2024 年度 卒業研究論文

避難経路の混雑度を考慮した避難所の最適配置

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

21X4025 齋藤圭汰

21X4040 土本健登

<table>
<tr><td>学科名</td><td>経営システム工学科</td><td>学籍番号</td><td>21X4025
21X4040</td></tr>
<tr><td colspan="2">申請者名</td><td colspan="2">齋藤圭汰
土本健登</td></tr>
<tr><td colspan="2">指導教員</td><td colspan="2">五島洋行</td></tr>
</table>

目次

1. 背景

1.1 研究意義

本研究では，Location Set Covering Problem(以下，LSCP)を改良し，避難経路の混雑度を考慮した施設配置問題に取り組む.

日本は，地形や国の位置などの条件から台風，地震，津波などの災害が多く発生する．特に，海洋プレートと大陸プレートの境界に位置しているため地震とそれに伴う津波の被害が多く発生している．日本の国土面積は全世界の 1%に満たないが，全世界で発生したマグニチュード 6 以上の地震の 18.5%が発生しており，災害額も全世界の災害時被害額の 17.5%を占めている．さらに，近年では建造物の高層化，大規模化と低地等での居住が進んでおり被害の拡大と二次災害の発生が懸念されている．そのため，国民一人一人が災害被害を最小限にするために前もって対策することの重要性が高まっている.

地震が頻繁に発生する我が国の中でも，1974 年 1 月から 2024 年 10 月まで過去 50 年間の地震発生数と震度 5 以上の地震件数は共に他の都道府県と比較しても東京都が圧倒的である．1900 年以降日本で最も大規模な地震である「東北地方太平洋沖地震」では，規模 M9 クラスで死者 19,747 人，住宅被害も 1,154,893 棟と類の無いほど大きな被害をもたらした．多くの鉄道運行の停止や道路での大規模渋滞により，多くの公共交通機関の運行に支障が生じた．そのため，自宅が遠い距離にある等の理由により帰宅できない帰宅困難者が首都圏で約 515 万人発生する結果となった．大地震後は，人命救助が最優先であるため救命・救助活動や消火活動が行われる．しかし，帰宅困難者の滞留はこれらの活動を妨げ，二次災害の発生にも関わっている[1].

内閣府は，今後 30 年の間に首都直下地震が発生する可能性を示唆している．規模は M7 クラスという関東地震と同等の規模であることや巨大過密都市であるため大量の被災者の発生，深刻な交通の麻痺，SNS など多くのメディアによる情報の混乱などから帰宅困難者は東日本大震災を上回る約 650 万人と想定される．また，新宿駅周辺にて帰宅困難者が 3.7 万人と大量に発生すると予見されており，その帰宅困難者が区外もしくは避難所に避難する時の避難経路が混雑し，避難時間が想定以上に長時間化もしくは事故が発生することが想像される[2]．そのため，自宅や勤務地の付近にある複数の避難場所や避難経路を確認し，より危険度の少ない経路を選定することは有意義であると考える.

本研究では，新宿区において首都直下地震が起きた時に対応可能な避難所配置を LSCP として考えることで求め，さらに避難者が避難所までの最短経路を通過したときの道の利用回数を求める．また，LSCP を容量制約や目的関数に対し重みづけをするなど改良を行い，混雑度緩和による二次災害の事故や避難時間の超過を防ぐ現実に即した施設配置モデルを提案することを目的とする.

1.2 論文構成

本論文は全 6 章で構成されている．

第 2 章では，関連知識について述べる．

第 3 章では，先行研究について述べる．

第 4 章では，使用データと前提条件について述べる．

第 5 章では，現存する施設で 3 つのモデルで実験を行い考察する．

第 6 章では，混雑度をもとにモデル評価を行う．

第 7 章では，得られた結果から結論を述べる．

2. 関連知識

以下は，研究に用いる理論や用語について述べている．

2.1 数理計画法

数理計画法とは，現実の問題を基にした数理モデルに対して最適解を得る手法の総称である．代表的な手法は，線形計画法，動的計画法や凸計画法などがある．適応範囲は，ガス製造，石油精製のような産業の方面での生産計画や構造物の最適設計など広い範囲で活用されている．

2.1.1 線形計画問題

線形計画問題とは，生産計画問題やダイエット問題が代表例として知られている数理最適化問題の一形態である．この数理モデルは，目的関数と制約条件の式を全て1次関数で表現しており，目的関数を最大化または最小化する最適化問題である．応用範囲は，オペレーションズリサーチや輸送問題，交通量最適化や農業のリソース配分など線形性により数理モデル化と解決が容易である点から幅広い分野において利用されている．この問題の解法は，シンプレックス法，内点法など適応分野や計算効率を考慮し使い分けられている．本研究で中心的な理論である Location Set Covering Problem は，線形計画問題の一つで中でも変数が整数値を取る整数線形計画問題に分類される．

2.1.2 非線形計画問題

非線形計画問題とは，イールドカーブ推定問題やタービンを活用した発電計画問題で知られる数理最適化問題の一形態である．この問題は，制約式や目的関数に線形性がなく実数値で表現される．応用範囲は，マーケティングの価格最適化，通信ネットワークの最適設計や環境科学における生態系モデリングなど複雑な問題を表現し実社会の多くの分野で活用されている．この問題は複雑性から汎用的な解法は存在せず，特定のものに対しニュートンラプソン法やラグランジュの未定乗数法などが提案されている．

2.2 施設配置問題

施設配置問題とは，配置可能な施設の集合と与えられた条件を加味して最適な施設の配置場所を得る数理モデルである．代表的な問題は，Location Set Covering

Problem，p-センター問題，p-メディアン問題などがある．応用範囲は，地域科学や都市工学など広い分野で研究が行われており多種多様なモデルが考案されている．

2.2.1 Location Set Covering Problem

Location Set Covering Problem（以下 LSCP）とは，需要全体をカバーできる施設配置のうち，もっとも施設配置数が少ない場合を求める集合被覆問題の一種である．予め各施設に設定する距離や時間内に需要点を被覆する必要がある問題である．

LSCP は，全需要点をカバーするという点から学校や病院などの公共施設の配置を考える際に用いられる．

施設を配置する候補地を複数カ所に設定し，候補地をiと表す．$i = 1,2,3,\cdots,n$として，nは候補点の総数である．また，施設がカバーする需要はjと表す．$j = 1,2,3\cdots,m$として，mは需要点の総数である．Toregas and ReVelle(1972)は被覆の定義について，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内に存在する場合，需要jは候補地iによって被覆されていると述べている[3]．この定義を基に LSCP の定式化とそれに用いる定数と変数の定義は行われている．本研究では需要を帰宅困難者，供給点を避難所として災害時の被害の拡大を防ぐため帰宅困難者がすべて被覆される最適配置を求めるために LSCP として考える．

2.2.2　p-センター問題

p-センター問題(p-Center Location Problem)とは，需要点から施設までの最大距離を最小化する施設を p 個配置することが目的である施設配置問題である．この問題は，最大距離を最小化するという特徴から救急車の配置や消防施設の配置など需要と施設間の距離が極端に大きな組み合わせを省く必要がある施設配置問題などに利用される．また，一般的に最大距離を最小化するような施設配置問題を MinMax 型と呼び，p-センター問題はこの代表例である．p-センター問題の定式化と用いる定数と変数の定義を以下に示す.

