

2023 年度 修士論文

論文題目：将来人口を考慮した高齢者向け施設の最適配置

～小金井市の場合～

指導教員名：五島 洋行

大学院理工学研究科

システム理工学専攻（経営システム系）修士課程

学籍番号 22R6204

氏名フリガナ シュ イイ

氏名 ZHU YIWEI

Abstract

In addressing the societal challenges posed by an aging population in Japan, this study specifically focuses on the problem of elderly facility placement in Koganei City, considering future population dynamics. By employing the Location Set Covering Problem (LSCP), I aimed to determine the optimal placement of elderly care facilities. This goal was achieved through analyzing current demographic data and trends related to aging, which allowed me to forecast future population sizes. My objective was to identify the minimum number of facilities necessary to ensure coverage of all demand points within their service range. The study seeks to address the growing demand for medical facilities driven by the aging population and to promote the efficient use of resources. Through experimental verification, I examined the suitability of facility placement and quantity in response to demographic changes, proposing necessary adjustments to facility placement to adapt to an aging society. This research offers valuable insights for planning and implementing elderly care infrastructure in urban areas, aiming for sustainability amidst demographic shifts.

目次

1. 序章	3
1.1 研究背景	3
1.2 研究目的	5
1.3 論文構成	6
2. 既存研究	7
3. 関連知識	8
3.1 集合被覆問題	8
3.1.1 LSCP	9
3.1.2 MCLP	10
3.2 人口モデル	12
3.2.1 マルサスのモデル	12
3.2.2 ヴェアフルストのモデル	13
3.2.3 年齢構造を考慮する人口モデル	14
3.2.4 コーホート分析法による人口予測	16
4. 提案方式	16
4.1 将来人口予測方式と実験	17
4.2 LSCP 実験手法	20
5. 実験	22
5.1 実験環境	22
5.2 格子状ネットワークでの LSCP 実験方式	22
5.3 実データを用いる実験	24
6. 結論	29
参考文献	30

1. 序章

1.1 研究背景

日本における高齢化は、国内外で注目される社会的な現象であり、その背景としていくつかの重要な要因が挙げられる。まず、戦後のベビーブーム、医療技術の進歩、健康意識の向上により、国民の平均寿命が大幅に延び、高齢者の割合が増加している。これは、特に平成元年（1989年）以降、団塊の世代が65歳を迎え始めたことにより、高齢者人口が急速に増加する要因となっている。内閣府令和4年版高齢社会白書によると、現時点（令和3年）の高齢化率は28.9%となっている。表1のとおりである。

この少子化と高齢化の進行は、経済面にも大きな影響を及ぼしている。労働力人口の減少は生産性の低下や消費の縮小を招き、公的年金、医療福祉、介護などの社会保障給付費用の増加が財政に圧力を加えている。このような状況の中で、高齢者施設の需要が高まっている。都市部と地方部の間での人口分布の偏りが生じ、地方の過疎化と都市部の高齢化が進行している。これは地域コミュニティの維持や地方経済の活性化に関する課題を生じさせている。また、家族構造においても、核家族化の進行や単身高齢者の増加により、家族による高齢者の支援体制が弱まり、地域社会や政府による高齢者施設の重要性が高まっている。

高齢者施設、特に老人ホームなどの施設は、単に高齢者の居住スペースを提供するだけでなく、社会参加、健康管理、レクリエーション活動など、高齢者の質の高い生活を支える重要な役割を担っている。これらの施設によって、高齢者は自立した生活を送りつつ、必要な時に適切なケアやサポートを受けることができる。したがって、高齢化社会における持続可能な発展を目指すには、高齢者施設の整備と機能の向上が不可欠である。これにより、高齢者が社会に積極的に参加し、高齢化社会における新たな可能性を探ることが重要である。

		単位:万人(人口)、%(構成比)		
		令和3年10月1日		
		総数	男	女
人口	総人口	12,550	6,102 (性比) 94.6	6,448
	65歳以上人口	3,621	1,572 (性比) 76.7	2,049
	65～74歳人口	1,754	839 (性比) 91.7	915
	75歳以上人口	1,867	733 (性比) 64.7	1,134
	15～64歳人口	7,450	3,772 (性比) 102.6	3,678
	15歳未満人口	1,478	757 (性比) 105.0	721
構成比	総人口	100.0	100.0	100.0
	65歳以上人口(高齢化率)	28.9	25.8	31.8
	65～74歳人口	14.0	13.8	14.2
	75歳以上人口	14.9	12.0	17.6
	15～64歳人口	59.4	61.8	57.0
	15歳未満人口	11.8	12.4	11.2
資料:総務省「人口推計」令和3年10月1日(令和2年国勢調査を基準とする推計値)				
(注1)「性比」は、女性人口100人に対する男性人口				
(注2)四捨五入の関係で、足し合わせても100.0%にならない場合がある。				

表1. 高齢化の現状

1.2 研究目的

本研究の主要な目的は、日本の人口高齢化の進展に伴い生じる社会的課題に対応し、高齢者ニーズに適切に応えるための高齢者施設の最適な配置を見つけることにある。これは、現行の人口統計データと高齢化の動向から、小金井市の人口動態が将来的にどのような変化するかを分析し、その予測結果を基に最も効率的な高齢者施設の配置を提案することを目指している。このアプローチは、高齢者施設の効果的な利用を促進し、必要な地域に適切な高齢者サービスを提供することを目指すものである。

研究の第一段階として、現行の人口統計データと高齢化の動向を徹底的に分析する。この分析により、小金井市の人口動態の変化や高齢者人口の分布などの詳細な情報が得られる。この情報は、将来の高齢者サービス需要の予測に不可欠であり、小金井市の高齢者施設の必要性を見極めるための基礎データとして活用される。

次に、この予測結果を基に Location Set Covering Problem (LSCP) を適用し、最も効率的かつ効果的な高齢者施設の配置を決定する。LSCP は、すべての需要が少なくとも 1 つの施設によってカバーされるよう施設を配置し、需要点全体をカバーできる施設の中で施設数が最も少なくなるものを求める数理問題であり、LSCP の実験をすることで、地域の実情に合わせた適切な高齢者施設配置の提案が可能となる。本研究は、人口の高齢化という社会的課題に対応するため、資源の有効活用を目指している。高齢化社会においては、高齢者サービスの需要が増加する一方で、コストの制約も厳しくなる。そのため、限られたリソースを最大限に活用し、地域社会にとって最適な高齢者サービスを提供することが求められる。本研究により、地域社会の持続可能な発展のために必要な、高齢者施設の適切な配置に関する重要な参考情報を提供することが期待される。さらに、本研究は、高齢者施設の配置に関する新たな知見を提供することで、将来の高齢者政策の策定や地域社会の福祉増進計画の策定に役立つと考えられる。高齢者施設の配置は、地域住民の健康状態や生活の質に直接的な影響を及ぼすため、本研究は地域社会の福祉向上にも寄与することが期待される。このように、本研究は、高齢化社会における高齢者サービスの最適化と、地域社会の健全な発展に寄与することを目的としている。

