

2023 年度 卒業研究論文

高い被覆率が求められる施設の最適配置

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

20X4017 大木美典

20X4021 紙谷優花

学科名	経営システム工学科	学籍番号	20X4017 20X4021
申請者氏名		大木 美典 紙谷 優花	
指導教員氏名		五島 洋行	

目次

1. 序論
 - 1.1 背景と目的
 - 1.2 論文構成
 2. 関連知識
 - 2.1 数理最適化問題
 - 2.1.1 線形計画問題
 - 2.1.2 非線形計画問題
 - 2.2 施設配置問題
 - 2.2.1 p -メディアン問題
 - 2.2.2 p -センター問題
 - 2.2.3 集合被覆問題
 - 2.3 Location Set Covering Problem
 - 2.4 Maximal Covering Location Problem
 - 2.5 GIS
 3. 先行研究
 4. 提案手法
 - 4.1 LSCP の課題と, 本研究の方向性
 - 4.2 定数,変数の定義
 - 4.3 定式化
 5. 実験概要
 - 5.1 使用データ
 - 5.2 実験環境
 - 5.3 評価基準の式
 6. 実験結果
 - 6.1 LSCP の実験結果
 - 6.2 複合型 LSCP の実験結果
 - 6.3 考察
 7. 結論
- 参考文献

1. 序論

1.1 背景と目的

本論文では Location Set Covering Problem(以下, LSCP)の中でも, より高い被覆率を達成できるモデルの提案をする.

総務省によると, 2019 年における世帯の情報通信機器の保有状況[1]は, スマートフォン, パソコン, 固定電話などを含めたモバイル端末全体で 96.1%を占め, 図 1 を見ても分かるようには年々増加の傾向にある. これに伴って携帯電話基地局の必要性が高まった. 携帯電話基地局はモバイル端末と電話網の間の通信を中継する役割を持っている. つまりモバイル端末で通話ができるということは, 端末と携帯電話基地局が交信できる範囲にいるということである.

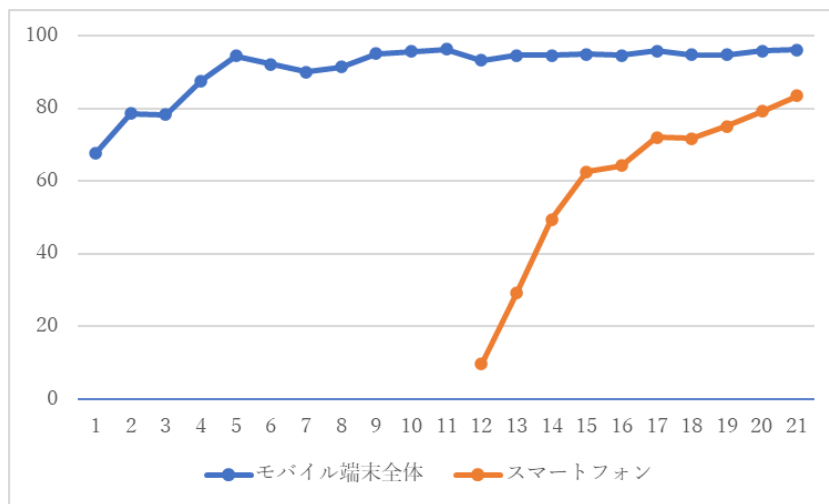


図 1: 通信機器の世帯保有率の推移

上記の通信機器の保有率の上昇に伴い, 第 5 世代移動通信システム(以下「5G」)の必要性が高まっている. 5G とは AI, IoT 時代の ICT 基盤で, 高速・大容量の通信を実現するものである. 5G が 4G までと大きく異なるのは, 主に人がスマートフォン等の端末を用いてストレスフリーな通信やよりリッチなコンテンツを楽しめるよう, 高速・大容量化を遂げてきたのに対し, 5G は超高速・大容量に加えて, 超低遅延及び多数同時接続といった要件を備えることにより, IoT の基盤としての活用, つまり, 機械や車両等への搭載により産業や社会の効率化や利便性の向上, 新たな付加価値を創出するための基盤として活用が見込まれる点である. 総務省の令和 2 年情報通信白書[1]によると, 利用シナリオとしてはモバイルブロードバンドの高度化, 超高信頼・低遅延通信, 大容量マシーンタイプ通信の 3 つが大きく上げられている. 特に 3 つ目の大容量マシーンタイプ通信では, 多数同時接続を可能にしている. 4G においては, 1km^2 あたり 10 万台程度の端末が同時に接続できるとされていたのに対し, 5G では 1km^2 あたり 100 万台程度の端末が同時に接続できるよ

うになることが見込まれている。膨大な数のセンサーや端末が存在する IoT 時代において、通信に支障が生じないことが期待される。5G は 4G までには無かった新たな機能を持つ次世代の移動通信システムであり、これまでの人と人がコミュニケーションを行うことを想定したツールとしてだけでなく、身の回りのあらゆるモノがネットワークにつながる IoT 時代の ICT 基盤として期待されている。国は、このような業務の効率化や新たなサービスの創出など、従来の移動通信システム以上に大きな社会的インパクトを及ぼすものと期待されている 5G を実現普及しようとして取り組んでいる。