・定数・変数の定義

定数の定義を以下に示す.

i　：需要点

I　：需要点の集合

j　：配置候補点

J　：配置候補点集合

d_{ij}：需要iと施設配置候補点jとの間の距離

次に変数の定義を以下に示す.

w：施設までの最大距離

$$x_j = \begin{cases} 1：供給点j\textit{に施設を設置する} \\ 0：供給点\ j\textit{に施設を設置しない} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：需要点i\textit{は}供給点j\textit{に割り当てる} \\ 0：需要点i\textit{は}供給点j\textit{に割り当てられない} \end{cases}$$

・定式化

Minimize

$$w, \tag{1}$$

subject to

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

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

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

$$W \ \ge \sum_{j \in J} d_{ij} y_{ij} \ \ \forall i \in I, \tag{5}$$

$$x_j = \{0,1\} \ \forall j \in J, \tag{6}$$

$$y_j \ge 0 \quad \forall i \in I \ \ \forall j \in J\,. \tag{7}$$

本研究で用いる LSCP とは，予め供給点の数が決まっている点や目的関数が需要点と供給点との最大距離である点が異なる．本研究では，最大距離の最小化ではなく避難所数の最小化がより避難時に発生する避難時間の超過に関与していると考えて LSCP を用いている．

2.3　最短経路探索

最短経路探索とは，始点から終点への経路が複数ある内，コストの和が最小となる最小経路を探索することである．代表的な探索方法は，Bellman-Ford 法，ダイクストラ法，ワーシャルフロイド法などがある．類似問題として，巡回セールスマン問題や最長単純道問題が挙げられる．本研究では，単一始点最短経路問題を解く際に用いられるダイクストラ法を活用する．

2.3.1　ダイクストラ法

ダイクストラ法とは，特定の始点から終点を含めたすべての頂点までの最短経路を見つけるグラフ理論の最短経路アルゴリズムの一種である.このアルゴリズムは 2 つの点を繋ぐ辺が非負の重みでなければならないという特性を持つ．応用範囲は，交通や通信ネットワークの最短経路問題やナビゲーションシステムなど広く活用されている．また，始点から順に処理していない頂点を選択し隣り合う頂点への最短経路を更新することを繰り返すため，探索効率が悪く高速化が検討されている．

ダイクストラ法の手順を以下に示す.

1．初期化：始点以外の頂点に対して，始点からの距離を無限大に設定し始点自身の距離は 0 とする．

2．最小距離の選択：未処理の頂点の中から，最短距離が確定し最も距離が近い頂点を選択して移動する．

3．隣接する頂点の更新：選択した頂点に隣り合うすべての頂点に対して，最短距離の更新ができる場合更新する．

4．終了：すべての頂点が処理されるまで，処理 2，処理 3 を繰り返し行う．

本研究では災害時の帰宅困難者による混雑度の緩和を考慮する際に用いる．道路の距離を重みとし最短経路を考える．

2.3.2　ワーシャルフロイド法

ワーシャルフロイド法は，グラフ内のすべての頂点間の最短経路を求めるグラフ理論の最短経路アルゴリズムの一種である．このアルゴリズムは，動的計画法を利用し

て，負の重みを持つ辺が存在する場合にも対応することができる．重み付き隣接行列を用いて，各頂点に着目し最短距離行列を繰り返し更新するためダイクストラ法よりも試行回数が多く解を得るのに時間がかかる．応用範囲は，都市計画や配電網の設計，ゲーム AI の最適経路検索やリソースの最適化など広く活用されている．

　ワーシャルフロイド法の手順を以下に示す.

１．初期化：頂点数に対して，隣接行列を設定する．行列には各辺の重みを入れ，存在しない辺には無限大を設定する．また，自分自身への距離は 0 にする．

２．動的な更新：任意の頂点に着目し，この頂点を経由することで各頂点間の最短距離が短くなる場合，その値に更新する．距離が更新されない場合，次の頂点間の更新に移動する．

アルゴリズムが終了した時，最短距離が 0 より小さい頂点が存在する場合，グラフには負の閉路があることになる．このアルゴリズムは辺の重みが負の場合も考慮できるが，計算量の多さから今回は活用しない．

　このアルゴリズムでは，全点から全点への最短経路を計算するため点がn個の場合，全体で計算時間は$O(n^3)$時間になる．対して，ダイクストラ法は始点と終点を設定し計算を行うため，全体で計算時間は$O(n^2)$時間となる．本研究では，計算時間がより短く，需要点から供給点への最短経路を求めることが本意であるため，ワーシャルフロイド法は使用せず，ダイクストラ法を用いることとする．

3.先行研究

野津田・岸本[4]は，避難施設における最適割り当てと合計施設数と避難者の移動距離の 2 乗和を最小化する最適配置問題に取り組んでいる．避難施設の施設配置では，既存の施設位置と人口分布の違いによる避難施設の容量不足，容量過多が発生している．その問題に対し，この研究ではもっともスムーズに避難が可能になる避難施設の最適配置と圏域の最適な策定を行うための最適化モデルについて検討している．

従来の研究では，GIS を活用した避難シミュレーションによる避難予測が行うことで被害予測と問題点の把握が研究の主軸となっている．また，容量制約を加味した施設配置モデルについての研究も容量制約のない施設配置モデルと比べて非常に少ない．そのため，この研究では最適割り当てとそれを利用した容量制限のある施設配置問題に取り組んでいる．ここでは，特に最適施設配置について述べる．

目的関数の避難者の移動距離の 2 乗和の最小化については，最適割り当てを検討した際に距離の総和の最小化，距離の 2 乗和の最小化，十分に大きな数である r を用いた距離の r 乗和の最小化を比較した結果から効率性，公平性と拠点性をバランスよく向上することができるという点から採用されている．施設の合計数の最小化については，現実的な問題として考える際に施設の増加による予算の制約や施設整備の困難さなどから限られた施設数で効率的な避難を可能にする必要があるという点から採用されている．また，避難施設の収容数の合計が避難者の総数に達しない場合は避難不可能な被災者を許容する点，施設収容率を考慮することで施設増加に伴う運用効率の低下を防ぐことができる点からより災害時の避難情況を考慮したモデルとなっている．

このモデルにより，異なる地域人口や地域ごとの被害想定により予測される避難者人口に対して避難時の避難所選択と可能な限りの避難者を避難所に収容できる避難所の配置を求めることが可能となる．また，目的関数の重みを変化させることで施設数が異なる場合の最適配置を求めることが可能になり，各施設の重要度から限られた予算の中で施設の設置や整備を行う際の優先順位をつけることが可能となる．

ただし，先行研究のモデルでは避難経路を移動中に起こる問題については言及されていない．避難時，自宅や職場から避難所の経路を知っている状態であってもその近辺の人も同じ経路を通る可能性が高い．そのため，避難経路の混雑度を考慮することでより安全に避難が可能になり，二次被害を緩和し被災者の減少が可能であると考える．そこで本研究では，避難経路の混雑度緩和を考慮した避難施設数を最小化する施設配置モデルを提案する．

4. 使用データ・前提条件

ここでは，本研究で使用するデータと前提条件について述べる．

4.1　新宿区領域のデータ

新宿区領域のデータは，国土交通省の国土数理情報ダウンロードサイトにある新宿区の行政区域データ[5]を使用する．このデータを QGIS に読み込み表示したものを図 1 として以下に示す．本研究では，道路データを併用するため新宿区の概形のみが分かる図を使用する．