1.3 論文構成

本論文の構成は、日本の高齢化に伴う高齢者施設の最適配置を探求するための包括的な枠組みを提供する。第1章「序章」では、研究の背景と目的を概説し、研究の必要性と関連性を強調する。ここでは、日本の高齢化の進展と、これが地域社会および福祉システムに与える影響について説明し、研究の方向性と期待される成果に焦点を当てる。

第2章「既存研究」では、この研究分野における先行研究のレビューを行い、既存の知識と方法論に関する理解を深める。

第3章「関連知識」では、本研究の理論的基礎を構築する。集合被覆問題のサブセクションでは、Location Set-Covering Problem と Maximal Covering Location Problem について詳述する。また、人口予測モデルのサブセクションでは、マルサスのモデル、ヴェアフルストのモデル、年齢構造を考慮する人口モデル、コーホート分析法を用いる人口予測モデルを紹介する。

第4章「提案方式」では、人口予測方式について詳細に説明し、本研究でのアプローチを説明する。

第5章「実験」では、実験環境の設定から、予備実験、実データを用いた実験、そして提案方式を用いて解いた実験結果に至るまで、研究の実証部分を詳細に記述する。

第6章「結論」では、研究結果をまとめ、その意義と影響を考察する。最後に、第7章「おわりに」で、全体の研究を振り返り、将来の研究に向けた提案と見通しを示す。

2. 既存研究

施設配置問題における先駆的な研究としては、Toregasら[1] (1971年)、ToregasとReVelle (1972年) [2]の Location Covering Set Problem についての研究がある。Toregasは、有限の需要点と施設候補地点を用いて、最小数の施設で全ての需要点をカバーする問題を提案した。このアプローチは、その後の研究に大きな影響を与え、LSCPは高齢者施設配置問題の標準的な手法として確立された。例えば、Church and Velle (1974年) [3]は、LSCPを発展させ、特定の範囲内で最大数の人口をカバーする施設配置を目指す Maximal Covering Location Problem (MCLP) を提案した。これらの問題は、限られたリソースの中で最適なサービスの提供を実現するための重要なツールとなっている。さらに、Daskin et al.[4] (1989年)は、LSCPとMCLPにおける需要の集計方法や施設の数と位置に関する誤りを指摘し、これらの問題への対処方法を提案した。近年ではGIS技術の進歩に伴い、地理的特性や人口分布を詳細に考慮したLSCPモデルが開発されている。MurrayとWei [5] (2013年)、Wei, Murray, Batta (2014年)は、より正確な最適解を得るための新しいフレームワークを開発し、施設配置問題への新たなアプローチを提供した。鈴木智子,山本裕二,小林信彦ら (2007年)による研究として、「少子化に伴う保育所と幼稚園の需給不均衡に関する施設配置の最適化研究」[6]がある。これは、国勢調査データとコーホート分析法を基に、2050年までの保育所、幼稚園などの需要予測を行い、地域ごとの人口動態を考慮した施設配置の最適化について考察した。古藤浩 (2021年)による「人口予測における誤差から考察する予測方法・地域の影響」[7]の研究がある。これは、社会経済計画や都市計画の基本条件としての人口予測に焦点を当て、予測結果に常に存在する誤差の理解とその影響を考察するものである。彼らの研究では、トレンド予測、コーホート変化率法、コーホート要因法という3つの異なる予測手法を用いて、日本の市区町村別人口予測の結果における誤差を比較し、予測検証の基礎を築く。この研究は、高齢者施設の配置に関するLSCP実験を行う際の人口予測の精度を高めるための方法論的な参考となる。

3. 関連知識

施設配置問題は施設の最適な位置を決定する問題である。この問題において P-メディア
ン問題, P-センター問題, LSCP (Location Set Covering Problem), MCLP (Maximal
Covering Location Problem) などは特に有名である。LSCP は各施設が特定のサービス範
囲を持ち, 全ての需要点が少なくとも 1 つの施設の範囲内に含まれるように最小の施設数
を決定する問題である。一方, MCLP は特定の数の施設を開設する際に最も多くの需要点
をサービス範囲内に収める施設の位置を決定する問題である。これらの問題は数理最適化
の分野で研究され, 都市計画や病院, 消防署, 警察署の配置といった実世界の応用分野で
使用される。

3.1 集合被覆問題

集合被覆問題は LSCP の関連問題である。集合被覆問題は, 施設設置可能の集合 I と,
需要者集合 J が与えられるとき, 各施設がなるべくすべての利用者をカバーするように,
コストと施設数が最も少なくなるものを求める最適化問題である。

集合被覆問題の定数・変数・決定変数は表 1 と表 2 のとおりである。

表 1. 集合被覆問題の定数と変数の定義

i	需要点
I	需要点の集合
J	施設設置可能な地点
j	施設設置可能な地点の集合
c_j	施設を設置するために必要なコスト
Z	総施設数

表 2. 集合被覆問題の決定変数の定義

x_j	1	施設が選択される場合
	0	施設が選択されない場合
a_{ij}	1	カバーされる場合
	0	カバーされない場合

定式化は以下のとおりである.

Minimize

$$Z = \sum_{j \in J} c_j x_j, \quad (1)$$

subject to :

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq 1, \quad \forall i (\in I), \quad (2)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j (\in J) \quad (3)$$

(1)は目的関数で、コスト最小化を示す。(2)は制約条件で、各要素 i に対応できる要素 j を少なくとも 1 つ設置することを表す。(3)は、施設を選ぶ/選ばないことを表すバイナリ制約である。

3.1.2 LSCP

Location Set Covering Problem (LSCP) は各需要が少なくとも 1 つの施設によって、カバーできる潜在的な施設の位置集合 N_i を持ち、各需要が最低 1 つの施設によってカバーされるように施設を配置される。そして、すべての需要点をカバー可能な施設の中から、最も少ない数の施設で構成される解を特定する。

LSCP の定数・変数・決定変数は表 3 と表 4 のとおりである。

表 3. LSCP の定数と変数の定義

i	利用者地点 (需要)
I	利用者地点の集合
j	施設設置可能な地点
J	施設設置可能な地点の集合
N_i	需要 i をカバーできる潜在的な施設 j の集合
d_{ij}	需要 i から施設 j への距離

表 4. LSCP の決定変数の定義

x_j	1	施設が選択される場合
	0	施設が選択されない場合

定式化は以下のとおりである.

Minimize

$$Z = \sum_j x_j, \quad (4)$$

subject to

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \quad \forall i (\in I) \quad (5)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j (\in J) \quad (6)$$

(4)は目的関数で, 設置する施設の数をもっとも最小にすることを示している. (5)は制約条件で, 各需要に対応できる施設を少なくとも 1 つ設置することで, つまりカバーすることを求めている. (6)は, 施設を選ぶ/選ばないことを表すバイナリ制約である.