一方で新型コロナウイルス感染症(COVID-19)が起これ、これによる外出規制によりテレワーク実施の声が大きくなった。現在は感染者数が減少したもののテレワークを続ける企業もある。このテレワークのように ICT に依存している環境では、5G をはじめとする ICT インフラの高度化・強靱化や制度の見直しを一層進める必要がある。このような背景から、国は昨今の COVID-19 の流行拡大の危機をインフラ整備の契機として捉え、社会全体のデジタル化を進める必要があるとしている。つまり COVID-19 をきっかけとして、高度な光ネットワークに支えられた 5G を広げる必要があるということである。

これまで、国は 5G 高度特定基地局の整備を中心に取り組んできた。しかし今後は国民がこの恩恵を受けられるように、5G 高度特定基地局だけでなく 5G 基地局の整備の加速による人口カバー率の向上も必要とされている。国の計画としては 2023 年では 5G の人口カバー率が 95%のところ、2025 年には 97%、2030 年には 99%を目標に掲げている。また、5G サービス市場が今後も拡大していくことが見込まれ、東京都はデジタルの力で都民が質の高い生活を送ることのできる「スマート東京」[2]を実現し東京のプレゼンスを高めようとしている。これを達成するためには高周波数帯 5G が不可欠であり、都は世界最高水準の通信整備に向けて取り組みを加速していくと述べている。

このような 5G のエリアカバー拡大にあたり、総務省によると令和 3 年度予算案[3]における「5G・光ファイバ等の全国展開の推進」の予算は 159.5 億円としている。基地局数の設置にこのようにコストがかかることを踏まえると、少ない数で需要領域をすべて被覆することは重要な問題であるといえる。

そこで本論文では、全需要地点が時間または距離の標準値以内に配置された 1 つ以上の施設をもつような最小数の施設の位置を求める問題である、Location Set Covering Problem(以下、LSCP)[4]を用いて最適な施設配置場所について考える。この LSCP は集合被覆問題の一種であり、計算量理論的に NP 困難であるといえる。

また携帯電話基地局には何種類もあり、基地局のサイズや電波の及ぼす範囲、コストがそれぞれ異なっている。カバーエリアの半径が概ね 2~4km 程度の通常型は、整備にかかるコストが 3000~4000 万円。カバーエリアの半径が概ね 1km の簡易型は整備コストが概ね 1000~2000 万円となっている。この、カバー範囲の異なる二種類の基地局を組み合わせるモデルを提案することで、通信ネットワークのように異なるカバー範囲を持つような

問題に対応できると考える。このように伝統的手法と提案手法を比較し、より現実に即した解法を提案することを目的とする。

1.2 論文構成

本論文は全7章で構成される。

第2章では本研究で用いる関連知識について述べる。

第3章では先行研究を述べる。

第4章では新規提案手法について述べる。

第5章では本研究の実験概要を述べる。

第6章では実験結果を示す。

第7章では実験結果について考察を述べる。

2. 関連知識

本章では本研究に用いる用語や理論，関連知識について述べる。

2.1 数理最適化問題

最適化問題とは得られる最良値を求める問題のことであり，数理計画法においては，実行可能領域における目的関数の最大値あるいは最小値を求めることである。また，最適化モデルの中でも線形計画法，非線形計画法，整数計画法は，産業，政府，軍関係などで幅広く使われている。

2.1.1 線形計画問題

線形計画法は数理最適化問題の一種であり，オペレーションズリサーチや経営科学において最も広く使われている技法のひとつである。その名称は計画が一次関数のみによって記述される数理モデル(線形計画モデル)によってなされることを意味する。線形計画法の応用は多岐にわたっているが，財務計画やマーケティング分析，生産計画，輸送問題などに利用されている。本研究における重要な理論である Location Set Covering Problem はこの線形計画問題の中でも整数線形計画法の一種である。これは線形計画問題のうち，すべての変数が離散的な整数値のみをとる線形計画問題のことである。また，すべての変数が 0, 1 の 2 値をとる場合は，特殊事例として 0-1 整数計画問題と呼ぶ。

2.1.2 非線形計画問題

非線形計画法は，数理最適化問題の一種で，非線形関係が制約式や目的関数に現れるような最適化問題に関係した手法の総称である。線形計画法と異なり，非線形計画法に出てくるすべての関数は実数値である。非線形計画法の実際の応用は広範囲に広がっており，数学・物理学や自然科学・応用化学，あるいは計量経済学や工業統計の周辺分野に現れる回帰問題や曲線当てはめの分野にも利用されている。

2.2 施設配置問題

最適化問題として定式化の可能な施設配置問題は，オペレーションズリサーチの研究対象の 1 つにあげられ，その問題の多くは整数計画法を用いた研究がなされてきた。この問題に対して有名なアルゴリズムの多くは，有限個の候補地から費用最小化や利益最大化の条件を満たす最適な配置を選択するものである。この施設配置問題の中も， p -メディアン問題， p -センター問題，Location Set Covering Problem，Maximal Covering Location Problem がよく知られている。

2.2.1 p -メディアン問題

p -メディアン問題(p -Median Location Problem)とは割り当てられた施設までの移動距離と住民数の積の合計を最小化する p 個の施設の配置を求める問題である。この問題は、施設配置問題の一種で、ReVelle and Swain(1970)[5]によってはじめて厳密に解かれたものである。一般に、総移動距離の最小化を求める問題を MinSum 型の問題と呼び、 p -メディアン問題はこの一例である。目的関数を総住民数で割ると、住民数×距離の合計である目的関数を最小化することが、サービス施設まで移動する住民の兵器に同距離が最小化することがわかる。ここで、サービス施設への移動、または割り当ては、常に p 個の施設の中で住民に最も近い施設に対して行われると仮定する。この問題は部流の輸送にかかる費用の最小化や、サービスの公平性が求められる問題などを考えるときに用いられている。 p -メディアン問題の定式化を以下に示す。