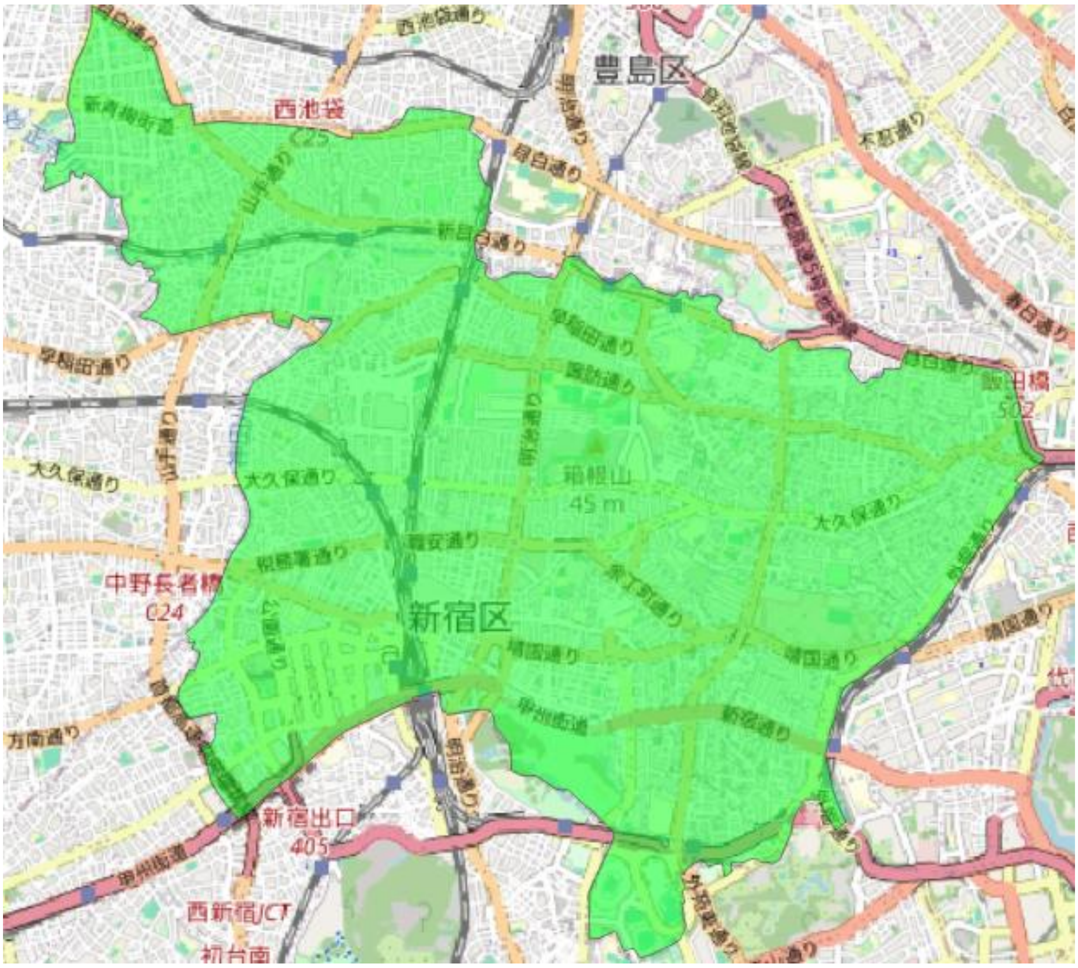

図 1：新宿区の領域データ．

4.2　道路ネットワークデータ

道路ネットワークは，コンサベーション GIS コンソーシアム事務局の「「地理院地図 Vector（仮称）提供実験」の関係データを編集・調整して作成したデータ」を使用する．新宿区領域内の道路データをこのデータから抽出して使用することとする．また，細かい道路もデータに全て含まれているため，本研究でノードとなる交差点が約

3 万個存在する．計算量を考慮して，ノード数が約 570 個になるように主要道路のみに選定する．青色の線を選定した主要道路として図 2 に示す.

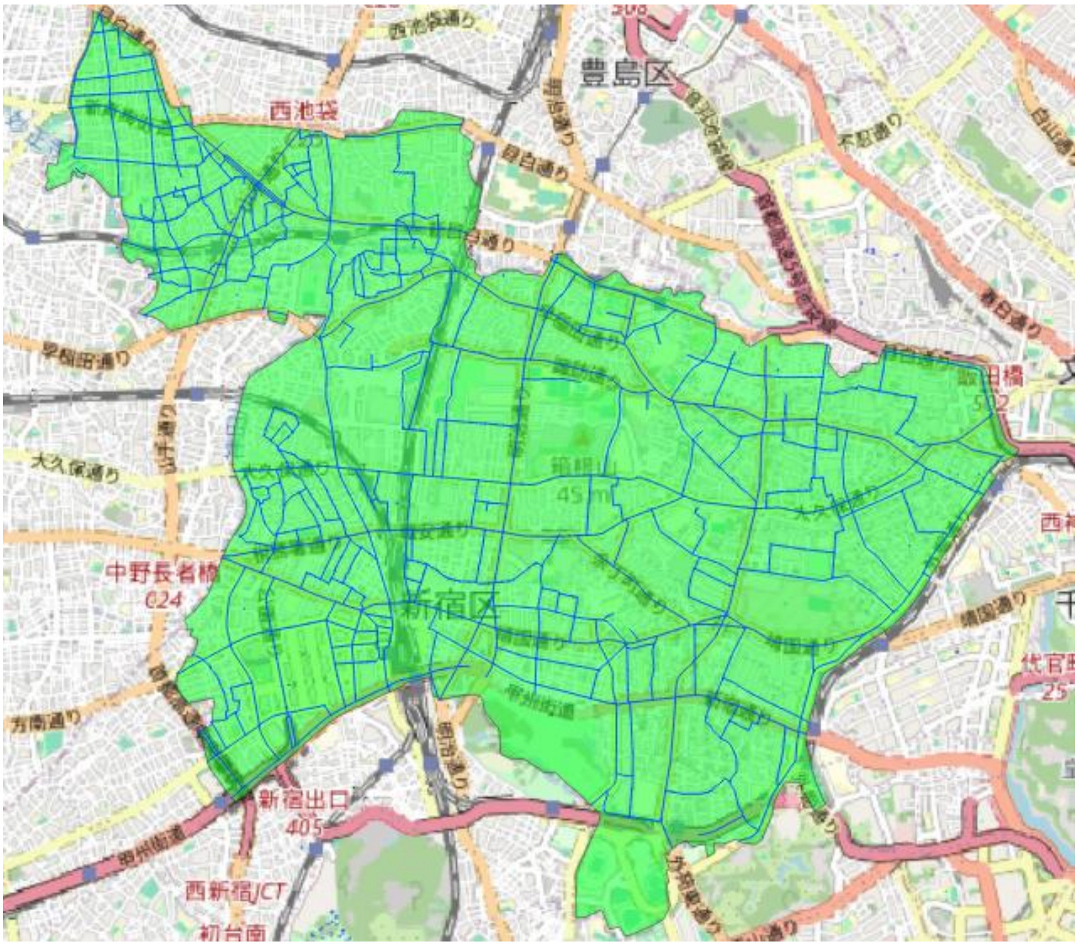

図 2：新宿区道路.

