒューリスティックや近似アルゴリズムが実際の応用では用いられる．集合被覆問題は，効率的な資源配分やコスト削減を求める多くの分野で重要な課題となっている．定式化は以下のようになる．ただし，変数の定義は以下のものとする．

集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$：カバーすべき要素の集合
集合$S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$：対象集合 U の部分集合

$$x_i = \begin{cases} 1：部分集合 S_i を選択する \\ 0：部分集合 S_i を選択しない \end{cases}$$

Minimize

$$\sum_{i=1}^{m} x_i,$$

subject to:

$$\sum_{i: u_i \in S_i} x_i \geq 1, \quad \forall u_j \in U,$$

$$x_i \in \{0,1\}, \qquad \forall i = 1,2,\ldots,m.$$

2.3. 最大被覆問題

最大被覆問題（Maximum Covering Problem）は，限られたリソースの下で，できる限り多くの要素をカバーすることを目的とする組合せ最適化問題である．この問題では，各部分集合が異なるコストや利得を持つ場合があり，選択可能な部分集合の数や予算といった制約下で，カバーされる要素の最大化を図る．形式的には，需要拠点をカバーするための施設を配置する際に，利用可能な施設数や予算を超えない範囲で，最も多くの需要を満たすように施設を選択する問題として定式化されることが多く，整数計画問題としてモデル化され，0-1 変数を用いてどの施設を配置するか，またはどの部分集合を選択するかを表現する．厳密解を求めるのが困難な場合が多く，ヒューリスティックや近似アルゴリズムが用いられる．都市計画，緊急サービスの配置，マーケティングなど，さまざまな分野で重要な応用を持ち，限られたリソースで最大の効果を引き出すことが求められる問題である．定式化は以下のようになる．ただし，変数の定義は以下のものとする．

集合 $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_n\}$: カバーすべき要素の集合

集合$S = \{S_1, S_2, \ldots, S_m\}$：対象集合 U の部分集合

k: 選択できる部分集合の最大数

$$x_i = \begin{cases} 1：部分集合\ S_i\ を選択する \\ 0：部分集合\ S_i\ を選択しない \end{cases}$$

$$y_e = \begin{cases} 1：要素 e \in U が被覆する \\ 0：要素 e \in U が被覆しない \end{cases}$$

Minimize

$$\sum_{e \in U} y_e,$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^{m} x_i \leq k,$$

$$y_e \leq \sum_{i: e \in S_i} x_i, \qquad \forall e \in U,$$

$$x_i, y_e \in \{0,1\}.$$

2.4. メディアン問題

メディアン問題(Median Problem)は，データセットの中央値（メディアン）を見つける問題で，統計学やデータ分析において頻繁に使用される．メディアンは，データを昇順または降順に並べたときに，中央に位置する値のことを指す．データの数が奇数の場合，単純に中央の値がメディアンとなるが，偶数の場合は中央に位置する二つの値の平均を取ることで求められる．メディアンは，データの代表値として平均と比較されるが，大きく異なる点は，極端に小さいまたは大きい値である外れ値の影響を受けにくいことである．このため，メディアンは，所得や不動産価格のように，分布に大きな偏りがあるデータの中心的な傾向を示すのに適している．計算アルゴリズムには，単純なソートを用いる方法や，より効率的な選択アルゴリズムが存在する．定式化は以下のようになる．ただし，変数の定義は以下のものとする．

n：需要点の数
m：施設の候補地点の数
p：配置する施設の数
d_{ij}：需要点 jから候補地点 i までの距離またはコスト
w_j：需要点 j の需要量（各需要点がどれだけの重みを持つか）

$$x_i = \begin{cases} 1：候補地点\ i に施設を設置する \\ 0：候補地点\ i に施設を設置しない \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：需要点\ j\ が候補地点 i に割り当てられる \\ 0：需要点\ j\ が候補地点 i に割り当てられない \end{cases}$$

Minimize

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_j \times d_{ij} \times y_{ij},$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^{m} y_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, n,$$

$$y_{ij} \leq x_i, \qquad \forall i = 1, \dots, m, \quad \forall j = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_i = p,$$

$$x_i, y_{ij} \in \{0,1\}.$$

2.5. センター問題

センター問題（Center Problem）は，最適化問題の一種で，与えられた点集合の中から，

他の全ての点からの距離が最小となる中心点（センター）を求める問題である．主にネットワーク設計や都市計画などで，効率的な配置を考える際に利用される．例えば，物流センターを配置する場所を決定する際，全ての配送先との距離を最小化するような位置を見つける問題として扱われる．センター問題にはさまざまなバリエーションがあり，最も一般的なのは「p-center 問題」である．これは，複数のセンターを配置し，各点が最も近いセンターまでの距離の最大値を最小化することを目指す．応用例としては，病院や消防署などの公共施設の最適配置がある．距離の尺度としては，ユークリッド距離やマンハッタン距離などが使用され，解決方法としてはヒューリスティックや線形計画法などが用いられる．定式化は以下のようになる．ただし，変数の定義は以下のものとする．

n：需要点の数
m：施設の候補地点の数
p：配置する施設の数
d_{ij}：需要点 jから施設候補地点 i までの距離またはコスト
$x_i = \begin{cases} 1\text{：候補地点 } i \text{に施設を設置する} \\ 0\text{：候補地点 } i \text{に施設を設置しない} \end{cases}$ $y_j \in \{1, \dots, m\}$：需要点j が割り当てられる設置施設の候補地点を示す変数
$z(\geq 0)$：最大の到達距離またはコストを表す変数

Minimize

$$z,$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^{m} y_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, n,$$

$$y_{ij} \leq x_i, \quad \forall i = 1, \dots, m, \quad \forall j = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_i = p,$$

$$\sum_{i=1}^{m} d_{ij} \times y_{ij} \leq z, \quad \forall i = 1, \dots, n,$$

$$x_i, y_{ij} \in \{0,1\}.$$

2.6. 連続配置問題

連続配置問題（Continuous Facility Location Problem）は，施設の設置場所を自由に選択できる場合の最適配置問題である．この問題では，設置場所を地理的に特定の座標系で表し，解空間が連続的に広がっている．例えば，配送センターや物流ハブのように，現実の制約を最小限に仮定して理想的な設置場所を決定するシナリオに適している．連続配置