3.1.2 MCLP

Maximal Covering Location Problem(以下, MCLP)は, 限られた数の施設もしくは一定のコストで, 指定されたサービス距離または時間内にサービスのカバー率を最大化させる被覆問題である.

MCLP の定数・変数・決定変数は表 5 と表 6 のとおりである.

表 5. MCLP の定数と変数の定義

i	利用者地点 (需要)
I	利用者地点の集合
j	施設設置可能地点
J	施設設置可能地点の集合
N_i	需要 i をカバーできる潜在的な施設 j の集合
a_i	i における需要人口数
d_{ij}	需要 i から施設 j への距離
p	設置する施設の数

表 6. MCLP の決定変数の定義

x_j	1	施設が選択される場合
	0	施設が選択されない場合
y_i	1	カバーされる場合
	0	カバーされない場合

定式化は以下の通りである.

Maximize

$$Z = \sum_i a_i y_i, \quad (7)$$

subject to:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_j = p \quad (9)$$

$$x_j, y_i \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$i \in I, j \in J \quad (11)$$

(7)は目的関数であり, Z はカバー率で, カバーされた需要の最大化を示している. (8)は制約条件で, 需要点 i の付近に施設が配置された場合のみ, 需要点 i をカバーできること

を表している。(9)は配置する施設数が p として設置している。(10)はバイナリ制約でそれぞれ表している。(11)は需要と施設は存在していることである。

3.2 人口モデル

人口変動問題に対する最も基礎的な解釈は指数関数的ないし幾何学的な増加あるいは減少を記述する人口数理モデルとして表現される。

3.2.1 マルサスのモデル

マルサスのモデルは、人口の個体数あるいは個体群サイズの指数関数的に増加または減少する人口モデルである。このモデルは1798年にトマス・ロバート・マルサスがはじめて示したとされ、マルサスのモデルと呼ばれている。

時刻 t （時間間隔 dt を1年とする）における総人口数を $N(t)$ とする。時間間隔 dt における出生数は $\alpha N(t)dt$ 、死亡数は $\beta N(t)dt$ 、その時点での総人口数と時間間隔に比例とする。したがって、時間間隔 dt での人口の増加数 dN は $N(t + \Delta t) - N(t)$ である。

$$\begin{aligned} N(t + \Delta t) - N(t) &= \alpha N dt - \beta N dt \\ &= (\alpha - \beta) N dt \\ &= \lambda N dt \end{aligned}$$

ただし、 $\lambda = \alpha - \beta$

微分方程式は

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

であり、変数分離法を利用して以下のとおり解ける。

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= \lambda dt \\ \int \frac{dN}{N} &= \int \lambda dt \end{aligned}$$

$N > 0$ より、

$$\ln N = \lambda t + C$$

両辺に対数をとると、 $N(t) = \exp(C + \lambda t)$

つまり、 $N(t) = \exp(\lambda t) C'$

ここで積分定数 C （あるいは C' ）を，初期条件を使って表せる．ここでの初期条件として， $t = t_0$ （年）として，そのときの人口を N_0 とする．つまり，

$$N(t_0) = N_0 = \exp(\lambda t_0) C'$$

これから， $C' = N_0 \exp(-\lambda t_0)$ となる．

$$N(t) = N_0 \exp(\lambda(t - t_0))$$

マルサスのモデルは $\lambda > 0$ のとき，人口数の限界がなくなって，指数関数的に増加することを予測する．しかし，実際にはいろいろな原因で，このような無制限な増加は続かないと考えられる．

3.2.2 ヴェアフルストのモデル

上記のマルサスのモデルを修正して，人口の過密とかの原因を考慮に入れて，次のような修正をしたヴェアフルストのモデルを提案する．人口は継続し続ける限り増加するが，上限（それを定数 N_{max} とする）があるとする．そして，人口変化は，次の各々に比例すると仮定すると

N :現在の人口数

$\frac{1-N}{N_{max}}$:未使用の人口資源に対する割合

N_{max} :施設容量

したがって，微分方程式は

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N \left(\frac{1-N}{N_{max}} \right)$$

両辺を N_{max} で割って， $y = \frac{N}{N_{max}}$ であらわすと，

$$\frac{dy}{dt} = \lambda y(1-y)$$

以下のように変数分離法を利用して解ける

$$\frac{dy}{y(1-y)} = \lambda dt$$

$$\int \frac{dy}{y(1-y)} = \lambda \int dt$$

$$\ln \left| \frac{y}{y-1} \right| = \lambda t + C$$

両辺に対数をとると、

$$\frac{y}{y-1} = \exp(\lambda t + C) = \exp(\lambda t) C'$$

$t = t_0$ における人口数を $N(t_0) = N_0$ とすると、

$$\frac{\frac{N_0}{N_{max}}}{\frac{N_0}{N_{max}} - 1} = \exp(\lambda t_0) C'$$

$$C' = \frac{N_0}{N_0 - N_{max}} \exp(-\lambda t_0)$$

$$N(t) = N_{max} \frac{N_0}{N_0 + (N_{max} - N_0) \exp(-\lambda(t - t_0))}$$

結果によって、この方程式は、人口が小さいときには、成長がほぼ指数的になり、しかし人口がキャリング・キャパシティに近づくと成長が減速し、最終的には人口が N_{max} に収束することを示している。

このモデルは、資源が有限であるという現実を認識しているため、マルサスの人口モデルより現実的であると考えられている。しかし、環境のキャリング・キャパシティが一定であるという仮定や、人口がキャリング・キャパシティに収束するという仮定は、現実の多くのシステムでは必ずしも当てはまらない場合もある。

3.2.3 年齢構造を考慮する人口モデル

人間の集団には様々な年齢の個体が存在する。図2を見ると、若年齢個体が多数の集団と、老年齢個体が多数を占める集団とでは、人口動態が異なる。

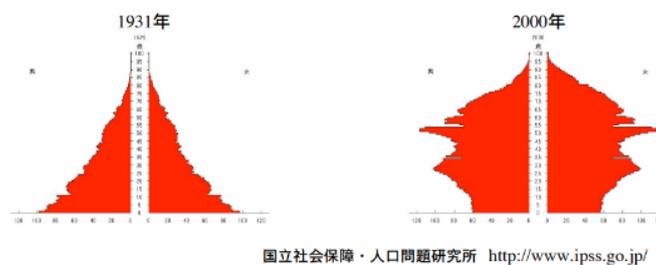


図2, 1931年から2000年の日本人口の年齢構造変化

年齢構造とは、集団を年齢により分割し、各集団に属する個体数の時間変化をモデルである。

$N_x(t)$:時刻 t における x 歳の個体数

時刻 t での年齢別人口は、ベクトル

$$N(t) = \begin{pmatrix} N_1(t) \\ N_2(t) \\ N_3(t) \\ \dots \\ N_m(t) \end{pmatrix}$$