また，図 2 に対しノードを加えたものを図 3 で示す．ノードは，混雑度を計算する際のダイクストラ法で用いる．各ノード間を需要がどれほど通ったかで，混雑度を計算する．

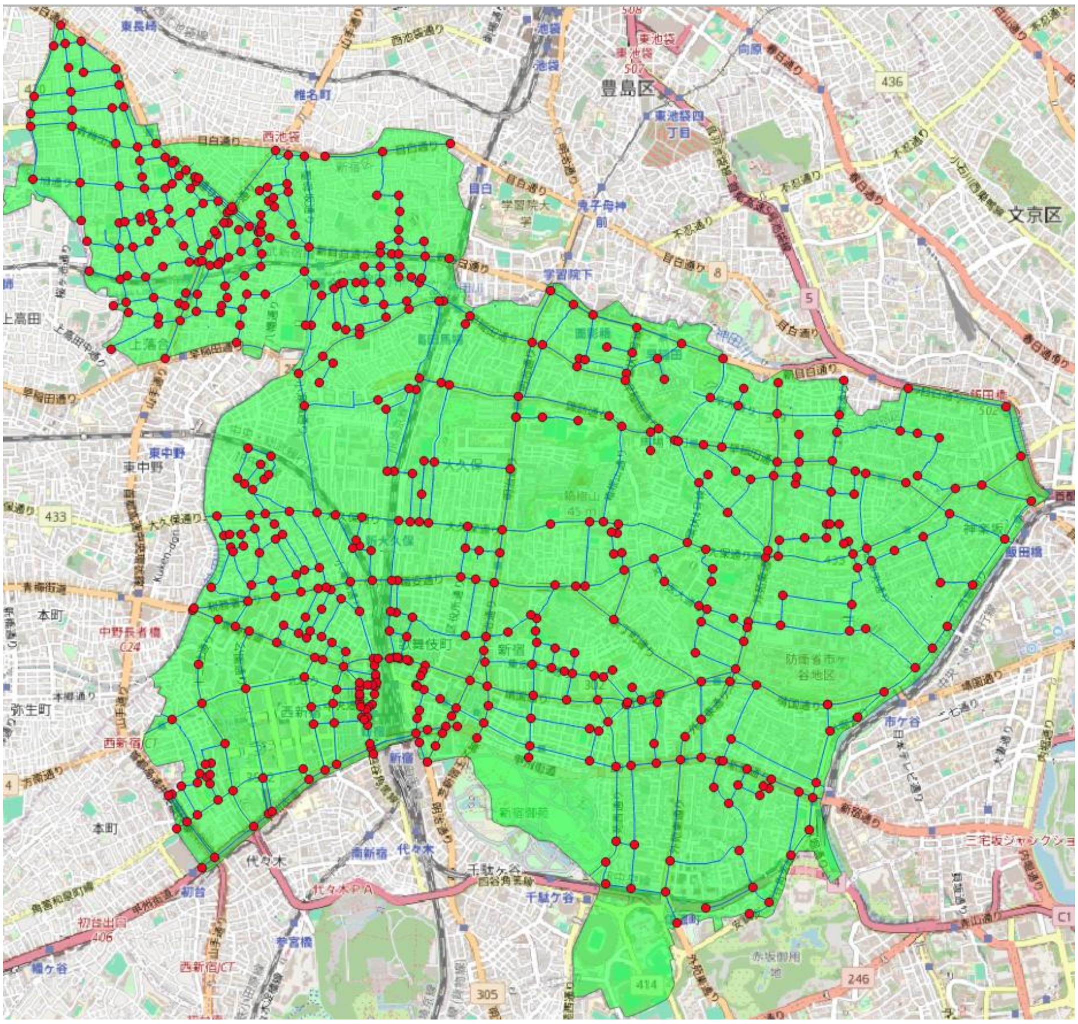

図 3：ノード追加後の領域データ．

4.3　需要点・供給点

施設配置問題においての需要点はサービスを享受する人，供給点はサービスを提供する施設である．本研究では，需要点は帰宅困難者として首都直下地震の際に混乱が想定される新宿駅付近に 50 個をランダムに生成する．供給点は避難施設として新宿区が公開している避難所，避難場所，区外に避難する場所に該当する地点の近くの道路上に 64 個を生成する．災害時に供給点である避難所が倒壊し使用できなくなることは考慮しないこととする．上記の内容でプロットした需要点と供給点をそれぞれ図 4，図 5 として示す．また，供給点が需要点を被覆可能な距離は人が歩く速度を分速 80m として，東日本大震災時では，避難開始から避難にかかる時間が 30 分であったことから 2.4km とする[6].

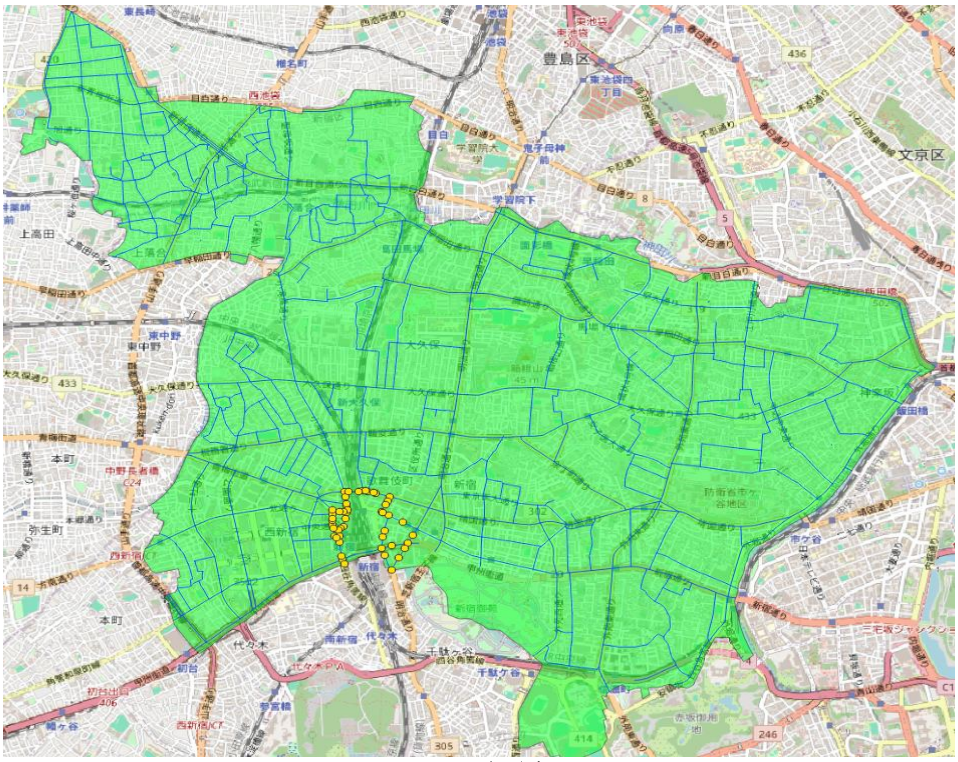
豊島区
文京区
上高田
東中野
本町
弥生町
新宿
代々木
千駄ケ谷
飯田橋
市ケ谷

図 4：需要点.

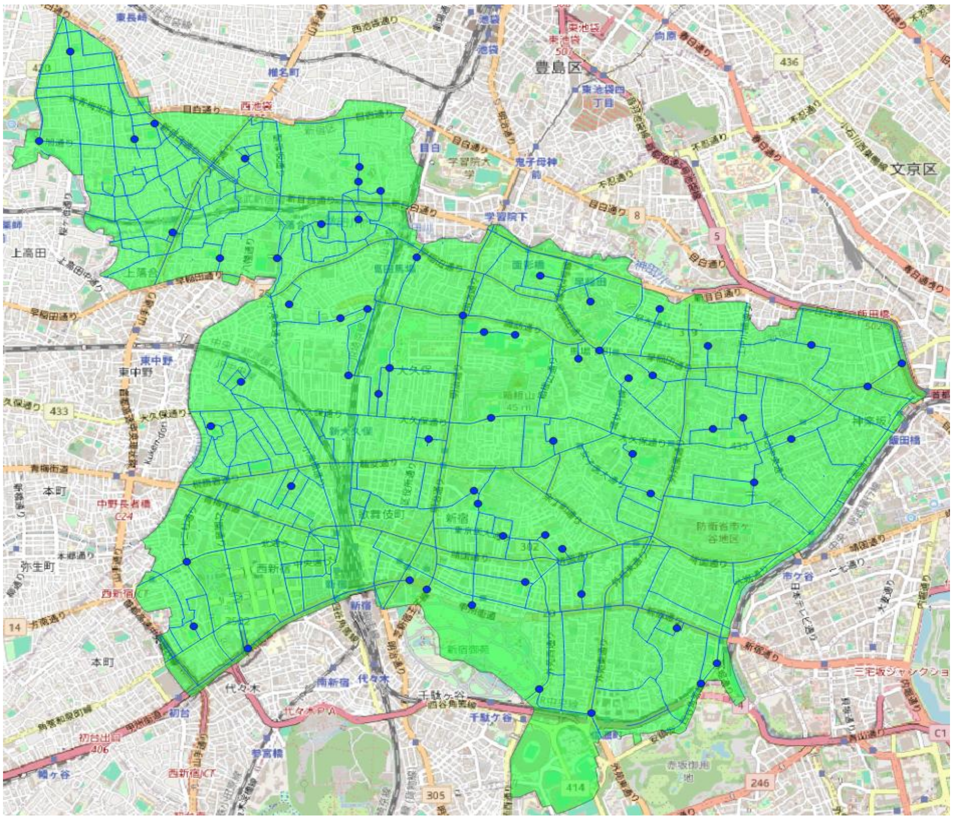
豊島区
文京区
上高田
東中野
本町
弥生町
新宿
代々木
千駄ケ谷
飯田橋
市ケ谷