問題は，需要点の位置や需要量，距離に応じて配置の最適化を行う．距離の尺度にはユークリッド距離，マンハッタン距離，その他特定の条件に適した距離関数を使用する．これにより，需要点との総移動コストを最小化したり，最大距離を最小化したりすることが可能となる．定式化は以下のようになる．ただし，変数の定義は以下のものとする．

$N = \{1,2,\dots,n\}$: 需要点の集合
$d_i = (x_i\ , y_i)$: 各需要点$i \in N$の位置
$f = (x, y)$: 配置する施設の位置
w_i : 需要量
$d(d_i\ , f) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ ：施設と需要点間の距離
R : 施設の配置可能範囲が制限されている場合の領域

Minimize

$$\sum_{i \in N} w_i \cdot d(d_i, f),$$

subject to:

$$(x, y) \in R.$$

2.7. 離散配置問題

離散配置問題（Discrete Facility Location Problem）は，施設を設置できる場所があらかじめ候補地として限定されている場合に，最適な配置を求める問題である．解空間は離散的であり，設置可能な場所は有限個の候補地として与えられる．
例えば，ある市内で病院を新設する際，空き地や既存の建物といった候補地があり，その中から選択する必要がある場合を考える．このような場合に，需要者である患者の利便性やコストを考慮して，どの候補地に施設を配置するべきかを決定する．定式化は以下のようになる．ただし，変数の定義は以下のものとする．

$M = \{1,2,\dots,m\}$: 施設の設置候補地
$i \in N$: 各需要地点
w_i : 需要量
d_{ij} : 需要点iと候補地jの間の距離
$x_j = \begin{cases} 1：候補地点\ j に施設を設置する \\ 0：候補地点\ j に施設を設置しない \end{cases}$ $y_{ij} =$

$\begin{cases} 1：需要点\ j\ が候補地点 i に割り当てられる \\ 0：需要点\ j\ が候補地点 i に割り当てられない \end{cases}$

Minimize

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M} w_i \cdot d_{ij} \cdot y_{ij},$$

subject to:

$$\sum_{j \in M} y_{ij} = 1, \qquad \forall i \in N.$$

$$x_j \geq y_{ij}, \qquad \forall i \in N, \forall j \in M,$$

$$\sum_{j \in M} x_j \leq p,$$

$$x_j, y_{ij} \in \{0,1\}.$$

2.8. GIS

本研究で使用するソフトウェア QGIS について説明する．

QGIS（Quantum GIS）は，地理情報システム（Geographic Information System ：GIS）のオープンソースソフトウェアであり，地理空間データの可視化，編集，解析を行うための強力なツールである．QGIS は多様な地理データフォーマットに対応し，シェープファイルや GeoTIFF，KML，GeoJSON，PostGIS データベースなどを扱うことができる．これにより，ベクターデータ（点・線・面）やラスターデータ（画像データ）を使った分析が可能となる．

QGIS の特徴の一つは，直感的な地図作成機能だ．ユーザーは色やシンボル，ラベルを自由にカスタマイズして地図をスタイリングでき，印刷レイアウト機能を使ってプロフェッショナルな地図を PDF や画像として出力することが可能だ．また，空間解析のためのツールも豊富に備えており，バッファリング，オーバーレイ解析，空間統計，地理的変換など，複雑な地理空間分析を簡単に行える．外部の GDAL や GRASS GIS と連携することで，さらに高度な解析にも対応している．

QGIS は，プラグインによる機能拡張が可能で，Python を使って独自のプラグインを作成することもできる．本研究においても，Python と連動させることで効率化を図っている．

QGIS は都市計画，環境保護，教育，研究開発などさまざまな分野で応用されているが，本研究においては，小児科病院の最適な施設配置をテーマに，最適解の可視化に応用する．

第 3 章　使用データと前提条件

本研究では，対象地域を千葉県市川市に設定し，各町丁の境界データ，人口データ，医療情報データを使用する．

3.1. 千葉県市川市の各町丁の境界データ

千葉県市川市の各町丁の境界データとして，令和 2 年国勢調査[2]を使用する．QGIS に境界データを取り込んだものを図 1 に示す.

図 1.千葉県市川市

3.2. 需要点と供給点

需要点は，医療サービスを必要とする地点である．本研究では，各地区の重心を需要点としてプロットする．

供給点は，現在(2024 年 9 月時点)における千葉県市川市にある小児科施設である．日本医師会における地域医療情報システム[3]から得た住所を基に，緯度・経度を特定し，平面直角座標系に変換しプロットする．需要点と供給点をプロットしたものを以下の図 2，3 に示す.