で表せる。ここで、 m は最高年齢を表し、

$k \geq m + 1$ では、 $N_k(t) = 0$ とする。

時刻 t における i 年齢人口の時刻 $t + 1$ における生残率を S_i とおくと、

$$N_{i+1}(t + 1) = S_i N_i(t)$$

人口モデルは各年齢層の人口に出生率をかけたものを足し上げて計算できる。

$$\begin{bmatrix} N_1(t + 1) \\ N_2(t + 1) \\ \dots \\ N_{n-1}(t + 1) \\ N_n(t + 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} & a_n \\ b_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b_{n-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1(t) \\ N_2(t) \\ \dots \\ N_{n-1}(t) \\ n(t) \end{bmatrix}$$

となる。ここで、

$$L = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} & a_n \\ b_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b_{n-1} & 0 \end{bmatrix}$$

をレスリー行列(Leslie matrix)と呼ぶ。 $\omega \times \omega$ の行列は一般に ω 個の固有値を持つ。レスリー行列は実数で正の固有値 λ_1 が必ず存在する。

固有ベクトルの一次独立性から、解は

$$N(t) = L^t N(0) = c_1 \lambda_1^t e_1 + c_2 \lambda_2^t e_2 + \dots + c_\omega \lambda_\omega^t e_\omega$$

ここで、 c_i は定数、 e_i は固有値 λ_i に対応する固有ベクトル。行列の定理より、各年齢層は毎年 λ_1 倍、年齢分布は固有ベクトルに比例する

$$N(t) \propto c_1 \lambda_1^t e_1$$

レスリー行列の最大固有値 λ_1 と、対応する固有ベクトルは、 $\lambda_1 > 1$ の時、集団サイズは最終的に指数的に増加する。 $\lambda_1 < 1$ の時、集団サイズは最終的に指数的に減少してゼロに収

束する。

3.2.4 コーホート分析法による人口予測

本研究では、コーホート分析法(Cohort Component Method)を用いることで、小金井市の人口予測を行う。コーホート分析法は同一年に出生した集団に対し、出生、生存、地域内の人口転入・転出などの変動要因を与えることで、将来の人口を予測する方法のことであり、この手法は広く使用されている人口予測手法である。図3に示す。

本研究は市町村別の死亡数を求める「自然減ブロック」、市町村別の出生数を求める「自然増ブロック」、市町村別の人口転入・転出数を求める「人口移動ブロック」からなる。自然減ブロックでは、市町村別の男女別・年齢別人口に外生的に与えた生存率を乗じることによって、死亡数が求められる。自然増ブロックでは、市町村別の女性の年齢別人口に出生率を乗じる新出生児の数が求められる。人口移動ブロックでは、所得の格差と男女別・年齢別の転出率を外生的に与え、市町村間の出発地と到着地のペアに対して男女別・年齢別の移動人数を推計し、転入者数と転出者数が求められる。

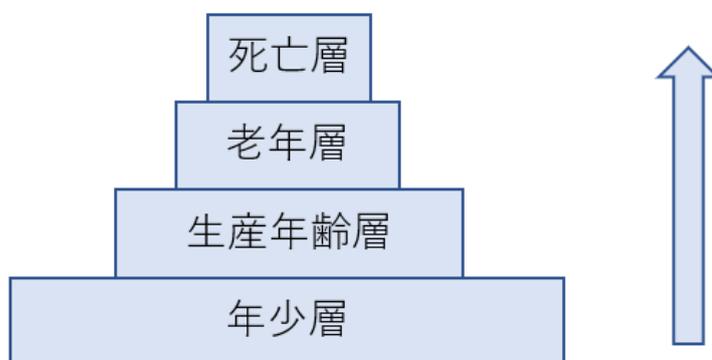


図3. 人口の年齢分布

4. 提案方式

4.1 将来人口予測方式と実験

本研究における人口予測モデルの要点は図3に示されている。予測にあたっては、令和2年（2020年）の国勢調査データを基準人口として使用する。

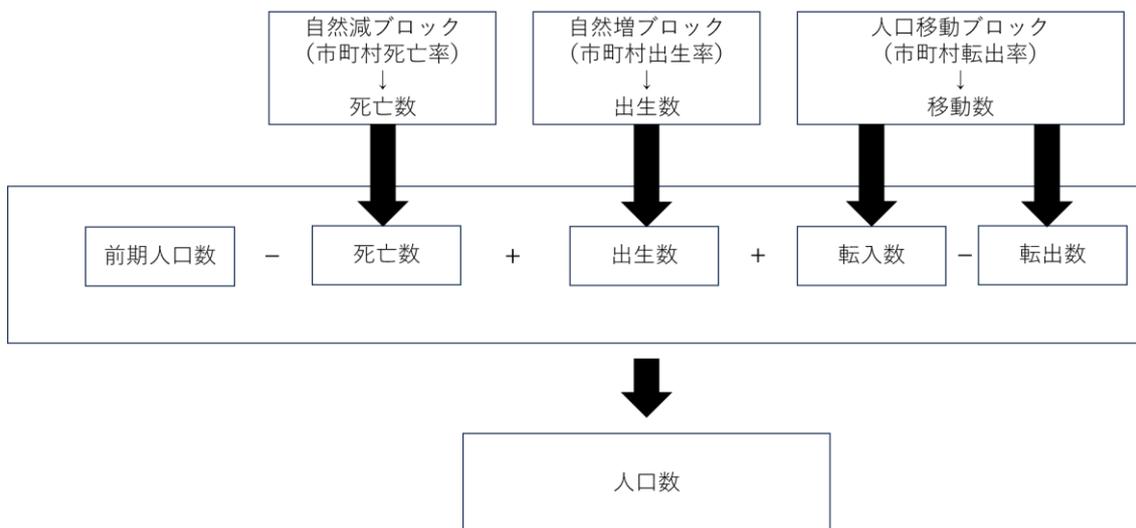


図3. コーホート分析法人口予測モデルの概略

(1) 生存率

小金井市の各年齢層における生存率は、総務省の推計人口データと厚生労働省の人口動態統計に基づいて、2010年から2020年までの期間に推計される。

(2) 出生率

年齢層別の出生率は、人口動態統計における小金井市の年齢層別出生数と推計人口データを基に、2010年から2020年にかけての出生率を算出する。この期間の平均出生率に、国立社会保障・人口問題研究所（以下、社人研）による全国の予測値を適用し、市町村別、年齢別の出生率予測を行う。出生率の全国予測値には、社人研の中位ケースが用いられ、このケースでは合計特殊出生率が2020年の1.33から2065年にかけて1.44まで上昇し、2070年には1.36に収束すると予測されている。