Minimize

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i d_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$x_{jj} - x_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, n; \quad i \neq j, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = p, \quad (4)$$

$$x_{ij} = (0,1) \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

表 1: 定式化に必要な変数と定数の定義

a_i	需要ノード j の住民数
d_{ij}	需要ノード i の住民数

n	ノード数
-----	------

2.2.2 p -センター問題

p -センター問題(p -Center Location Problem)とは、既存施設との最大距離が最小となるように p 個の新規施設を配置することを目的とする施設配置問題の一つである。一般に、最大距離の最小化を求める問題を MinMax 型の問題と呼び、 p -センター問題はこの一例である。この問題は緊急医療施設の配置問題、緊急時における応答時間の最小化を目的としたヘリコプター配置問題、査定受信レベルの最大化を目的とした送信機の配置問題などに利用されている。 p -センター問題の定式化を以下に示す。

Minimize

$$W, \tag{6}$$

subject to

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, \tag{7}$$

$$\sum_{j \in J} X_j = P, \tag{8}$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J, \tag{9}$$

$$W \geq \sum_{j \in J} d_{ij} Y_{ij} \quad \forall i \in I, \tag{10}$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \tag{11}$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J. \tag{12}$$

表 2: 定式化に必要な変数と定数の定義

W	既存施設までの最大距離
-----	-------------

i	需要点
I	需要点集合
j	配置候補点
J	配置候補点集合
d_{ij}	需要点と配置候補点との距離

表 3: 決定変数の定義

X_j	1 候補点 $j \in J$ に施設を配置する場合 0 候補点 $j \in J$ に施設を配置しない場合
Y_{ij}	1 $i \in I$ が $j \in J$ に割り当てられる場合 0 $i \in I$ が $j \in J$ に割り当てられない場合

2.2.3 集合被覆問題

LSCP の関連知識として集合被覆問題というものがある。集合被覆問題(Set Covering Problem : SCP)は、ある集合が与えられたときに、集合のすべての要素を一定の値以内で被覆するための最小コストとそれを達成する部分集合の組み合わせを求める整数計画問題の一種である。集合被覆問題はスケジューリングや施設の配置問題、データの論理的解析など様々な応用がされている一方で、NP 困難であることが知られている。ここで、集合被覆問題は多重被覆を許容していることに注意をする。この整数計画問題を解くために3つのアプローチがあり、列挙法、緩和法と分解法、多面体的組み合わせ理論に基づいた切除平面法が知られている。集合被覆問題の定式化を以下に示す。

Minimize

$$\sum_{j \in J} cx_j, \quad (13)$$

subject to

$$\sum_{j \in S} a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I, \quad (14)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J. \quad (15)$$

表 4: 定式化に必要な変数と定数の定義

i	需要点
I	需要点集合
j	配置候補点
J	配置候補点集合
c	配置コスト

表 5: 決定変数の定義

a_{ij}	1 需要点と配置候補点間の距離がカバー半径以内の場合 0 そうでない場合
x_j	1 配置候補点 j を選択する 0 配置候補点 j を選択しない

2.3 Location Set Covering Problem

Location Set Covering Problem (以下 LSCP) とは全需要地点が時間または距離の標準値以内に配置された 1 つ以上の施設をもつような最小数の施設の位置を求める問題である。全需要点がカバーされる施設の位置を求めるという性質から公共施設を配置する問題に適用されることが多い。

LSCP とは, 入力として,

1. 需要点集合
2. 配置候補点集合

3. 各需要点を被覆する配置候補点集合

が与えられたとき、全ての需要点を被覆するような配置候補点の選択数が最小となる設備候補点の組み合わせを出力するモデルである。

本研究では、配置候補点を j と表す。 $j = 1, 2, 3, \dots, n$ として、 n は候補点の総数である。また、需要は i で表し、 $i = 1, 2, 3, \dots, m$ 、 m は需要点の総数である。この需要点は必ず候補地によって被覆されなければならないものとする。ここで被覆の定義について説明する。Toregas and ReVelle(1972)によると、候補地 i が、事前に設定された需要 j に到達するための最大距離または時間以内に存在する場合、需要 j は候補地 i によって被覆されるとしている。配置候補点 i からの距離が S 以内の需要点 j が、その配置候補点 j によって被覆されるものとする。この問題は整数計画問題として構成される。

LSCP の定式化に必要な変数と定数の定義を以下の表 6、表 7 に示す。

表 6: 定式化に必要な変数と定数の定義

i	需要点
I	需要点集合($i \in I$)
j	配置候補点
J	配置候補点集合($j \in J$)
S	配置候補点がカバーできる最大距離
N_i	需要点 i をカバーできる配置候補点の集合

表 7: 決定変数の定義

x_j	1 配置候補点 j が選択される
	0 配置候補点 j が選択されない

需要点を i とし、全需要点の集合を $I(i \in I)$ とする。同様に配置候補点を j 、全配置候補点を $J(j \in J)$ とする。ある需要点 i からある配置候補点 j までの距離を d_{ij} とする。ここで、 $d_{ij} \leq S$