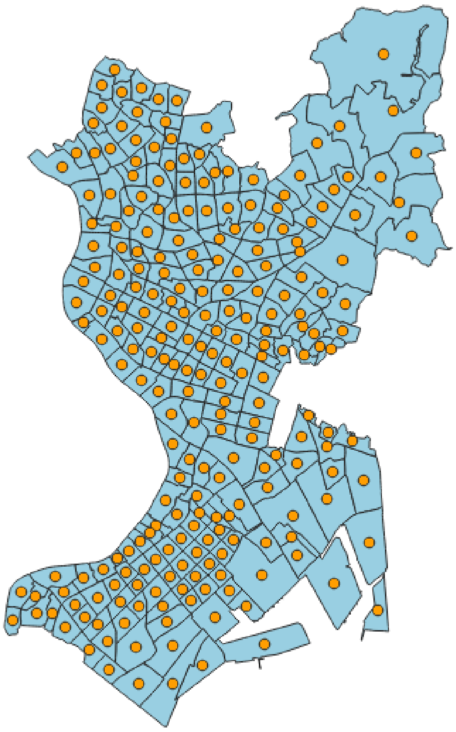

図 2.　需要点

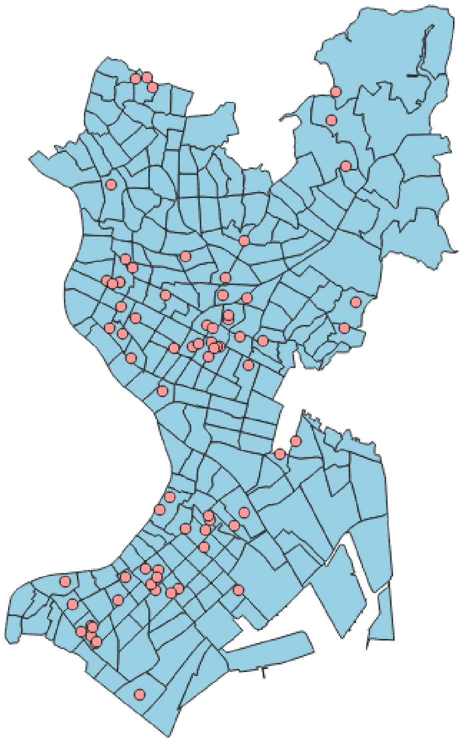

図 3.　供給点

3.3. 千葉県市川市の人口データ

千葉県市川市の人口データとして，令和 2 年国勢調査の小地域集計[2]を使用する．ただし，本研究では小児科病院がテーマであるため，人口となる 0〜14 歳の年少人口のデータを使用する．

ここで，各地区の 1 日当たりの受診人数は以下のように設定する．厚生労働省が行った令和 2 年（2020 年）の患者調査[4]によると，0〜14 歳の小児における小児科の外来受療率は，10 万人あたり約 6,000 人で約 6%とされている．このことから，各地区の 1 日当たりの受診人数は「各地区の人口×0.06」と設定する．

3.4. 千葉県市川市にある小児科病院の医師数データ

各小児科病院の収容可能人数を設定するため，千葉県市川市にある各小児科病院の医師数データとして，日本医師会における地域医療情報システム[3]から得た各小児科病院の常勤医師数を使用する．

独立行政法人福祉医療機構が 2020 年度に実施した病院・診療所の経営状況調査[4]によると，1 日における小児科病院の平均外来患者数は 42.7 人とされている．本研究では，1 日における小児科病院の平均外来患者数を 40 人と設定する．

各小児科病院の収容可能人数は「各小児科病院の常勤医師数×1 日における小児科病院の平均外来患者数(40 人)」として計算し，施設容量として設定する．

3.5. 実験環境

本研究における実験環境の詳細は表 1 に示す.

表 1．実験環境

CPU	Intel® Core™ i3-8145U 2.10GHz
OS	Microsoft Windows 10 Education
Memory	8.00GB
Solver	Python Pulp version2.6.0，pyscipopt version3.5.0

第 4 章　基本モデル

前章で設定した基本データをもとに，基本モデルを作成する．ここでの基本モデルでは，小児科病院の収容可能人数や人口の重みづけ等の制約を考慮せずに， p -center 問題として定式化を行う．ただし，需要点の数は千葉県市川市内の全地区数である 238 地点，施設の候補地点の数は今現在千葉県市川市内で設置されている全小児科病院数である 72 地点とする．

4.1. 定数と変数の定義

定数の定義は以下のとおりになる．

i：需要点のインデックス

I：需要点の集合

j：既存の施設候補地点のインデックス

J：既存の施設候補地点の集合

$|I|$：需要点の数

$|J|$：既存の施設候補地点の数

p：配置する施設の数

d_{ij}：需要点 i から施設候補地点 j までの距離

$$x_j = \begin{cases} 1：候補地点\ j\ に施設を設置する \\ 0：候補地点\ j\ に施設を設置しない \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：需要点\ i\ が候補地点\ j\ に割り当てられる \\ 0：需要点\ i\ が候補地点\ j\ に割り当てられない \end{cases}$$

$w(\geq 0)$：最大の到達距離またはコストを表す変数

また，定数の値は以下のように設定する．

$|I| = 238$

$|J| = 72$

本研究で用いる p の値は千葉県市川市において必要な病院数であり，次の通りに推定し，設定する．必要な病院数は「必要な医師数/1 病院あたりの小児科医数」である．本研究において，1 病院あたりの小児科医数は 1 人と仮定する．これは，本研究で使用する千葉県市川市の病院数のうち，小児科医数が 1 人である病院数は全体の約 60%以上を占めており，千葉県市川市に医療費の増大という財政的な課題を抱えており，可能な限りコストを抑えつつ，市民への必要な医療サービスを提供するという現実的な条件に基づいた設定である．そのため，本研究における必要な病院数は必要な医師数と同数として扱う．

必要な医師数は次のように求める．1 人の小児科医が 1 日あたり診察する患者数は，独

立行政法人福祉医療機構が 2020 年度に実施した病院・診療所の経営状況調査[4]によると，平均 42.7 人とされており，本研究では，40 人としている．また，運営日数は 365 日のうち，週休 2 日制度や祝祭日および有給休暇等を考慮し，一般的な診療所の実働日数として，250日と仮定する．上記内容から，1人の小児科医が1年間で見られる総患者数は次のように推定できる．40(人/日)×250(日)9＝10,000(人/年)となる．
この値は年間総患者数であり，同一患者が複数回受診することも含まれるため，重複を除いた実際の患者数（以下，実患者数）を推定する必要がある．そのため，1 人の患者が年間に受診する平均回数を考慮する必要がある．厚生労働省の患者調査[5]によると，0〜14歳の小児が年間に医療機関を受診する回数は平均 7〜10 回程度とされる．上記内容から，実患者数は次のように推定できる．10,000(人/年)/7 回=1428.571…(人)，10,000(人/年)/10 回＝1000(人)となる．したがって，実患者数は約 1,000〜1,450 人と推定することができる．

よって，必要な医師数は千葉県市川市の 0-14 歳総人口/実患者数で求めることができ，実患者数が 1000 人の場合，57625(人)/1000(人)=57.625(人)であり，1450 人の場合，57625(人)/1450(人)=39.741…(人)と推定できる．

上記内容から，必要な病院数であるpの数は約 39〜57 と推定した．この推定したpの数をもとに本研究では，仮定の範囲内で均等な間隔を持つ値として$p = 30,40,50$で施設配置の実験を行う．

4.2. 定式化

Minimize

$$w, \tag{1}$$

subject to :