(3) 転入・転出率

地域間の人口移動分析においては、小金井市から提供された住民基本台帳の人口移動データを基に使用する。2020年における性別及び年齢別の転出者数をこのデータから抽出し、転出率を算出した。また、2020年の移動傾向を分析し、この結果をモデルの初期条件

として設定する。2021年以後の転出率については、2020年のデータを基準として変わらないという前提で計算を行う。2021年以降の人口移動傾向に関しては、2020年のデータを基にし、変化する外部経済シナリオを考慮に入れて推定する。本研究では、各県の所得差に関しては、2010年から2020年までの期間に見られた平均的な水準が今後も継続すると仮定している。これは、各県で2010年から2020年までの期間の一人当たり県内総生産(GDP)の平均値を算出し、その比率を2020年以降も保持するという方法で行われる。このような前提に基づき行われた予測を、以下では「予測シナリオ」と呼ぶ。

図4は小金井市の2020年から2050年までの人口予測結果である。青色は予測シナリオの結果であり、オレンジ色は社人研の予測データである。図5は小金井市の高齢層人口の予測データである。図6は小金井市の人口構造推移である。社人研との誤差は最大0.247万人となる。表5は予測シナリオと社人研データとの誤差である。

結果をみると、2020年からの30年間で、2030年時点で人口数がピークとなる。2020年から、生産年齢層が高齢者層の予備軍となって、今後の30年間に高齢層人口が増加していくことが予想される。

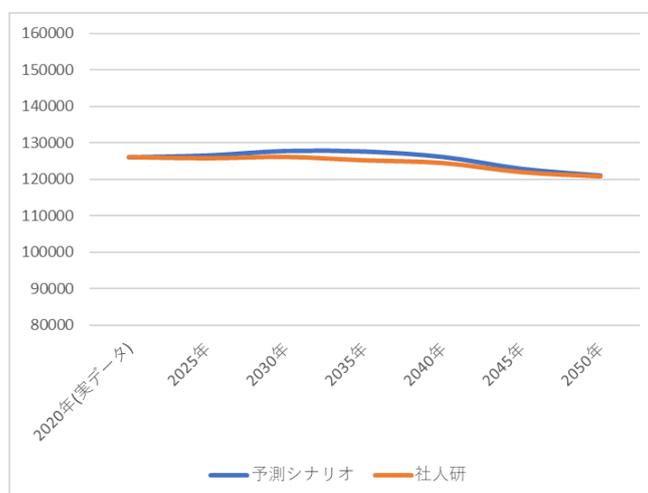


図4. 小金井市の人口予測結果

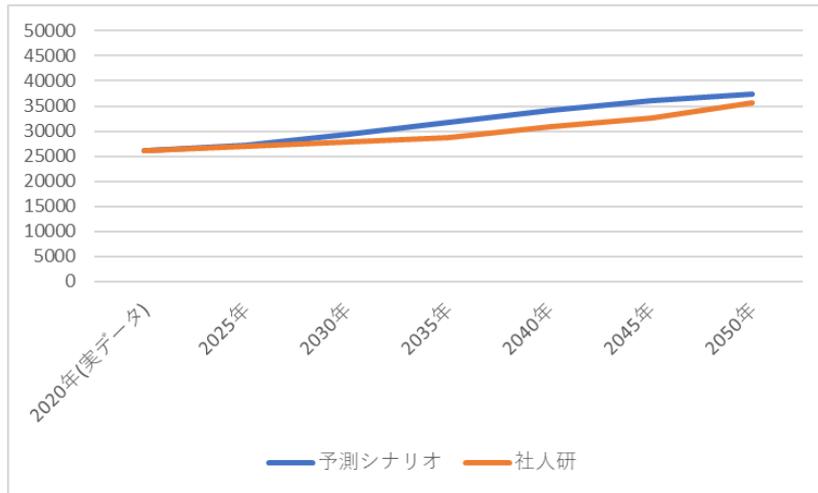


図5. 小金井市高齢層の人口予測結果

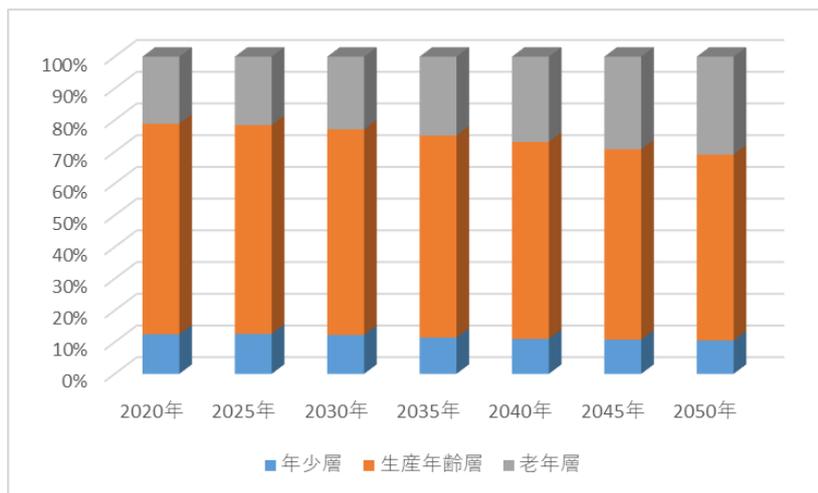


図6. 小金井市人口構造推移

表6. 予測シナリオと社人研データとの誤差 (万人)

年	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
誤差	0	0.083	0.170	0.247	0.17	0.092	0.02

4.2 LSCP 実験手法

本研究では、以下の手順（図7）に従って展開する。まず、人口データの収集が行われる。この過程では、国勢調査データ、地方自治体から提供される人口統計、国立社会保障・人口問題研究所（社人研）の公開データなどからのデータが集められる。次に、収集したデータを基に、人口予測の作業が進められる。この段階では、過去の人口動態を分析し、将来の人口変動を予測するために、人口予測モデルが試みられる。予測の手法の精度は、社人研のデータとの比較によって検証され、精度が確認される。予測手法が確立された後、計算された人口増加率に基づいて、将来の需要増加量を予測する。その後、実際のデータを用いて、現在時点でのLSCPを解く。計算された将来の需要増加量を踏まえ、新たな需要点を地図上にプロットし、再度LSCPを解くことで、将来の施設配置方針が策定される。このようにして、本研究は、将来にわたる人口動態の変化に適応した、効率的かつ効果的な社会基盤施設の配置計画を提案する。