をみたす j を、需要点 i を被覆することできる距離に存在する配置候補点 j の集合である N_i とする。決定変数 x_j は、配置候補点 j が選択されたとき1の値をとり、それ以外は選択されていないとして0の値をとる。また、定式化を以下に示す。

Minimize

$$Z = \sum_j x_j, \quad (16)$$

subject to

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I, \quad (17)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j \in J. \quad (18)$$

ここで目的関数(16)は、与えられた需要点をすべて被覆できる配置候補点の総数を最小化することを示している。制約条件(17)は、すべての需要点が少なくとも一つ以上の配置候補点に被覆されなければならないことを示している。また、制約条件(18)はすべての配置候補点について存在するかしないかを、 x_j が0か1のどちらかをとることで示している。

2.4 Maximal Covering Location Problem

LSCPにはすべての需要点を一定距離以内に被覆する必要があるため、必要となる施設やサービスに対して多額の費用が掛かるという問題がある。多くの研究者がこのようなLSCPの欠点を認め、施設を必ず必要とするのではなく、目標値としたサービス可能範囲の概念を利用した新しい立地モデルを作成した。これを最大被覆立地問題(maximal covering location problem : MCLP)と呼ぶ。MCLPは距離または時間の標準値以内に位置する施設を持つ需要点数を最大にするように、あらかじめ特定された候補点集合から p 個の施設の位置を決める問題である。

2.5 GIS

GIS(Geographic Information System)とは、地理空間情報活用基本法(平成19年法律第63号)第2条[6]において、「地理空間情報の地理的な把握又は分析を可能とするため、電磁的方式により記録された地理空間情報を電子計算機を使用して電子地図上で一体的に処理する情報システム」と定義されている。地理的位置を手掛かりに位置に関するデータ(空間データ)を総合的に管理・加工し、視覚的に表示することで、高度な分析や迅速な判断を

可能にする技術である。これにより、数学的なアルゴリズムや数値のみのデータではなく色彩や形状で実際の地図に表示することによって、データのみではわからない課題もよりわかりやすく導くことができる。平成7年1月の阪神・淡路大震災の反省等をきっかけに、政府において、GISに関する本格的な取組が始まった。GISによる活用事例としては、エリアマーケティングや顧客分析、防災・災害対策などに利用されている。

3. 先行研究

鵜飼考盛, 田中健一, 辻友篤, 猪口貞樹らは病院と病院から出発するドクターヘリという距離に応じてカバー範囲の異なる施設に対する最大被覆問題を解き, 適正なドクターヘリを設置する基地病院の配置について考察した. これに対し本研究では, 異なるカバー範囲の施設を考慮するという考え方をを用いて, 二種類の施設を異なる配置点に配置する.

4. 提案手法

ここでは、本研究の提案方式について述べる。

4.1 LSCP の課題と、本研究の方向性

本研究の提案手法として、2つの被覆距離の異なる基地局を組み合わせて用いることで、新しい配置問題として解くことができると考える。これは、鶴飼らの病院とドクターヘリという2種類のカバーにおいて最大被覆問題を解く研究より着想を得たものである。鶴飼らの研究では既に存在する病院という配置候補点からドクターヘリの配置点を決定するものであった。我々は規則的に点群した配置候補点に対して、新たに2種類の施設を配置する方法を提案する。被覆距離の異なるものを組み合わせることで、コストとカバーの完全性の面により良いモデルを考案する。以降このモデルを複合型 LSCP と呼ぶ。

複合型 LSCP は LSCP に対して、カバー範囲とコストの異なる施設の最適な配置を行う。この複合型 LSCP ではカバー同士の重なりをできるだけなくすことや、対象領域外をカバーしてしまっている面積を減らすことができると考える。これにより、最適施設数の最小化を目指し、この考え方は施設配置において需要の被覆とコストの最小化の二つを求めるものである。カバー範囲とコストの異なる施設の配置は携帯電話基地局だけでなく、スーパーマーケットとコンビニエンスストアのように商圈の異なった店舗の運用、設置に利用できると考える。

複合型 LSCP では以下を入力とする。

1. 需要点集合
2. 被覆距離が 1 km の施設の配置候補点の集合
3. 被覆距離が 2 km の施設の配置候補点の集合
4. 各需要点を被覆する被覆距離が 1 km の施設の配置候補点の集合
5. 各需要点を被覆する被覆距離が 2 km の施設の配置候補点の集合

4.2 定数,変数の定義

複合型 LSCP の定式化に必要な変数と決定変数を以下の表 8, 表 9 に示す。需要点は従来の LSCP 同様 i とし、全需要点の集合を $I(i \in I)$ とする。配置候補点は被覆距離によって異なるものとし、被覆距離が 1 km のものが j_1 、その集合が $J_1(j_1 \in J_1)$ とする。同様に被覆距離が 2 km の配置候補点が j_2 、配置候補点集合が $J_2 \in J_2$ とする。ここで、 $S_{ij_1} \leq S_{j_1}$ をみたく j_1 を、需要点 i を被覆することできる距離に存在する配置候補点 j の集合である $N_{j_1 i}$ とする。同様に、 $S_{ij_2} \leq S_{j_2}$ をみたく j_2 を、需要点 i を被覆することできる距離に存在する配置候補点 j の集合である $N_{j_2 i}$ とする。決定変数 $x_{j_1 i}$ は、配置候補点 j_1 が選択されたとき 1 の値をと