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, \tag{2}$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p, \tag{3}$$

$$y_{ij} \leq x_j, \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \tag{4}$$

$$\sum_{j \in J} d_{ij} \cdot y_{ij} \leq w, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \tag{5}$$

$$x_j, y_{ij} \in \{0,1\}. \tag{6}$$

(1)は需要点から供給点の最大距離の最小化を表し，(2)は需要点には一つの施設に割り当てられる制約を表す．(3)は配置される施設の総数はpとする制約を表す．(4)は需要点が施設に割り当てられる場合その施設は選ばれる制約を表す．(5)は最大距離の制約を表す．
(6)はバイナリ変数であることを定義する制約を表す．

4.3. 実験結果

実験結果から$p = 30,40,50$を抜粋し，それぞれの最適解を図 4，またそれぞれの最適値を表 1 として示す．ただし，黄色で示した点が最適解である．また，pの値を 1 から 72 まで増加させたときの最適値の推移を図 5 として示す．

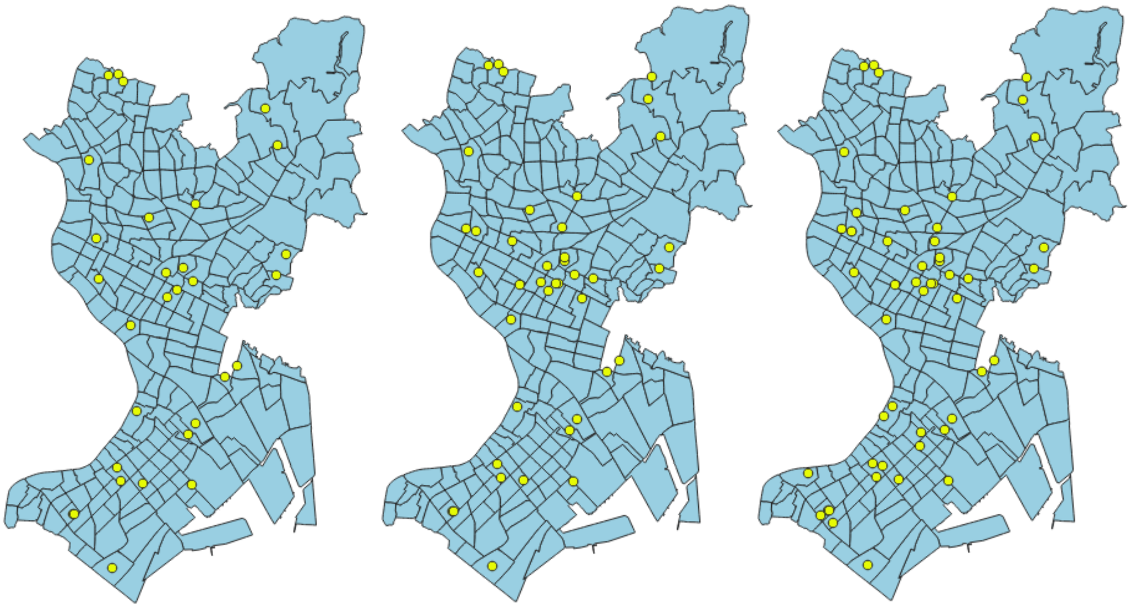

図 4．基本モデルにおける最適配置(左からp =30,40,50)

表 2． $p = 30,40,50$の最適値

p	p=30	p=40	p=50
最適値	2,693	2,693	2,693

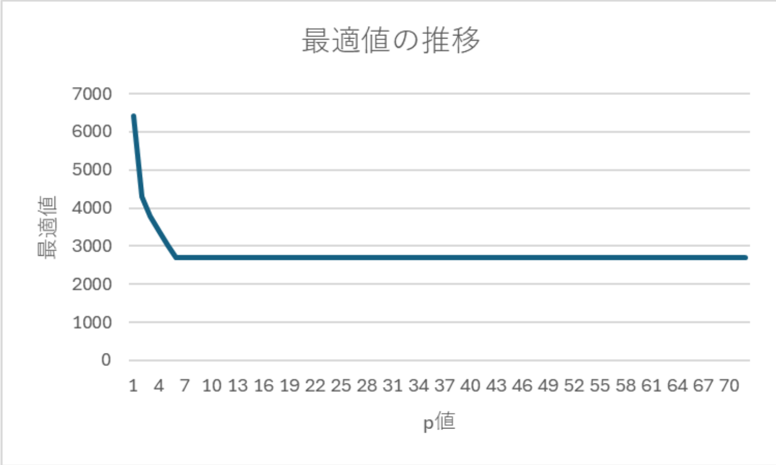

図 5．最適値の推移

図 4 より，p=30,40,50 における配置の違いが確認された．特に，病院数が多いエリアにおいて配置が変化していることが分かる．その上，病院数が少ないエリアでは配置の選択肢が限定されているため，そのまま維持されていることが分かる．表 2 より，p=30,40,50 のすべてで，最適値は等しく，約 2,693m となった．図 5 より，p の値が増加するにつれて最適値が低下し，ある一定値で収束することが確認できる．今回の実験では$p=6$ の時点で，最適値が一定になる．これにより，現在の病院の配置において，7 つ以上になったとしても，最遠距離は変わらないことが言える．

第５章　小児科病院の新設を考慮した場合

第 4 章の結果から，既存の病院のみで最適値を求めた場合，最適値が大きく，現在の千葉県市川市における病院配置が最適かつ妥当な結果とはいえない．そこで，既存の病院に新たな小児科病院を追加する．

普通の徒歩速度（約 4～5km/h）の場合，7.5～ 9 分で歩くことができる距離は 600m である．ただし，患者は子どもであるため，徒歩速度はやや減少すると考えられる．そこで，本研究の需要となる患者が 10 分で歩くことができる距離は 600m として設定した．

新設する小児科病院の候補地点の設定方法は次のように行う．市川市内に 600m 間隔で規則的に打った点 322 のうち，既存の病院の設置位置から半径 600m 以内にカバーされていない 81 地点を抽出する．既存の病院のカバー領域を図 6，抽出された 81 地点を図 7 として示す．また，既存と新設する施設候補地点として計 153 地点が抽出された．