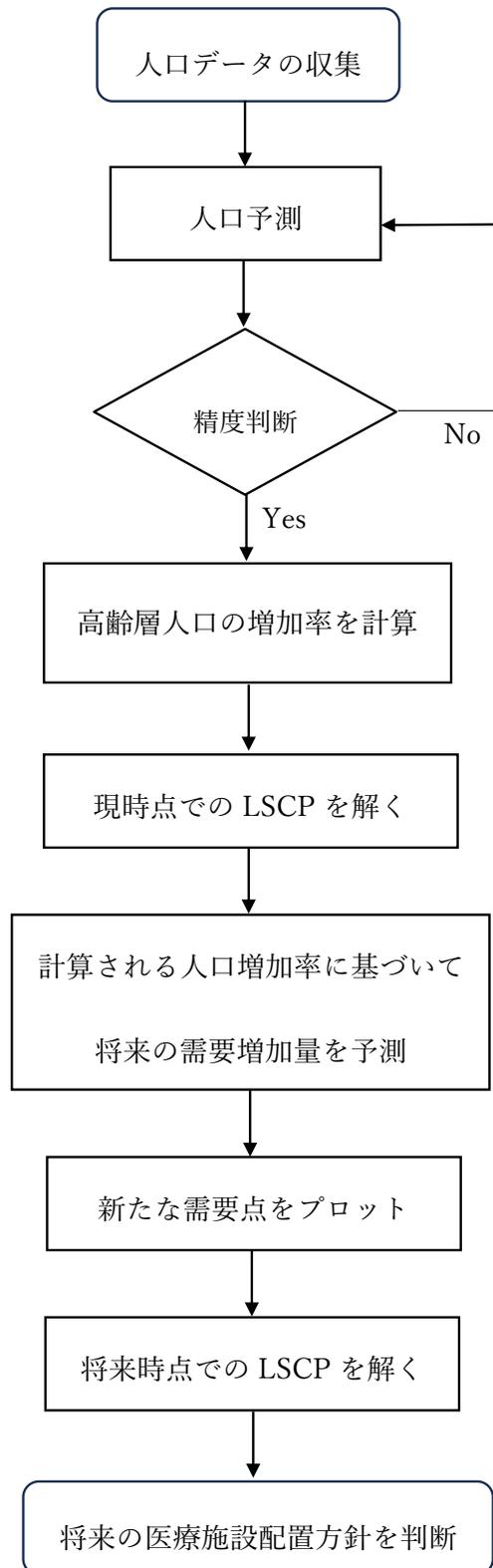


図7. 研究の流れフローチャート

5. 実験

5.1 実験環境

実験に用いた計算機環境は表7のとおりである。

表7. 実験環境

プロセッサ	11th Gen Intel(R) Core(TM) i3-1115G4 @ 3.00GHz 3.00 GHz
実装RAM	8.00 GB
使用言語	Python
ソルバー	Gurobi Optimizer version 10.0.2 build v10.0.2rc0 (win64)

5.2 格子状ネットワークでの LSCP 実験方式

本研究では、 100×100 の格子状ネットワークを用いて、Location Set Covering Problem (LSCP) の実験を行う。このネットワーク上で、ランダムに生成された一定数の点を需要点とし、ネットワーク上の各点を設備候補点とする。初期段階では、需要点を70個設定し、候補点を30として設定し、ノードの数を増やして、LSCPを解く。この実験において、青色の点は需要点を、赤色の点は設備点を示す。

設備点のカバー範囲は、緑色の円で表される。緑色の円によって囲まれた範囲内の需要点は、設備点によってカバーされていると見なされる。つまり、緑色の円内に位置する需要点は、設備点によってサービスを受けることができる。

予備実験では、小規模の格子状ネットワークを使用し、人口予測の結果から人口増加の比率を導き出す。そして、この人口増加比率に基づき、都市の需要点の密度を調整し、新たな需要点の分布を設定する。

需要点を70、候補点を30として、LSCP実験を行う。実験データは図8に示す。最小施設数は16となる。実験結果は図9に示す。

被覆できる距離を半径15、需要点を予測した2020年から2025年の老年層人口増加率4.25%に基づいて増加させ、LSCP実験を行う。最小施設数は16から17に増えた。実験結果は図10に示す。

被覆できる距離を半径15、需要点を予測した2020年から2050年の老年層人口増加率11.88%に基づいて増加させ、LSCP実験を行う。最小施設数は16から18に増えた。実験結果は図11に示す。