り、それ以外は選択されていないとして 0 の値をとる。決定変数 x_{j_2} は x_{j_1} と同様な値をとるものとする。

表 8: 定式化に必要な変数と定数の定義

i	需要点
I	需要点集合($i \in I$)
j_1	被覆距離が 1km の施設の配置候補点
J_1	被覆距離が 1km の施設の配置候補点集合($j_1 \in J_1$)
j_2	被覆距離が 2km の施設の配置候補点
J_2	被覆距離が 2km の施設の配置候補点集合($j_2 \in J_2$)
S_{ij_1}	需要点 i と配置候補点 j_1 の距離
S_{ij_2}	需要点 i と配置候補点 j_2 の距離
S_{j_1}	被覆距離が 1km の施設がカバーできる最大距離
S_{j_2}	被覆距離が 2km の施設がカバーできる最大距離
$N_{j_1_i}$	需要点 i をカバーできる配置候補点 j_1 の集合($i S_{ij_1} \leq S_{j_1}$)
$N_{j_2_i}$	需要点 i をカバーできる配置候補点 j_2 の集合($i S_{ij_2} \leq S_{j_2}$)
c_1	被覆距離が 1km の施設の設置コスト
c_2	被覆距離が 2km の施設の設置コスト

表 9: 決定変数の定義

x_{j1}	1	配置候補点 $j1$ が選択される
	0	配置候補点 $j1$ が選択されない
x_{j2}	1	配置候補点 $j2$ が選択される
	0	配置候補点 $j2$ が選択されない

4.3 定式化

複合型 LSCP における定式化を行う。配置候補点 A の設置コストを c_1 、配置候補点 B の設置コストを c_2 とする。

Minimize

$$\sum_{j1} c_1 x_{j1} + \sum_{j2} c_2 x_{j2}, \quad (19)$$

subject to

$$\sum_{j1 \in N_{j1_i}} x_{j1} + \sum_{j2 \in N_{j2_i}} y_{j2} \geq 1 \quad \forall i \in I, \quad (20)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j1 \in J1, \quad (21)$$

$$y_j = \{0,1\} \quad \forall j2 \in J2. \quad (22)$$

ここで評価関数(19)は設置コストの最小化を示している。異なるコストである施設 $j1$, $j2$ に対して選択された施設数 x_{j1} , x_{j2} にコスト c_1 , c_2 をかけることで全体のコストを表している。制約条件(20)はすべての需要点 i に対し、配置候補点 $j1$ または施設候補点 $j2$ が必ず被覆することを表す。また、制約条件(21)は x_j が0か1の変数であることを表している。同様に、制約条件(22)は y_j が0か1の変数であることを表している。これらの決定変数は設備が選択されるかどうかを表す。選択されたとき1、選択されるとき0としている。

5. 実験概要

5.1 使用データ

図 2 は需要点を 10000, 配置候補点を 32 か所とする. ここで, 配置候補点是对称範囲に 1 kmごとに規則的な格子状の点を生成した.

図 3 は需要点を 10000, 配置候補点を 134 か所とする. ここで, 配置候補点是对称範囲に 2 kmごとに規則的な格子状の点を生成した.



図 2: 候補点を 32 か所

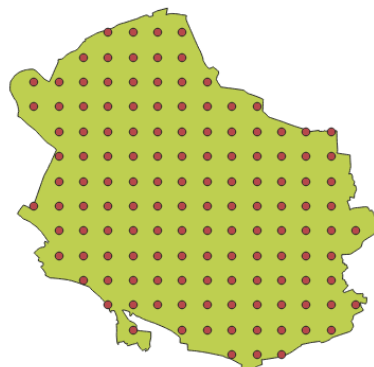


図 3: 候補点を 134 か所

ここで被覆距離に関して, 携帯電話基地局にはカバー範囲の異なるタイプがあり(図 4), 今回は通常型は 2km, 簡易型が 1km として実験を行う. また, 設置コストに関しては通常型が 3000 万円, 簡易型が 1000 万円とする[8].

	通常型	簡易型
高さ	概ね40~50m	概ね15m
カバーエリア	概ね半径2~4km程度	概ね半径1km程度
敷地面積	概ね270~300㎡	概ね9~10㎡
摘要	開けたエリアで広域的に整備する場合や携帯電話事業者複数社相乗り案件などに活用	単独の携帯電話事業者がスポット的に整備する場合などに活用
整備に係るコスト	概ね3000万円~4000万円	概ね1000万円~2000万円

図 4: 携帯電話基地局のタイプ比較

5.2 実験環境

本研究における実験環境を表 10, 表 11 に示す. LSCP, 複合型 LSCP を Python で実装する.