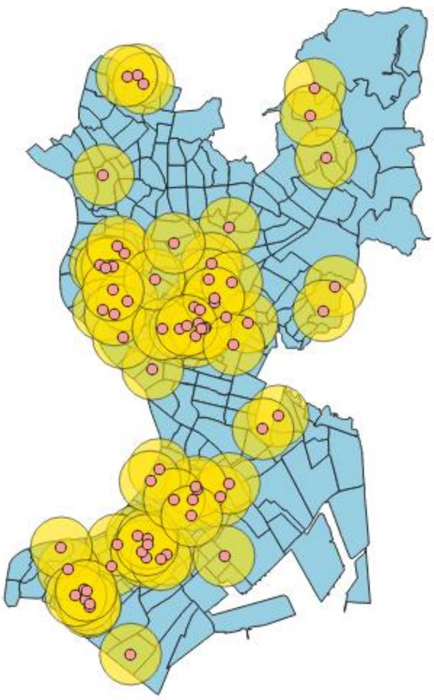

図 6．供給点から 600mのカバー範囲(黄)

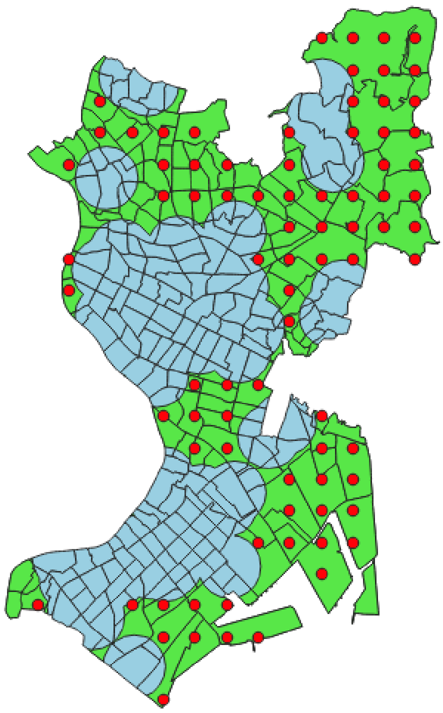

図 7．600mのカバー範囲外の領域(緑)
と新設する病院の候補地点(赤)

5.1. 定数と変数の定義

定数の定義は以下のとおりになる．

i：需要点のインデックス

I：需要点の集合

j：既存の施設候補地点のインデックス

J：既存の施設候補地点の集合

k : 新設する施設候補地点のインデックス

K : 新設する施設候補地点の集合

$|I|$: 需要点の数

$|J|$: 既存の施設候補地点の数

$|K|$: 新設する施設候補地点の数

p：配置する施設の数

d_{ij}：需要点 iから施設候補地点 j までの距離

$$x_j = \begin{cases} 1：候補地点 j に施設を設置する \\ 0：候補地点 j に施設を設置しない \end{cases}$$

$$x_k = \begin{cases} 1：新設候補地点 k に施設を設置する \\ 0：新設候補地点 k に施設を設置しない \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：需要点 i が候補地点 j に割り当てられる \\ 0：需要点 i が候補地点 j に割り当てられない \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1：需要点 i が新設候補地点 k に割り当てられる \\ 0：需要点 i が新設候補地点 k に割り当てられない \end{cases}$$

$w(\geq 0)$：最大の到達距離またはコストを表す変数

また，定数の値は以下のように設定する．

$|I| = 238$

$|J| = 72$

$|K|$ =81

5.2. 定式化

Minimize

$$w, \tag{7}$$

subject to :

$$\sum_{j\in J} y_{ij} + \sum_{k\in K} y_{ik} = 1, \qquad \forall i \in I, \tag{8}$$

$$\sum_{j\in J} x_j + \sum_{k\in K} x_k = p, \tag{9}$$

$$y_{ij} \leq x_j, \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \tag{10}$$

$$y_{ik} \leq x_k, \qquad \forall i \in I, \forall k \in K, \tag{11}$$

$$\sum_{j\in J} d_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{k\in K} d_{ik} \cdot y_{ik} \leq w, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \tag{12}$$

$$x_j, x_k, y_{ij}, y_{ik} \in \{0,1\}. \tag{13}$$

(7)は需要点から供給点の最大距離の最小化を表し，(8)は需要点には一つの施設に割り当てられる制約を表す．(9)は配置される施設の総数は P とする制約を表す．(10)は需要点が施設に割り当てられる場合その施設は選ばれる制約を表す．(11) は需要点が施設に割り当てられる場合その施設は選ばれる制約を表す．(12)は最大距離の制約を表す．(13)はバイナリ変数であることを定義の制約を表す．

5.3. 実験結果

実験結果から$p = 30,40,50$を抜粋し，それぞれの最適解を図 8，またそれぞれの最適値を表 1 として示す．ただし，黄色で示した点が最適解である．また，pの値を 1 から 72 まで増加させたときの最適値の推移を図 9 として示す．

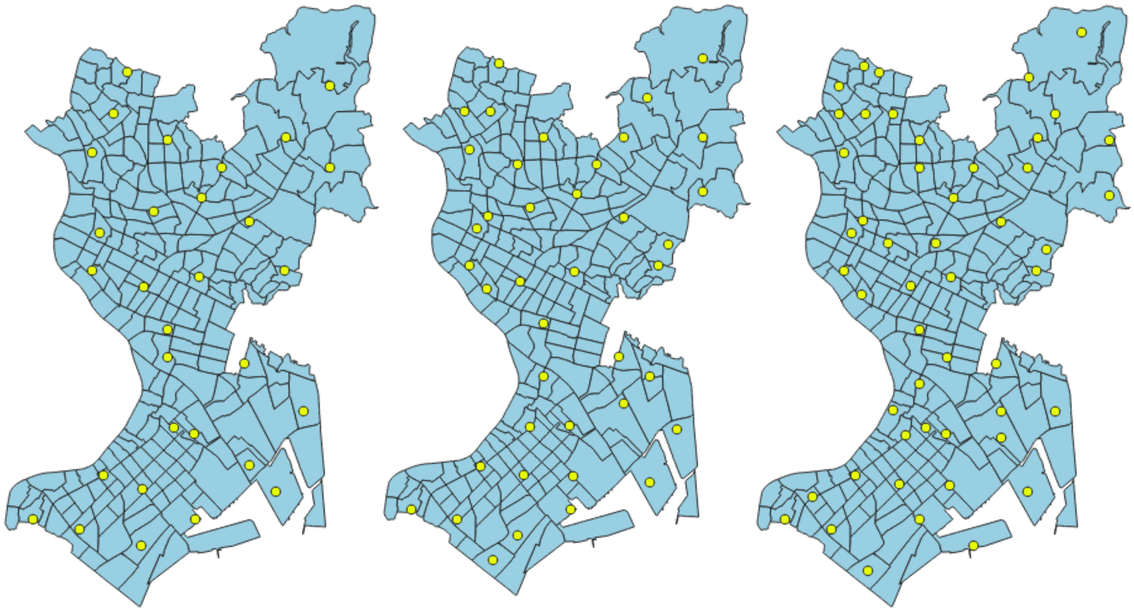

図 8. 小児科病院の新設を考慮した場合の最適配置(左から p =30,40,50)