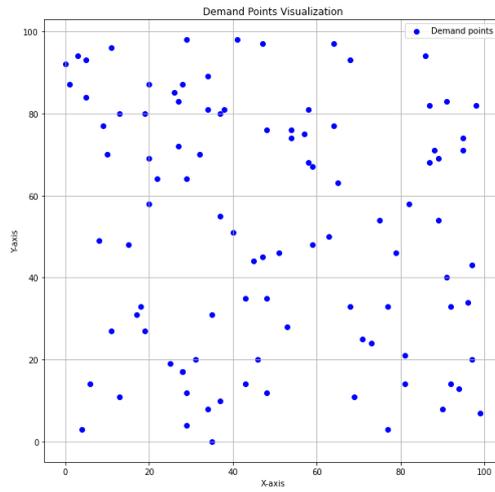


図 8. 実験用データ

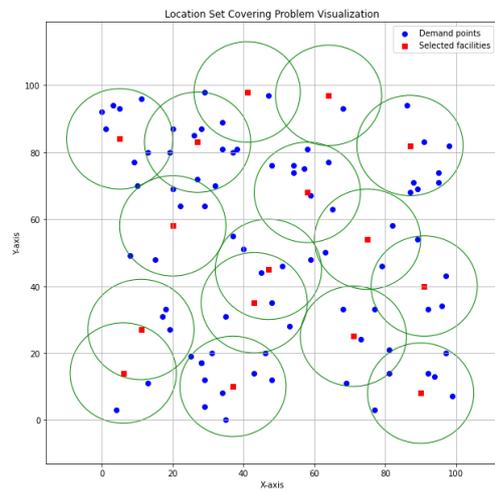


図 9. 需要点 100 としての LSCP

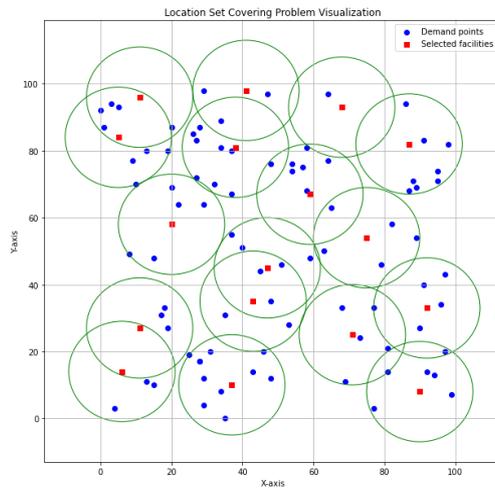


図 10. 5 年後の予測 LSCP

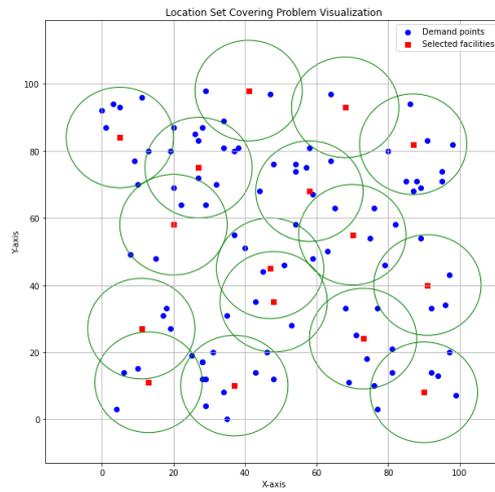


図 11. 30 年後の予測 LSCP

5.3 実データを用いる実験

本実験では，小金井市の実データを使用する．使用したデータを以下の図 12 に示す．

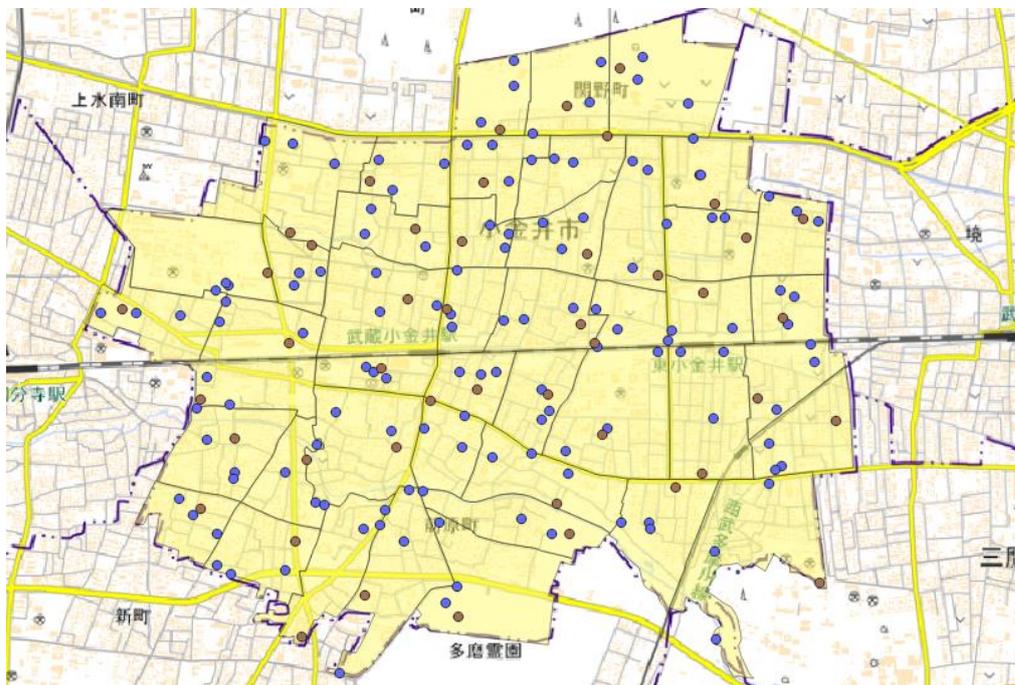


図 12. 使用した実データ

緯度経度から平面直角座標系に変換を行う。

$$x = \bar{A} \left(\xi' + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \sin 2j\xi' \cos h2j\eta' \right) - \overline{S_{\varphi_0}},$$

$$y = \bar{A} \left(\eta' + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \cos 2j\xi' \sin h2j\eta' \right),$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\tau \bar{t} \lambda_c + \sigma t \lambda_s}{\sigma \bar{t} \lambda_c - \tau t \lambda_s} \right),$$

$$m = \frac{\bar{A}}{a} \sqrt{\frac{\sigma^2 + \tau^2}{t^2 + \lambda_c^2} \left(1 + \left(\frac{1-n}{1+n} \tan \varphi \right)^2 \right)}$$

ここでは、 φ は緯度であり、 λ は経度である。 φ_0 と λ_0 は平面直角座標系原点の緯度経度である。 a は楕円形の長半径であり、 F は逆扁平率であり、 m_0 は平面直角座標系のX軸における縮尺係数である。

$$n = \frac{1}{2F - 1},$$

$$t = \sin h \left(\tan h^{-1} \sin \varphi - \frac{2\sqrt{n}}{1+n} \tan h^{-1} \left(\frac{2\sqrt{n}}{1+n} \sin \varphi \right) \right),$$

$$\bar{t} = \sqrt{1 + t^2},$$

$$\lambda_0 = \cos(\lambda - \lambda_0),$$

$$\lambda_s = \sin(\lambda - \lambda_0),$$

$$\xi' = \tan^{-1} \left(\frac{t}{\lambda_c} \right),$$

$$\eta' = \tan h^{-1} \left(\frac{\lambda_s}{\bar{t}} \right),$$

$$\sigma = 1 + \sum_{j=1}^5 2j\alpha_j \cos 2j\xi' \cos h2j\eta',$$

$$\tau = \sum_{j=1}^5 2j\alpha_j \sin 2j\xi' \sin h2j\eta',$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}n - \frac{2}{3}n^2 + \frac{5}{16}n^3 + \frac{41}{180}n^4 - \frac{127}{288}n^5,$$

$$\alpha_2 = \frac{13}{48}n^2 - \frac{13}{48}n^3 + \frac{557}{1440}n^4 + \frac{281}{630}n^5,$$

$$\alpha_3 = \frac{61}{240}n^3 - \frac{103}{140}n^4 - \frac{15061}{161280}n^5,$$

$$\alpha_4 = \frac{49561}{161280}n^4 - \frac{179}{168}n^5,$$

$$\alpha_5 = \frac{34729}{80640},$$

$$\bar{S}_{\varphi_0} = \frac{m_0 a}{1+n} \left(A_0 \frac{\varphi_0}{\rho''} + \sum_{j=1}^5 A_j \sin 2j\varphi_0 \right),$$

$$\bar{A} = \frac{m_0 a}{1+n} A_0,$$

$$A_0 = a + \frac{n^2}{4} + \frac{n^4}{64},$$

$$A_1 = -\frac{3}{2} \left(n - \frac{n^3}{8} - \frac{n^5}{64} \right),$$

$$A_2 = \frac{15}{16} \left(n^2 - \frac{n^4}{4} \right)$$

$$A_3 = -\frac{35}{48} \left(n^3 - \frac{5}{16}n^5 \right),$$

$$A_4 = \frac{315}{512}n^4,$$

$$A_5 = -\frac{693}{1280}n^5.$$

需要点を 100, 候補点を 30 として, LSCP 実験を行う. 変換されるデータは図 13 に示す. 最小施設数は 15 となる. 実験結果は図 14 に示す.

被覆できる距離を半径 15, 需要点を予測した 2020 年から 2025 年の老年層人口増加率 4.25%に基づいて増加させ, LSCP 実験を行う. 最小施設数は同じく 15 となり. 実験結果は図 15 に示す.