表 10: 実験環境 1

OS	Windows 10
CPU	Intel(R) Core(TM) i3-8145U
言語	Python
QGIS	QGIS 3.26.3

表 11: 実験環境 2

OS	Windows 10
CPU	Intel(R) Core(TM) i3-8145U
言語	Python
QGIS	QGIS 3.26.3

5.3 評価基準の式

本研究では需要の最大化とコストの最小化の二つを求める手法を提案する。そのため、実験結果の考察のために、3つの評価基準を用いる。以下に3つの評価基準を示す。

一つ目の評価基準は面積カバー率である。これは需要面の中で最適な施設が被覆できる領域が占める割合を求めるものである。これは設備によって被覆されている領域を全体領域で除することで求めることができる。この指標から需要領域に対する被覆率を評価するものとする。一方で、人口カバー率というものも存在する。これはサービス領域内の人口を全人口で割ることで求めることができる。本研究においては、設備によって被覆される人口の割合を重視するのではなく、あくまで対象とする領域全体が被覆されることを目的とするため、面積カバー率を評価基準として採択する。以下の式(23)によって、面積カバー率を定義する。

$$P_{Ad} = \frac{A_i}{A_{dimand}} \quad (23)$$

表 12: 定式化に必要な定数の定義

P_{Ad}	面積カバー率
A_{dimand}	需要面の面積
A_i	需要面と最適な施設点のカバー範囲が交差している領域の面積

二つ目の評価基準は最適な施設の設置コストである。はじめに LSCP で解いたときの設置コストを説明する。LSCP では施設の最小化を求めることを目的として定式化した。本来 LSCP を解くにあたってはコストについて考える必要はない。しかし、4. 提案手法で説明した新規提案手法との性能の比較で使用するためここで定義する。設置コストを考えると、LSCP で解いた最小施設数に設置コストをかけることで求めることができる。これを求める式は、設置コストを c としたときに、

$$cZ = c \sum_j x_j \quad (24)$$

で求めることができる。また設置コストについては5.1 使用データ 5.1 使用データで説明したものとし、基地局のタイプによって異なるものとする。被覆距離が2 kmの通常型が3000 万円、被覆距離が1km の簡易型が1000 万円として実験を行う。

次に複合型 LSCP で解いた際の設置コストを説明する。これは最適な施設数を求めた際に、被覆範囲と設置コストの異なる2 種類の設備を設置した際にかかるコストの合計を求めるものである。これは提案手法である複合型 LSCP における目的関数であるため、式は省略する。既存手法である LSCP と複合型 LSCP をこの指標を用いて比較することで、複合型 LSCP について評価する。

三つ目の評価基準は需要面以外を被覆する余分な面積である。これは最適な施設が被覆する領域が対象としている領域以外をカバーしている面積を求めるものである。この指標から施設の配置において領域を過剰に被覆することでおこる損失について考える。この余分な面積で施設の配置にかかるコストに対して領域内で得られる効果を評価する。この指標を求める式を(25)で定義し、これに用いる変数を表 13 にて定義する。

$$A_{over} = A_{cover} - A_{dimand} \tag{25}$$

表 13: 定式化に必要な定数の定義

A_{over}	需要面以外を満たす余分な面積
A_{cover}	最適な施設が被覆する面積
A_{dimand}	需要面の面積

6. 実験結果

6.1 LSCP の実験結果

LSCP で解いた結果を以下に示す。

(i) 配置候補点が 32 のとき

配置候補点を 1 km で規則的に配置した場合、候補点の数は 32 である。既存手法で解いた場合、被覆距離 1 km の時の配置数は 22 でコストが 22000。被覆距離が 2 km の時の配置数は 6 でコストが 18000。設備の最適な配置箇所は以下の図 5、図 6 に示す。

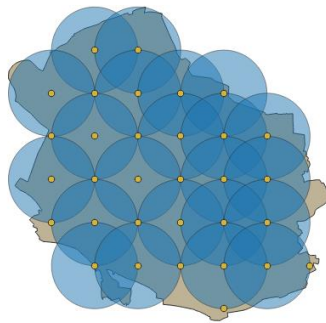


図 5: 被覆距離 1 km で解いた配置

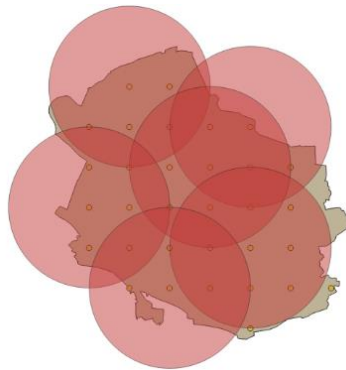


図 6: 被覆距離 2km で解いた配置

図 5 のように配置候補点を 1 km で規則的に配置した場合、対象領域の南のほうでカバーされていないエリアが存在している。これは施設候補点があるエリアに存在しないことによって起こる問題である。

一方で図 6 では同様の課題によって、東の領域にカバーされないエリアが存在している。また被覆距離が 2 km のパターンでは、被覆距離が 1 km の時と比べて対象領域外も大きくカバーされていることが認められる。

(ii) 配置候補点が 134 のとき

配置候補点を 500m で規則的に配置した場合、候補点の数は 134 である。既存手法で解いた場合、被覆距離が 1 km の時の設備の配置数は 19 でコストが 19000。被覆距離が 2 km の時の設備の配置数は 5 でコストが 15000。設備の最適な配置箇所は以下の図 7、図 8 に示す。