表 3. $p = 30,40,50$の最適値

p	p=30	p=40	p=50
最適値	977	977	977

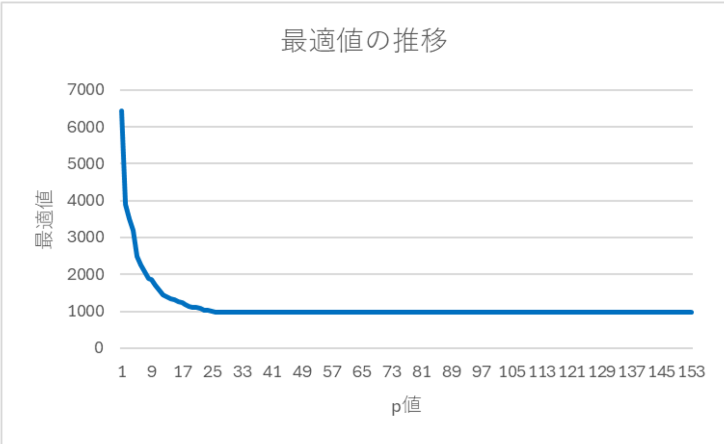

図 9．最適値の推移

図 8 より，第 4 章の結果と比べると，新設の病院が増え，供給点から各需要点へのアクセス距離が最小化され，より均等に配置されたことが分かる．表 3 より，p=30,40,50 のすべてで，最適値は等しく，約 977m となった．第 4 章の結果の約 2,693m と比べると約 1700m も最遠距離が短くなったことがわかる．図 6 より，p の値が増加するにつれて最適値が低下し，ある一定値で収束することがわかる．今回の実験では$p = 26$ の時点で，最適値が一定になる．これにより，現在の病院の配置において，27 つ以上になったとしても，最遠距離は変わらないということが言える．

第 6 章　需要点の重みづけを考慮した場合

次に，需要点の重みづけを追加する．前章までは，市川市内の全地区 238 地点において，均一に重みを 1 として実験を行ってきたが，それぞれの地区にサービスを利用したい人数，もしくはしなければならない人数にはばらつきがある．そこで，それぞれの需要点に各地区の 1 日当たりの受診人数の重みづけを行う． 各地区の 1 日当たりの受診人数は，第 3 章の 3.3 で記した「各地区の人口×0.06」と設定する．

6.1. 定数と変数の定義

定数の定義は以下のとおりになる．

i：需要点のインデックス

I：需要点の集合

j：既存の施設候補点のインデックス

J：既存の施設候補点の集合

k : 新設する施設候補点のインデックス

K : 新設する施設候補点の集合

$|I|$: 需要点の数

$|J|$: 既存の施設候補地点の数

$|K|$: 新設する施設候補地点の数

p：配置する施設の数

d_{ij}：需要点 iから施設候補地点 j までの距離

$$x_j = \begin{cases} 1：候補地点\ j に施設を設置する \\ 0：候補地点\ j に施設を設置しない \end{cases}$$

$$x_k = \begin{cases} 1：新設候補地点\ k に施設を設置する \\ 0：新設候補地点\ k に施設を設置しない \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：需要点 i\ が候補地点\ j に割り当てられる \\ 0：需要点 i\ が候補地点\ j に割り当てられない \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1：需要点\ i\ が新設候補地点 k に割り当てられる \\ 0：需要点\ i\ が新設候補地点 k に割り当てられない \end{cases}$$

w_j : 需要点jの重み

$z(\geq 0)$：最大の到達距離またはコスト

また，定数の値は以下のように設定する．

$|I| = 238$

$|J| = 72$

$|K| =81$

6.2. 定式化

Minimize

$$z, \tag{13}$$

subject to:

$$\sum_{j\in J} y_{ij} + \sum_{k\in K} y_{ik} = 1, \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \tag{14}$$

$$\sum_{j\in J} x_j + \sum_{k\in K} x_k = p, \tag{15}$$

$$y_{ij} \leq x_j, \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \tag{16}$$

$$y_{ik} \leq x_k, \qquad \forall i \in I, \forall k \in K, \tag{17}$$

$$\sum_{j\in J} w_i \cdot d_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{k\in K} w_i \cdot d_{ik} \cdot y_{ik} \leq z, \qquad \forall i \in I, \forall k \in K, \tag{18}$$

$$x_j, x_k, y_{ij}, y_{ik} \in \{0,1\}. \tag{19}$$

(13)は，需要点から供給点の最大距離の最小化を表し，(14)は需要点には一つの施設に割り当てられる制約を表す．(15)は配置される施設の総数はpとする制約を表す．(16)は需要点が施設に割り当てられる場合その施設は選ばれる制約を表す．(17)は需要点が施設に割り当てられる場合その施設は選ばれる制約を表す．(18)は重み(人口)付き最大距離の制約を表す．(19) バイナリ変数であることを定義する制約を表す．