図 5：供給点.

4.4　実験環境

本研究での実験環境を表 1 に示す.

表 1：実験環境.

OS	Windows 11
CPU	AMD Ryzen 5 4500 6-Core Processor
使用言語	Python
QGIS	QGIS 3.34.1

4.5　5 章の概要

5 章では，4 章のデータを活用し LSCP で実験を行う．5.1 では，基本モデルをもとに実験を行う．5.2 では，5.1 の実験結果からモデルの不足を補うモデルを提案し，実験を行う．特に容量に制限がないことが問題であると考え容量に関する制約条件を考慮する．5.3 では，需要を多く許容する可能性のある配置候補点が選択されづらくなれば，混雑度が緩和されるという仮定をする．その仮定から，目的関数を改良したモデルを提案し実験を行う.

５．実験概要

5.1　基本モデル

第 4 章で取り上げたデータと前提条件をもとに，基本となる LSCP として定式化を行い，数値計算に取り組む．本章においての基本モデルとは，施設容量に関する制約条件などの他の制約条件を入れずに，現存する避難施設のみを用いたものとする．また，本研究で扱うモデルにおいて供給点のカバー範囲は全て 2.4km とする．

以下は，LSCP の定式化とそれに用いる定数・変数の定義を示す.

・定数・変数の定義

定数の定義を以下に示す.

i：需要点

I：需要点の集合

j：配置候補点

J：配置候補点集合

S：配置候補点がカバーする最大距離

N_i: 需要点iをカバーできる配置候補点の集合

N_iは，需要点iから供給点jまでの距離をd_{ij}とした時に$d_{ij} \leq S$をみたすjを，需要点iを被覆することができる距離に存在する配置候補点jの集合である．

次に変数の定義を以下に示す.

$$x_j = \begin{cases} 1：供給点j\textit{に施設を設置する} \\ 0：供給点\,j\textit{に施設を設置しない} \end{cases}$$

・定式化

Minimize

$$z = \sum_{j} x_j, \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I, \tag{2}$$

$$x_j = \{0,1\} \ \forall j \in J\,. \tag{3}$$

目的関数(1)は，すべての需要点を被覆するための総施設数を最小化することを表している．制約条件(2)は，各需要を被覆できる施設数が 1 以上でなければならないこ

とを表している．また，制約条件(3)は施設が配置されるか否かを 0， 1 で表現することを表している．

5.1.1　実験結果

実験結果を QGIS にプロットしたものを図 6 として示す．青色の点が実験結果で得られた供給点の最適地であり，黄色の点が需要点である．結果として基本モデルでは避難所が 1 カ所で需要である帰宅避難者を被覆することができることが分かる．しかし，この条件では一つの避難所が約 3.7 万人の帰宅困難者すべてを受け入れることになってしまい，現実とはかけ離れたモデルとなっている．そのため，次の章では避難所の容量に関する制約条件を加えて実験を進めることとする．

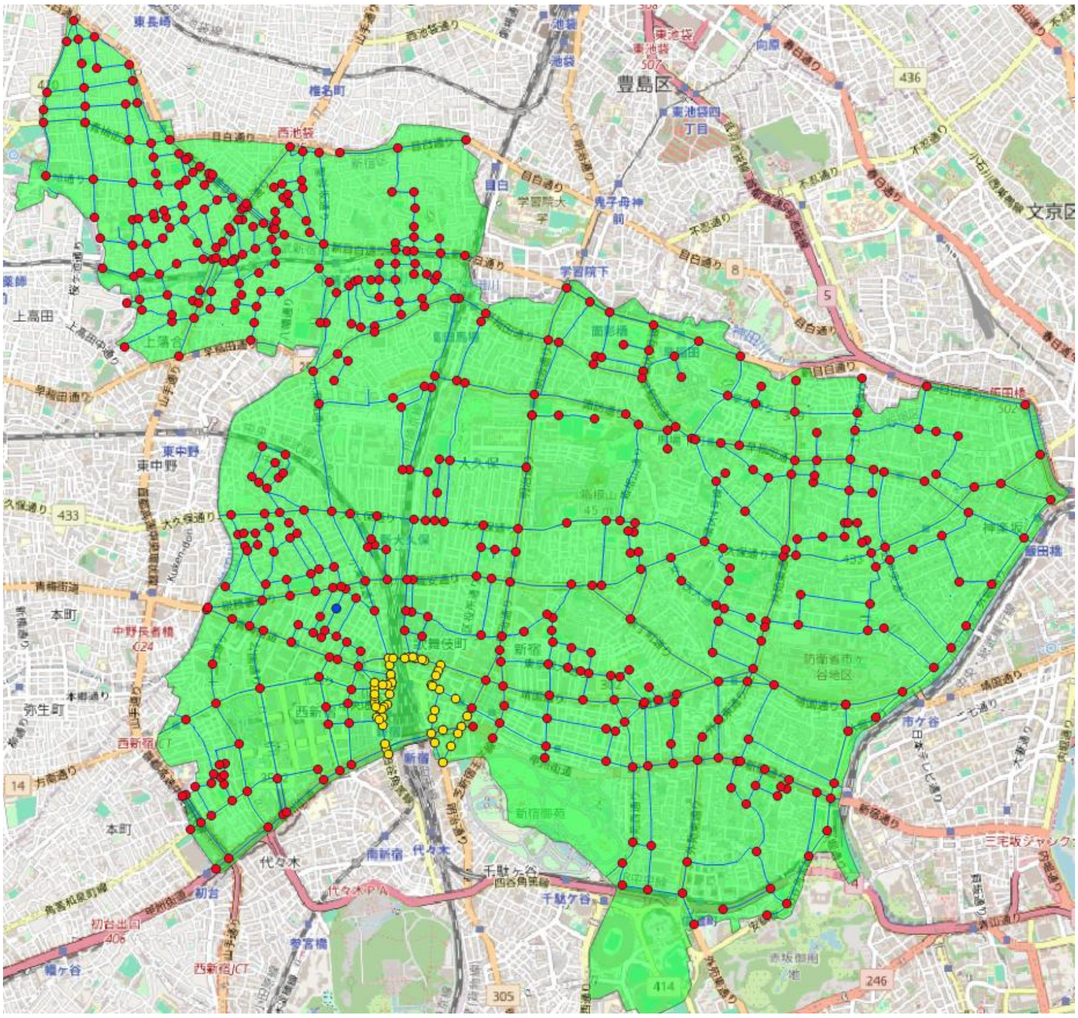

図 6：基本モデルにおいての最適配置．

5.2　容量制約を考慮した LSCP

前節で述べたように本節では，容量に関する制約条件を加えた数値実験を
行う．

5.2.1　基本モデルの不足部分について

5.1 の基本モデルでは，容量に関する制約がないために 1 つの供給点に全避難者が集まる結果となった．この結果は，現実的に考えたときにありえない状態である．また，本研究の主題である混雑度を計算する際に各需要が向かう供給点が不明のままなので混雑度の計算ができない．そのため，本節では新たな要素を取り入れることで，この不足を補うことができるモデルを提案する．

5.2.2　加えた要素の説明

まず，初めに 2 次元配列について説明する． 2 次元配列は，配列の各要素が配列となっており，その各要素の中に値が格納されているような配列のことである．

表 2： 2 次元配列の例.