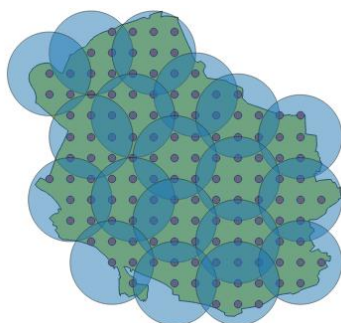


図 7: 被覆距離 1km で解いた配置

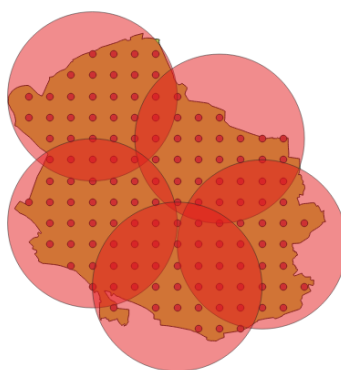


図 8: 被覆距離 2km で解いた配置

この(i),(ii)の結果から、配置候補点の数を増やすことで施設の配置数、コストのどちらも減らすことができた。被覆距離で比較すると 2 km の基地局のほうが 1 km の基地局よりもコストを抑えることができると分かった。

また配置候補点を 32 から 134 に増やすことで、図 5 被覆できなかったエリアである図 5 の南部、図 6 の東部に配置候補点を置くことができるようになった。対象領域に配置候補点を多く設置することで、配置候補点が少ないときには置くことができなかったエリアに配置候補点を増やすことができた。これにより、新たに増やした設備候補点からのカバーが生まれたことで、被覆できる領域の拡大につなげることができたと考える。

一方で配置候補点が 32 の時と比較すると、対象領域外をカバーしている面積は減少したということができる。しかし特に被覆距離が 2 km のパターンは被覆距離が 1 km の時と比べ、対象領域外をカバーしてしまっていることがわかる。

6.2 複合型 LSCP の実験結果

(i) 配置候補点が 32 のとき

複合型 LSCP で解いた結果、配置数は被覆距離が 1 km のものが 1、2 km が 5 となり、総数は 6。コストは 16000 となり、既存手法で解いたものより低くなった。この時の結果を以下の図 9 に示す。

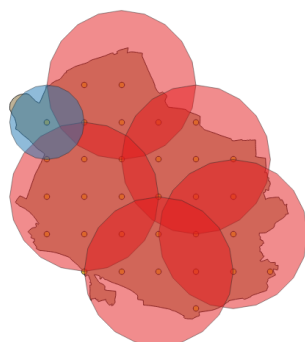


図 9: 複合型 LSCP で解いた配置

(ii) 配置候補点が 134 のとき

複合型 LSCP で解いた結果、配置数は被覆距離が 1 km のものが 3、2 km のものが 4 となり、総数は 7。コストは 15000 となり、既存手法で解いたものよりコストが低くなったといえる。この時の結果を以下の図 10 に示す。

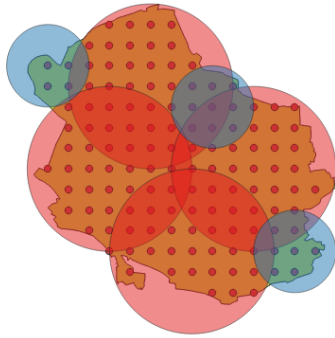


図 10: 複合型 LSCP で解いた配置

複合型 LSCP で解いた結果，第 4 章の実験同様，配置候補点を増やすことで配置数・コストともに減少することができた．また特に被覆距離が 2 km の時と比較した際に，対象領域外をカバーしてしまっている箇所が減少したことが視覚的に判断できる．これは，被覆距離が異なるものを組み合わせることで，領域の過剰被覆を回避することができたととらえることができる．

6.3 考察

配置候補点が 32 個の場合，従来の LSCP で解いた結果と複合型 LSCP で解いた結果を比較する．以下の表 14 にそれぞれの設置コストを示す．また全ての結果は小数点以下 3 桁（四捨五入）にして表記する．

表 14: 実験結果の比較 1

	従来の LSCP (被覆距離 1 km)	従来の LSCP (被覆距離 2 km)	複合型 LSCP
配置数	22	6	6
設置コスト	22000	18000	16000

被覆距離 1 km の従来の LSCP と複合型 LSCP では，配置数を 22 から 6 へ，コストも 22000 から 16000 へと減らすことができた．

被覆距離 2 km の従来の LSCP と複合型 LSCP では，配置数は変化しなかったが，コストは 18000 から 16000 と削減することができた．

以上より設備候補点が 32 の場合では、新たに提案した複合型 LSCP で解くことによって、設置コストや配置数を減らすことができる。

配置候補点が 134 個の場合、従来の LSCP で解いた結果と複合型 LSCP で解いた結果を比較する。以下の表 15 にそれぞれの設置コストを示す。

表 15: 実験結果の比較 2

	従来の LSCP (被覆距離 1 km)	従来の LSCP (被覆距離 2 km)	複合型 LSCP
配置数	19	5	5
設置コスト	19000	15000	15000

被覆距離 1 km の従来の LSCP と複合型 LSCP では、配置数を 19 から 5 へ、コストも 19000 から 15000 へと減らすことができた。

被覆距離 2 km の従来の LSCP と複合型 LSCP では、配置数・コストともに変化はなかった。

配置候補点が 32 個の場合、従来の LSCP で解いた結果と複合型 LSCP で解いた結果を比較する。以下の表 16 にそれぞれの面積被覆率を示す。

表 16: 実験結果の比較 3

	従来の LSCP (被覆距離 1 km)	従来の LSCP (被覆距離 2 km)	複合型 LSCP
配置数	22	6	6
面積被覆率	0.965	0.960	0.998

被覆距離 1 km の従来の LSCP と複合型 LSCP では、面積被覆率を 0.965 から 0.998 に上げることができた。

被覆距離 2 km の従来の LSCP と複合型 LSCP では、面積被覆率を 0.960 から 0.998 に上げることができた。

以上の結果より配置候補点が 32 個の場合,従来の LSCP と複合型 LSCP では面積被覆率を向上させることができた.