6.3. 実験結果

実験結果から$p = 30,40,50$を抜粋し，それぞれの最適解を図 10，またそれぞれの最適値を表 3 として示す．ただし，黄色で示した点が最適解である．

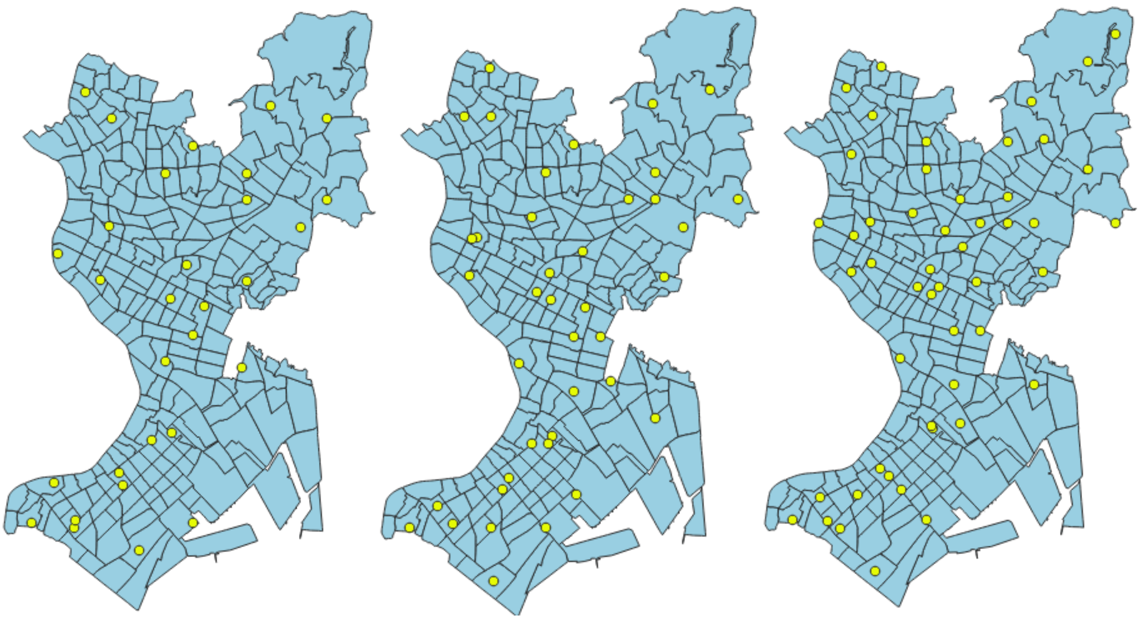

図 10．需要点に重み付けした場合の最適配置(左から p =30,40,50）

表 4．$p = 30,40,50$の最適値

p	p=30	p=40	p=50
最適値	23,414	23,414	23,414

図 10 より，第 5 章の結果と比べると，最適解となる黄色の点の数が広い範囲に分布しているが，中央と左下部エリアに黄色の点が集中していることも見受けられる．中央と左下部エリアは各地区の 1 日当たりの受診人数が多いため，需要点の重みとして付けた「各地区の 1 日当たりの受診人数」が影響していると考えられる．表 4 より，p=30,40,50 のすべてで，最適値は等しく，約 23,414m となる．

第７章　小児科病院の収容人数を考慮した場合

次に，供給点の重みづけを行う．前章では，供給点である病院の施設容量は制約を持たない状態で実験を行ってきた．しかし，１日で見ることができる患者数には限りがあるため，病院の施設容量を加味したモデルを構築する．それぞれの供給点に各小児科病院の収容可能人数を施設容量として重みづけする．各小児科病院の収容可能人数は次のように設定する．各小児科病院の収容可能人数は「各小児科病院の常勤医師数×１日における小児科病院の平均外来患者数(40 人)」と設定する．

7.1. 定数と変数の定義

定数の定義は以下のとおりになる．

i：需要点のインデックス

I：需要点の集合

j：既存の施設候補地点のインデックス

J：既存の施設候補地点の集合

k：新設する施設候補地点のインデックス

K：新設する施設候補地点の集合

$|I|$ ：需要点の数

$|J|$ ：既存の施設候補地点の数

$|K|$：新設する施設候補地点の数

p：配置する施設の数

d_{ij}：需要点 iから施設候補地点 j までの距離

$$x_j = \begin{cases} 1：\text{候補地点 } j \text{に施設を設置する} \\ 0：\text{候補地点 } j \text{に施設を設置しない} \end{cases}$$

$$x_k = \begin{cases} 1：\text{新設候補地点 } k \text{に施設を設置する} \\ 0：\text{新設候補地点 } k \text{に施設を設置しない} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：\text{需要点} i \text{ が候補地点 } j \text{に割り当てられる} \\ 0：\text{需要点} i \text{ が候補地点 } j \text{に割り当てられない} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1：\text{需要点} i \text{ が新設候補地点} k \text{に割り当てられる} \\ 0：\text{需要点 } i \text{ が新設候補地点} k \text{に割り当てられない} \end{cases}$$

w_j：需要点jの重み(各地区にいる 0-14 歳人口)

v_i：供給点iの重み(各病院の収容可能人数)

$z(\geq 0)$：最大の到達距離またはコストを表す変数

7.2. 定式化

Minimize

$$z, \tag{19}$$

subject to:

$$\sum_{j\in J} y_{ij} + \sum_{k\in K} y_{ik} = 1, \qquad \forall i \in I, \tag{20}$$

$$\sum_{j\in J} x_j + \sum_{k\in K} x_k = p, \tag{21}$$

$$y_{ij} \le x_j, \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \tag{22}$$

$$y_{ik} \le x_k, \qquad \forall i \in I, \forall k \in K, \tag{23}$$

$$\sum_{i\in I} w_i \cdot y_{ij} \le v_i \cdot x_j, \quad \forall j \in J, \tag{24}$$

$$\sum_{i\in I} w_i \cdot y_{ik} \le v_k \cdot x_k, \quad \forall k \in K, \tag{25}$$

$$\sum_{j\in J} w_i \cdot d_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{k\in K} w_i \cdot d_{ik} \cdot y_{ik} \le z, \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \tag{26}$$

$$x_j, x_k, y_{ij}, y_{ik} \in \{0,1\}. \tag{27}$$

(19)は，需要点から供給点の最大距離の最小化を表し，(20)は需要点には一つの施設に割り当てられる制約を表す．(21)は配置される施設の総数はpとする制約を表す．(22)と(23)は需要点が施設に割り当てられる場合その施設は選ばれる制約を表す．(24)と(25)は 各供給点 $j \in J$または $k \in K$ に割り当てられる需要点の総重みが，その施設の収容能力を超えないようにする制約を表す．(26)は 重み(人口)付き最大距離の制約を表す．(27) はバイナリ変数であることを定義する制約を表す．