被覆できる距離を半径 15, 需要点を予測した 2020 年から 2050 年の老年層人口増加率 11.88%に基づいて増加させ, LSCP 実験を行う. 最小施設数は 15 から 17 に増えた. 実験結果は図 16 に示す.

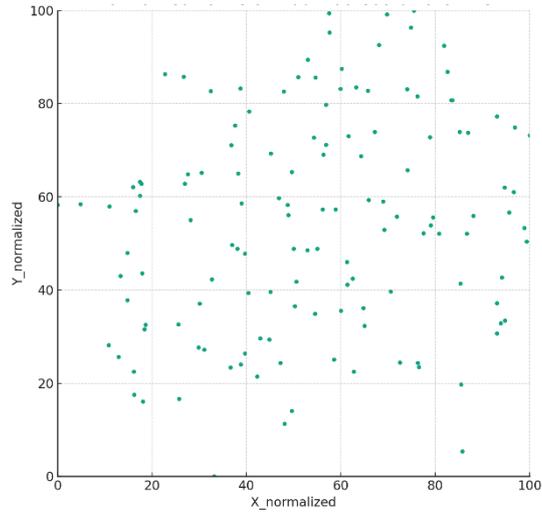


図 13. 変換される実験データ

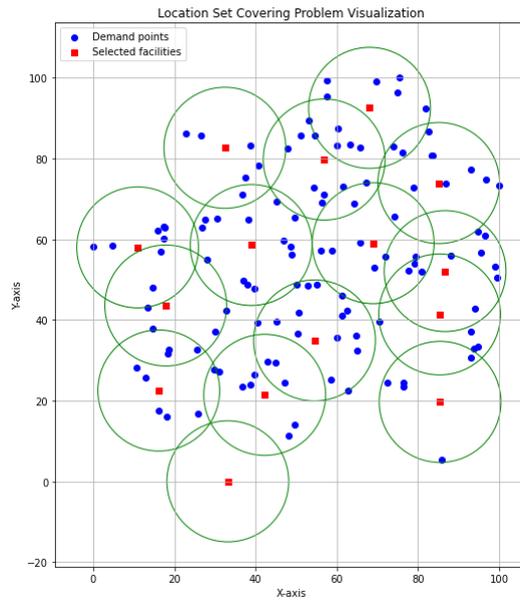


図 14. LSCP で解いた配置状況

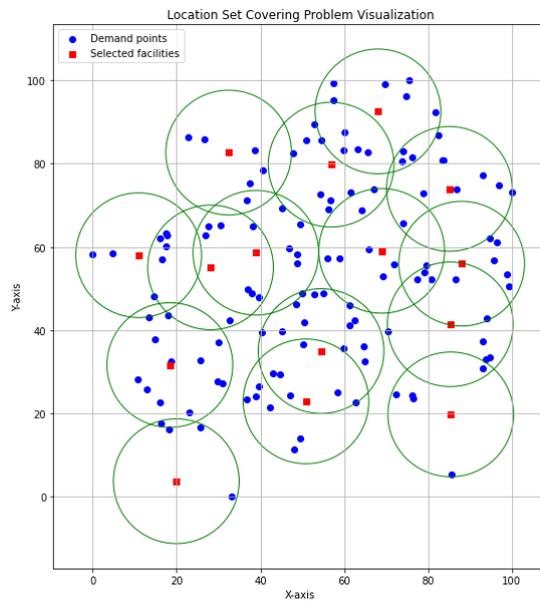


図 15. 5年後の予測 LSCP

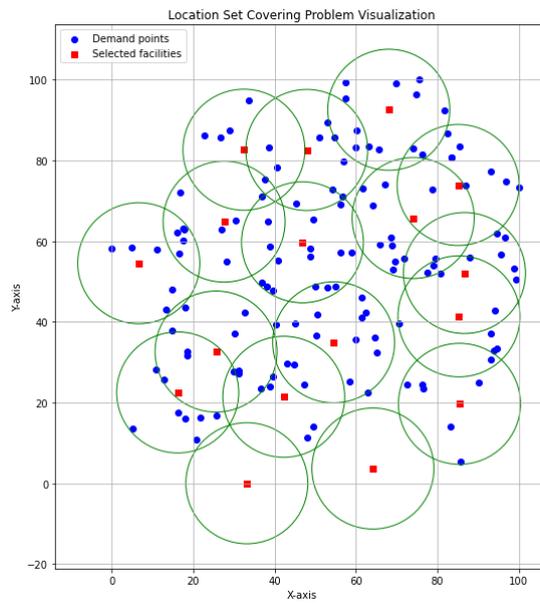


図 16. 30年後の予測 LSCP

6. 結論

本研究では、小金井市の2020年からの30年間にわたる人口予測を行った。結果によって2030年時点で人口数がピークに達し、2020年から生産年齢層が高齢者層の予備軍となり、今後30年間で高齢者層の人口が増加することが予想される。次に、増加する人口を需要点として、高齢者施設の配置分析を行った。実験結果によると、現時点での最小施設数は15であり、5年後も施設数は15で変わらないが、これは状況が変わらないことを意味するわけではない。人口の変動により、5年後には5つの施設の位置が変更されることが確認された。さらに、30年後には8つの施設の位置が変更となり、施設数の増加だけでなく、既存の施設の廃止と新たな施設の設立も必要とされる。本実験は小金井市を対象として行われて、施設の配置変化は特に市の中央部へ移動する傾向が見られた。これは中央線の影響と考えられ、人口、すなわち需要点は交通の便が良い地域へ増加する傾向にある。したがって、施設点も中央地区に集中して配置されるべきであるとの結論に至った。

参考文献

- [1] C. Toregas, R. Swain, C. ReVelle, and L. Bergman : The location of emergency service facilities, *Oper. Res.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1363–1373, 1971
- [2] C. Toregas & R. Charles : "Optimal Location Under Time or Distance Constraints," 1972
- [3] R. L. Church, D. M. Stoms, and F. W. Davis : Reserve selection as a maximal covering location problem, *Biol. Conserv.*, Vol. 76, No. 2, pp. 105–112, 1996
- [4] Aggregation effects in maximum covering models. *Annals of Operations Research*. Vol. 18, No.1, pp. 113-139, 1989
- [5] Murray, A. T., & Wei, R. : A computational approach for eliminating error in the solution of the location set covering problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 224, No. 1, pp.52-64, 2013
- [6] 岸本達也：日本建築学会大会学術講演梗概集 小地域将来人口推計による地域施設の需給不均衡に関する研究 幼稚園・保育所・小学校についてのケーススタディ F-1 分冊 105-106, 2008
- [7] 古藤浩：人口予測における誤差から考察する予測方法・地域の影響，東北芸術工科大学紀要, Vol. 28, 2021