配置候補点が 134 個の場合,従来の LSCP で解いた結果と複合型 LSCP で解いた結果を比較する. 以下の表 15 にそれぞれの面積被覆率を示す.

表 17: 実験結果の比較 4

	従来の LSCP (被覆距離 1 km)	従来の LSCP (被覆距離 2 km)	複合型 LSCP
配置数	19	5	5
面積被覆率	1	1.000	1.000

被覆距離 1km の従来の LSCP と複合型 LSCP では,面積被覆率に変化はなかった. 被覆距離 2km の従来の LSCP と複合型 LSCP では,面積被覆率に変化はなかった.

以上の結果より配置候補点が 134 個の場合,従来の LSCP と複合型 LSCP では同様に面積被覆率を 1 に保つことができた.

以下の表 27 に配置候補点が 32 個の場合のそれぞれの余分な面積(需要面以外を被覆した面積)を示す. また本稿に示す余分な面積は設置コストに対して得られる効果を向上できているかを評価するものである.

表 16: 実験結果の比較 5

	従来の LSCP (被覆距離 1 km)	従来の LSCP (被覆距離 2 km)	複合型 LSCP
配置数	22	6	6
余分な面積(km ²)	6.320	19.883	14.540

(四捨五入して小数点以下 3 桁で表示)

被覆距離 1km の従来の LSCP と複合型 LSCP では,余分な面積が 6.320 km²から 14.540 km²へ増加した.

被覆距離 2km の従来の LSCP と複合型 LSCP では,余分な面積が 19.883 km²から 14.540 km²へと減少した.

以上より配置候補点が 32 個の場合,従来の LSCP と複合型 LSCP では需要面以外を被覆する範囲を減少させたとはいえない. このことから設置コストに対しての領域内での効果を向上させることができなかった. よって複合型 LSCP が有用であるとはいえない.

以下の表 28 に配置候補点が 134 個の場合のそれぞれの余分な面積 (需要面以外を被覆した面積) を示す.

表 17: 実験結果の比較 6

	従来の LSCP (被覆距離 1 km)	従来の LSCP (被覆距離 2 km)	複合型 LSCP
配置数	19	5	5
余分な面積(km ²)	10.091	15.154	9.955

表 19 より,被覆距離 1 km の従来の LSCP と複合型 LSCP では,余分な面積が 10.091 km²から 9.955 km²へと減少した.

被覆距離 2km の従来の LSCP と複合型 LSCP では,余分な面積が 15.154 km²から 9.955 km²へと減少した.

以上より配置候補点が 134 個の場合,従来の LSCP と複合型 LSCP では,需要面以外を被覆する範囲を減少させることができた. このことから設備コストに対しての領域内での効果を向上させることができたといえる. よって複合型 LSCP は有用であるといえる.

上記の配置候補点が 32 個の場合と 134 個の場合で従来の LSCP と複合型 LSCP で余分な面積の値の変化を比べた. 需要面以外の被覆範囲の減少, 言い換えればより費用に対して効効果を向上させることができるかどうかは実験結果より判断できない. 費用対効果を調べるためには細かく配置候補点の数を変化させて, 実験を行う必要がある.

7. 結論

本稿では LSCP に対してコストの異なる複数の施設の配置を行う複合型 LSCP の定式化を示した。複合型 LSCP で解くことによって、面積被覆率を向上させることができた。また、コストに着目するとコストの削減を行うことができ、余分な面積に着目することによって費用対効果を高めることができた。

本研究では 2 種類の施設の配置として実験を行ったが、3 種類以上の施設の配置問題でも同様に被覆率を高めることができるか実験したい。

実験結果より施設候補点の数によって提案手法の有用性が異なったため、今後施設候補点の数を細かく変化させ実験し、検証することが求められる。

コンビニやデパート等の設置においても本研究の提案手法を適用できると考える。電波塔と同様に同じような目的に使用でき、カバー範囲と設置コストの異なる施設の配置に適用してみたい。

参考文献

- [1] 令和2年度版情報通信白書
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nb000000.html>
- [2] 「つながる東京」3か年のアクションプラン
<https://www.digitalservice.metro.tokyo.lg.jp/tokyodatahighway/deploymentpolicy.html>
- [3] 令和3年度 総務省所管予算(案)の概要
https://www.soumu.go.jp/main_content/000724581.pdf
- [4] C.Toregas, R.Swain: "The Location of Emergency Service Facilities" Operations Research, vol. 19, no. 6, pp.1363-1373, 1971.
- [5] ReVeile, C.S. and Swain, R.W.: "Central Facilities Location," Geographical Analysis, 2, 30-42, 1970.
- [6] 地理空間情報活用推進基本法（平成十九年法律第六十三号）
- [7] 鶴飼孝盛, 田中健一, 辻 友篤, 猪口貞樹: ドクターヘリの基地病院配置と運用方式の違いが需要カバーとそのレベルに与える影響の数理的分析, 都市計画論文集, Vol. 54, No. 2, 2019, pp. 124-135.
- [8] 携帯電話等エリア整備事業
https://www.soumu.go.jp/main_content/000161793.pdf