7.3. 実験結果

実験結果から$p = 30,40,50$を抜粋し，それぞれの最適解を図 11，またそれぞれの最適値を表 5 として示す．ただし，黄色で示した点が最適解である．

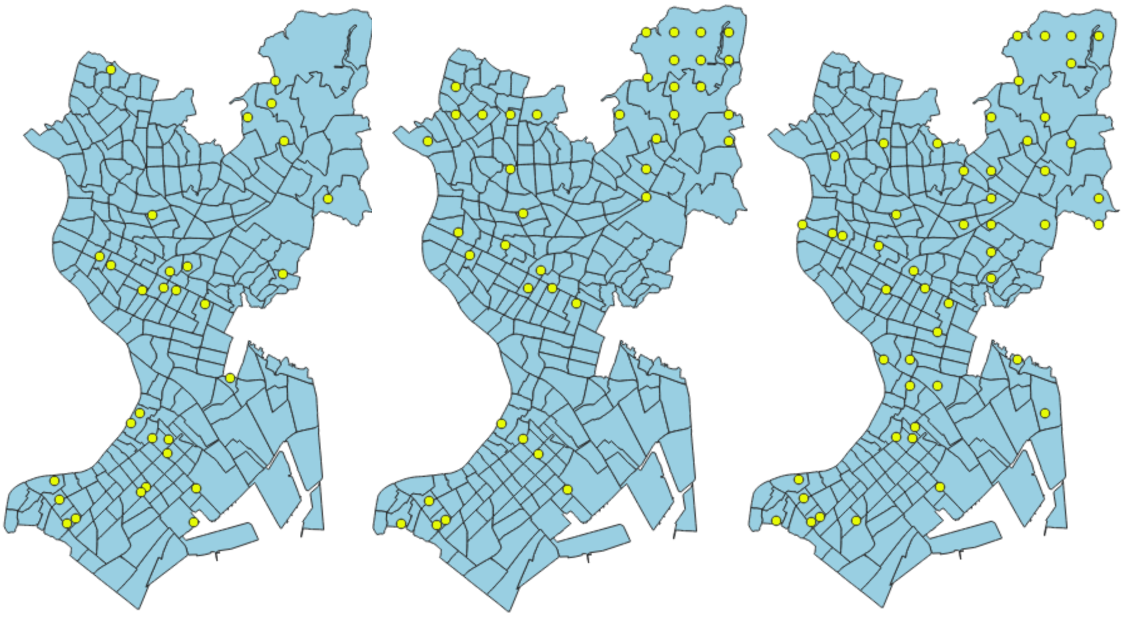

図 11．小児科病院の収容人数を考慮した最適配置(左から$p = 30,40,50$)

表 5．pの数に対する最適値

p	p=30	p=40	p=50
最適値	74,238	74,238	74,238

図 11 より，第 6 章の結果と比べると，より中央と下部エリアでの最適解となる黄色の点が集中していることが分かる．中央と左下部エリアは各地区の 1 日当たりの受診人数が多いため，需要点の重みとして付けた「各地区の 1 日当たりの受診人数」が影響していると考えられる．表 4 より，$p = 30,40,50$のすべてで，最適値は等しく，約 74,238m となる．

第 8 章　考察と今後の課題

第 5 章から第 7 章の実験結果を踏まえ，考察を以下のようにまとめる．

まず，第 5 章では，既存の病院のみでは十分な医療サービスを提供できないことが明らかとなった．この問題に対処するため，新たに小児科病院を追加するモデルを構築し，供給点から需要点までの距離を大幅に短縮する結果が得られた．実験では，最遠距離が約 1000m 以上改善され，医療サービスの均等化が進んだことが確認された．これにより，新設施設が医療アクセスの改善に寄与し，特に需要が高い地域での施設配置が重要であることが示された．また，距離の短縮による患者の利便性向上だけでなく，医療提供者側の負担軽減も期待される．

次に，第 6 章では，需要点に重みづけを行うことで，各地域の人口分布を反映した現実的な施設配置を試みた．このモデルでは，各需要点の受診人数を基に重みづけを追加した結果，需要の偏在が顕著となり，一部のエリアで最適値の配置に広がりが出た．人口動態を反映することで，それぞれの地区の人口に対して適切な供給を行う施設配置が反映されたと考えられる．各地域の実際の医療需要に対応する配置計画の重要性が明確になった．この手法は，公平性を確保しつつ医療サービスを効率的に提供するための基盤を提供している．

さらに，第 7 章では，病院の収容人数という供給点の制約を導入し，施設の収容人数を考慮した現実的なモデルを構築した．追加条件を踏まえ，1 日当たりの受診人数が多いエリアへの施設配置が増加していることから，このモデルでは，各供給点の収容可能人数を基に制約を設定したことで，供給能力を考慮した最適解が得られたといえる．また，収容人数を考慮した制約を導入することで，供給過剰や不足を回避し，医療リソースの効率的な運用が可能になると考えられる．

以上の章を総合すると，モデルの精緻化を通じて現実的な制約を考慮した最適解が得られることが確認された一方で，今後の課題として，地域運営のために新設する病院のコストカットを考慮した適切な施設配置が求められる．新たな制約条件の追加を行い，既存施設の最適な活用と新設施設の計画的配置の両面からのアプローチが必要となる．

本研究で得られた結果は，医療リソースの限られた状況において，効率的かつ公平な医療サービス提供を実現するための貴重な知見を提供したといえる．

参考文献

[1]島井史子，鈴木里歩，小児科医院の最適配置一名古屋市を例としてー，南山大学　理工学部　卒業論文，4 pages，2013.
https://www.st.nanzan-u.ac.jp/info/gr-thesis/2012/09se253.pdf

[2]総務省統計局：国勢調査
https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2020/index.html，（参照日：2024 年 11 月 30 日）

[3]日本医師会：地域医療情報システム
https://jmap.jp/，（参照日：2024 年 9 月 20 日）

[4]独立行政法人福祉医療機構：令和 2 年度に病院・診療所の経営状況調査
https://www.wam.go.jp/hp/wp-content/uploads/211020_No006.pdf，（参照日：2024 年 11 月 30 日）

[5]厚生労働省：令和 2 年度患者調査
https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/20/index.html，（参照日：2024 年 11 月 30 日）