	1	2	3	⋯	n
1	[　1,	0,	0,	⋯	0　]
2	[　0,	1,	0,	⋯	0　]
3	[　1,	0,	0,	⋯	0　]
⋮	[　⋮	⋮	⋮	⋯	1　]
m	[　0,	0,	0,	⋯	1　]

表 2 を用いて本研究においての 2 次元配列と値の意味について述べる．列では，各配置候補点が設置されるかを表している．行では，各需要が各供給点に対し向かうかどうかを表している．供給点として選択する場合は 1，しない場合は 0 である．例えば， m 行 n 列の値が 1 である場合，配置候補点 n が供給点として選択されていることと需要点 m にいる避難者が配置候補点 n に向かうことを示している．しかし 2 次元配列を加え，列の合計値が 0 か 1 以上で供給点が最適化されているか考える場合，モデルを線形計画で表すことができなくなる．そこで，Big-M を活用する．

本研究では，容量に関する制約条件を加えるために Big-M 法を用いることとする．Big-M 法とは，線形計画問題を解く際に用いる補助的な方法の一つである．Big-M という非常に大きい正の数を制約式や目的関数に加えることで問題を解きやすくすることが可能である．本節では，以下の Big-M の制約条件とそれに関連した制約条件を加える．y_{ij}は 2 次元配列，Bは，Big-M である．

$$x_j B \geq \sum_{i \in I} y_{ij} \quad \forall j \in J,$$

$$\sum_{i \in I} y_{ij} \geq x_j \ \forall j \in J$$

まず，１つ目の式は配置候補点jに向かう需要点がある場合，配置候補点jに供給点を配置する．Big-M を用いることで，複数の需要点が供給点jに向かうことが可能となっており，y_{ij}の合計が 0 でない限り配置候補点jは，供給点として利用される．それに２つ目の制約条件を加えることで，y_{ij}の合計が 0 になる場合はx_jも 0 にすることが可能になる．この二つの制約条件を加えることで，本モデルは線形計画から外れないようになる．ただし，Big-M の値が過剰に大きい場合は計算精度や数値の安定性に影響を与えてしまうことがあるため，注意が必要である．この実験では，Big-M の値を 10,000 と設定する．

さらに，本節から上記に加えて供給点での需要の許容量L_jを追加する．供給点は一定期間生活することを想定している避難所，危険が迫っている際に緊急に避難する避難場所と区外へ避難する場所で構成されている．そのため今回のL_jは，避難所を 1,000，区外へ避難する場所を 5,000，避難場所を 3,200 とする．

5.2.3　定式化

本章で行う実験の定式化とそれに用いる変数と定数について以下に示す.

・定数・変数の定義

定数の定義を以下に示す.

B ：非常に大きい定数

C_i：各需要点の避難者数

i ：需要点

I ：需要点の集合

j ：配置候補点

J ：配置候補点の集合

N_i： 需要点iをカバーできる配置候補点の集合

M_j : 配置候補点jの範囲内にある需要点の集合

L_j：配置候補点jの需要の許容上限

次に変数の定義について示す.

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

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：需要点 \mathrm{i} が供給点 \mathrm{j} に割り当てられる \\ 0：需要点 \mathrm{i} が供給点 \mathrm{j} に割り当てられない \end{cases}$$

・定式化

Minimize

$$\sum_{j\in J} x_j \tag{1}$$

subject to

$$x_j B \ \geq \sum_{i\in I} y_{ij} \quad \forall j \in J, \tag{2}$$

$$\sum_{i\in I} y_{ij} \ \geq x_j \ \forall j \in J, \tag{3}$$

$$\sum_{i\in M_j} y_{ij} \cdot C_i \leq L_j \quad \forall j \in J, \tag{4}$$

$$\sum_{j\in N_i} y_{ij} \geq 1 \quad \forall i \in I, \tag{5}$$

$$x_j, y_{ij} = \{0,1\} \ \forall i \in I, \forall j \in J. \tag{6}$$

目的関数(1)：総施設数の最小化
制約条件(2)：配置候補点jに需要点が 1 つでも割り当てられるなら配置する．
制約条件(3)：配置候補点jが選択される場合，それに対する割り当てy_{ij}の和は少なくとも 1 以上である．
制約条件(4)：配置候補点jに対する需要量は，その容量制限L_jを超えない．
制約条件(5)：すべての需要点は少なくとも 1 つの供給点に被覆される
制約条件(6)：決定変数の 0-1 制約

5.2.4　実験結果

実験結果を QGIS にプロットしたものを図 7 として示す．また，選択される供給点の定義，名称とその供給点に対する避難者数をまとめたものを表 3 として示す．結果は，供給点として 22 点が選択されることになる．このモデルでは，避難場所に最も多くの避難者が避難しており，区外に避難する人も約 1 万人いることがわかる．

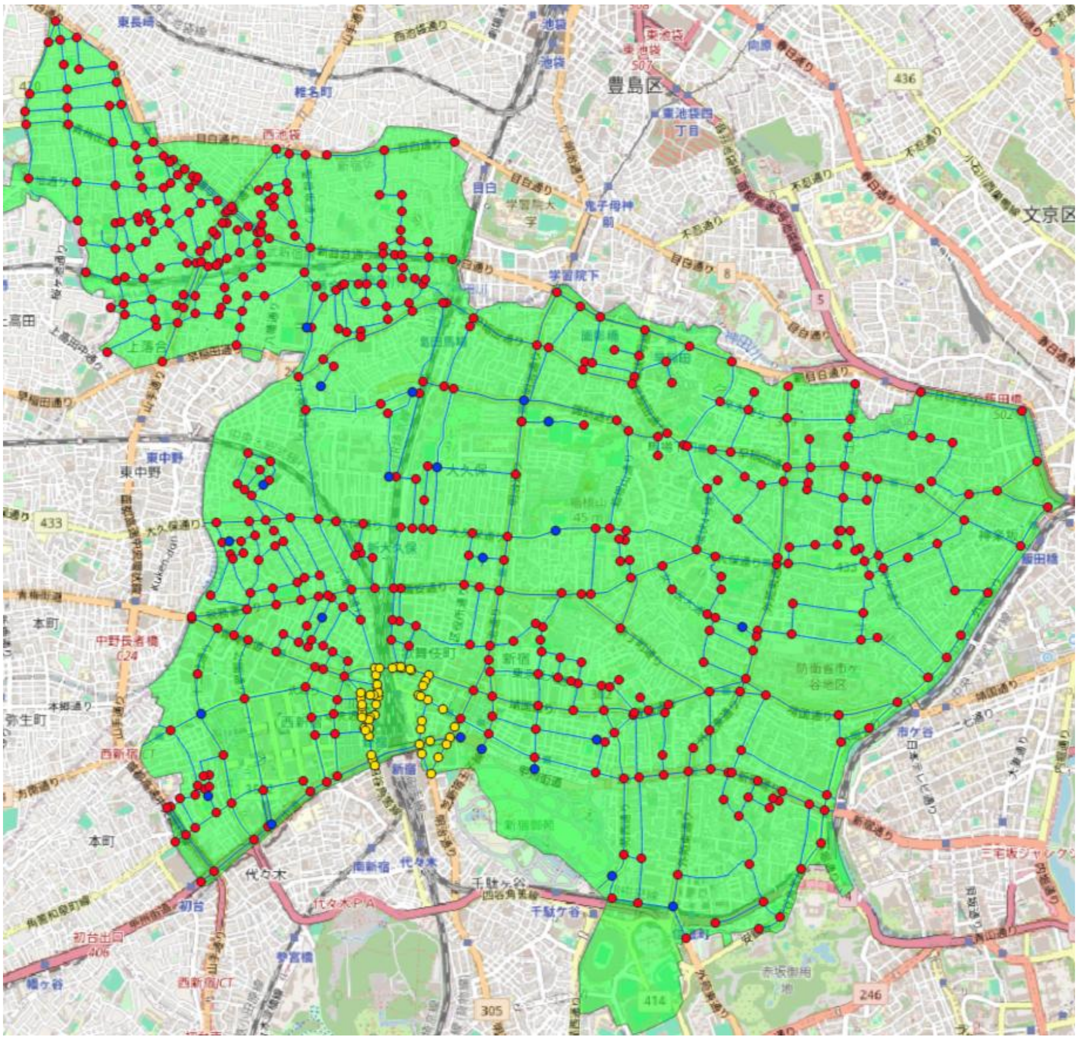

図 7：5.2 のモデルにおいての最適配置.

表 3：5.2 で選択される供給点と割り当てられる避難者数.

定義	名称	避難者数
避難所	都立新宿高等学校	800
避難所	西新宿小学校	800
避難所	西新宿中学校	800
避難所	大久保小学校	800
避難所	柏木小学校	800
避難所	淀橋第四小学校	800
避難所	新宿 NPO 協働推進センター	800
避難所	花園小学校	800
避難所	牛込仲之小学校	800

避難所	新宿西戸山中学校	800
避難所	東戸山小学校	800
避難所	西早稲田中学校	800
避難所	四谷第六小学校	800
避難所	都立戸山高等学校	800
避難場所	戸山公演	3,200
避難場所	落合中央公園一帯	3,200
避難場所	新宿御苑	3,200
避難場所	百人町三・四丁目地区	3,200
避難場所	新宿中央公園・高層ビル群一帯	3,200
避難場所	明治神宮外苑	3,200
区外避難	区外避難	4,800
区外避難	区外避難	4,800

5.3　目的関数の改良をした施設配置

本節では多くの需要を被覆する可能性のある施設を選択すると，多くの避難者がその供給点に向かい混雑度が増してしまうのではないかと仮定する．そのうえで，基本モデルの目的関数に対し各供給点が被覆することができる需要点の要素数で重み付けをする．その結果，被覆する可能性のある需要が多ければ多いほど，その供給点の優先度が下がり選ばれなくなることで混雑度を抑えることが可能であると考える．

本章では，新たにR_jという配置候補点jが被覆可能な需要点の要素数と，x_jという配置候補点に設置されるか否かを示すバイナリ変数の積を目的関数として数値実験を行う．

5.3.1　定式化

定数の定義を以下に示す.

B ：非常に大きい定数

C_i：各需要点の避難者数

i ：需要点

I ：需要点の集合

j ：配置候補点

J ：配置候補点の集合

N_i ：需要点iをカバーできる配置候補点の集合

M_j : 配置候補点jの範囲内にある需要点の集合

R_j ：配置候補点jが被覆可能な需要点の要素数

次に変数の定義について示す.

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

$$y_{ij} = \begin{cases} 1：需要点 \mathrm{i} が供給点 \mathrm{j} に割り当てられる \\ 0：需要点 \mathrm{i} が供給点 \mathrm{j} に割り当てられない \end{cases}$$

・定式化

Minimize

$$\sum_{j \in J} R_j \cdot x_j \tag{1}$$

subject to

$$x_j B \geq \sum_{i \in I} y_{ij} \quad \forall j \in J, \tag{2}$$

$$\sum_{i \in I} y_{ij} \geq x_j \ \forall j \in J, \tag{3}$$

$$\sum_{i \in M_j} y_{ij} \cdot C_i \leq L_j \quad \forall j \in J, \tag{4}$$

$$\sum_{j \in N_i} y_{ij} \geq 1 \quad \forall i \in I, \tag{5}$$

$$x_j, y_{ij} = \{0,1\} \ \forall i \in I, \forall j \in J. \tag{6}$$

目的関数(1)：$R_j \cdot x_j$の和の最小化
制約条件(2)：配置候補点jに需要点が 1 つでも割り当てられるなら配置する．
制約条件(3)：配置候補点jが選択される場合，それに対する割り当てy_{ij}の和は少なくとも 1 以上である．
制約条件(4)：配置候補点jに対する需要量は，その容量制限L_jを超えない．
制約条件(5)：すべての需要点は少なくとも 1 つの供給点に被覆される
制約条件(6)：決定変数の 0-1 制約

5.3.2　実験結果

実験結果を QGIS にプロットしたものを図 8 として示す．また，選択された供給点の定義，名称とその供給点に対する避難者数をまとめたものを表 4 として示す．結果は，供給点として 22 点が選択されることになる． 供給点の数に変化はなかったが，選択されている避難所が 6 か所変化している．図 8 から目的関数を改良した影響により，5.2 のモデルと比べて需要に近い供給点が選択されていないことがわかる．

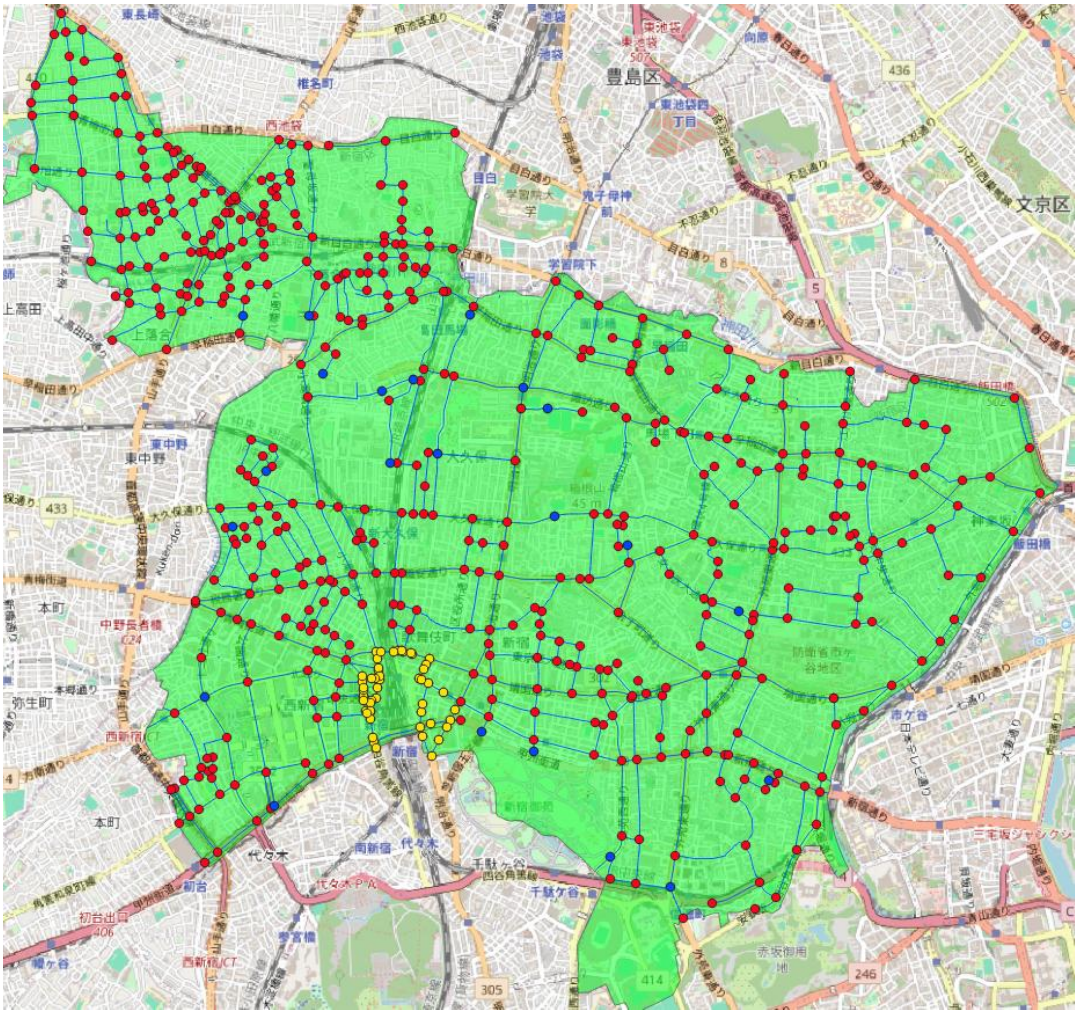

図 8：5.3 のモデルにおいての最適配置.

表 4：5.3 で選択される供給点と割り当てられる避難者数.

定義	名称	避難者数
避難所	四谷小学校	800
避難所	市谷小学校	800
避難所	余丁町小学校	800
避難所	淀橋第四小学校	800
避難所	新宿 NPO 協働推進センター	800
避難所	戸塚第二小学校	800
避難所	牛込仲之小学校	800
避難所	落合第二小学校	800
避難所	西戸山小学校	800
避難所	新宿西戸山中学校	800

避難所	東戸山小学校	800
避難所	西早稲田中学校	800
避難所	都立戸山高等学校	800
避難所	四谷第六小学校	800
避難場所	戸山公演	3,200
避難場所	落合中央公園一帯	3,200
避難場所	新宿御苑	3,200
避難場所	百人町三・四丁目地区	3,200
避難場所	新宿中央公園・高層ビル群一帯	3,200
避難場所	明治神宮外苑	3,200
区外避難	区外避難	4,800
区外避難	区外避難	4,800

６．モデル評価

本章では，5 章で行った実験をもとに混雑度という観点からモデル評価を行う．6.1 ではモデル評価の基準になる混雑度の説明と本研究における定義について述べ，6.2 ではモデル評価を行うこととする．

6.1　混雑度の説明と本研究における定義

混雑度は，車両や人が通行する道路の込み具合を数値化したものである．一般に道路の設計交通量と実際の交通量によって割り出される．しかし，本研究ではダイクストラ法を用いて各需要が避難する供給点に到着するまでの最短経路を求め，その際に需要点が通る道路から各道路の交通量を求める．道路の設計交通量は各道路を均一にするため，計算結果ででた値をそのまま混雑度と定義する．

6.2　評価

第 5 章で得た結果をもとにダイクストラ法を行い，求めた各モデルの混雑度とその最大値と使用する道路の数を表 5 として示す．

表 5：各モデルで発生した混雑度の比較

混雑度/モデル	容量を考慮したモデル	目的関数を改良したモデル
0 以上	117	129
1,000 以上	80	83
2,000 以上	72	63
3,000 以上	67	56
5,000 以上	38	32
7,000 以上	27	21
10,000 以上	11	5
混雑度の最大値	26,400	28,800

本研究のモデル評価にあたり，評価基準の候補は混雑度の最大値，混雑度 5,000 以上の道路数といくつか存在する．しかし，最大値の最小化では一部の混雑度緩和ができていても全体の混雑度緩和にはならないと考える．そのため，広範囲に対し混雑度緩和が行われているか判断する基準として，混雑度が基準値よりも大きい道路の数の少なさを評価基準とし基準値は 5,000 とする．表 5 から各モデルの 5,000 以上の混雑度になる道路数を比較すると，目的関数を改良したモデルのほうが混雑度の値が減少しており，10,000 以上では容量を考慮したモデルの半数以下になっている． このことから混雑度に関して一定以上の緩和をすることができたといえる．よって，目的関数を改良したモデルは有用であるといえる．

7．結論

本章では，本研究のまとめとそれに伴う今後の課題について述べる．

7.1　まとめ

本研究では，首都直下大震災時の新宿区を例として，LSCP の基本モデル，それをもとに容量制約を加えたモデルと目的関数を改良したモデルについて実験を行った．

基本モデルの実験結果は，避難者の約 3.7 万人が 1 つの避難施設に全員割り当てられる結果となった．これは，現実的に難しい結果でありモデルの再考が必要であるとわかった．１つの理由としては，避難施設の容量が無限であったためと考えられる．

次に，容量制約を加えたモデルで実験を行った．結果として，避難施設が 22 か所で需要を被覆できることがわかった．基本モデルと比較しても需要が新宿区全域に分散しており，現存する施設で避難者を受け入れることができる最適配置を求めることができた．

上記の容量制約を加えたモデルに対し，本研究のモデル評価基準となる混雑度の観点から，多くの需要点をカバーできる可能性のある供給点の選択される優先度を下げることで需要がより分散し混雑度を抑えることができると考えた．そこで，目的関数を各避難施設が被覆する可能性のある需要の要素数で重み付けし実験を行った．結果として，避難施設が 22 か所で被覆可能ということがわかった．施設数については，容量制約を加えたモデルと同じ結果となったが，混雑度を比較すると 10,000 人以上が使用する道路数が半数以下になっていたため，モデルの良化ができたといえる．また，この手法により各施設に対する避難者の過剰な割り当て，人数過多による現場の混乱を解消し，道中の混雑緩和による 2 次被害の防止するための基盤を提供することができると考える．

7.2　今後の課題

本研究では，LSCP に容量制約を加えたモデルに対し，仮定から目的関数を改良することでより有用な結果を得ることができた．しかし，各需要の実際の移動距離など考慮すべき点は残されていると考えられる．具体的には，各需要点の移動能力について年齢や障害を考慮することで表すこと，各道路の想定交通量を加味することなどが考えられる．また，本研究は混雑度に重きを置いて実験，評価を行った．しかし，実際の避難時ではリアルタイムで火災や倒壊などが発生し，想定以上の混雑が起こる可能性がある．そのため，避難時の行動・状況に対しより明確な制約と評価基準を組み込むことでより良い結果が得られるのではないかと考える．

参考文献

[1]災害発生時の帰宅困難者対策に関する実態調査・結果報告書
https://www.soumu.go.jp/main_content/000416893.pdf ,(参照 2024 年 11 月 9 日)

[2]首都直下地震の被害想定・対策のポイント
https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/021/571/20220525/n/002n.pdf ,(参照 2024 年 11 月 20 日)

[3]C.Toregas,R.Swain:"The Location of Emergency Service Facilities" Operations Research, vol.19,no.6,pp.1363-1373,1971

[4] 野津田宗聡，岸本達也．地域避難施設の最適割り当てと最適配置手法に関する研究,日本建築学会計画系論文集,2005, no.589,p115-122.

[5]国土数理情報ダウンロードサイト
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/ ,(参照 2024 年 9 月 10 日)

[6]東日本大震災時の津波避難行動
https://www.isad.or.jp/pdf/information_provision/information_provision/h25/higashinihon25_4-2-2c.pdf ,(参照 2024 年 9 月 14 日)