

人口密度を考慮した広域避難計画に関する研究

吉村 遼 (沼田 一道 教授, 松浦 隆文 助教)

1. はじめに

1.1. 広域避難計画

大震災発生時において様々な大規模災害から一時的に避難するため、大きな公園や大学のキャンパス等が広域避難場所(以下、避難場所)として地方自治体により指定されている。そして周辺住民を地域の避難場所に割当てする計画を広域避難計画という。広域避難計画では周辺住民の多くが避難することや指定できる広大な施設に限られることを考慮し、避難における周辺住民の負担を軽減できる割当てが求められる。そのため避難距離を短縮しつつ避難場所における人口密度を考慮する必要がある。

本研究では筆者が住む神奈川県横浜市青葉区(以下、青葉区)の広域避難計画を例にとり、避難距離と避難場所の人口密度を考慮した割当てモデルを提案し、実データを用いて現在の割当てや最近隣割当て(最寄りの避難場所への割当て)と比較することで、その有効性を評価する。

1.2. 神奈川県横浜市青葉区の現状

青葉区には 12 ヶ所の避難場所が指定されており、その 12 ヶ所の避難場所に 108 ヶ所の周辺町丁目が割当てられている[2]。現在の青葉区の割当ては市や区、自治会、町内会による話し合いによって大部分が決められており、原則として同じ町内会の町丁目が同じ避難場所に割当てられている。しかし町内会単位で割当てを行うことで、過大な避難距離を持つ町丁目の存在や、特定の避難場所への避難住民の集中という問題点がある。

2. 計画の改善

2.1. 提案するモデル

移動距離を最小化する割当て問題として $\min\text{-max}$ / $\min\text{-sum}$ 問題[3]という 2 つのモデルが代表的である。本研究では前者が「最大避難距離の最小化」を、後者が「総避難距離の最小化」を目指すモデルにあたる。なお、本研究では「青葉区の広域避難計画」という具体的な問題を扱うためにこの 2 つのモデルを統合することで、より現実に即した割当ての提案を行うことができるモデルを提案する。

Step1: 最大避難距離を最小にする割当てを求めることで、割当て後の最大避難距離を求める。

Step2: 総避難距離を最小にする割当てを求める際、Step1 で求めた最大避難距離を避難距離の上限として割当てを求める。

この 2 段階の割当てを、避難場所の人口密度に上限を設けた環境で求める。

なお、以下では最大避難距離を最小にする割当てを「Step1 割当て」、Step1 で求めた最大避難距離を避難距離の上限とする総避難距離を最小にする割当てを「Step2 割当て」と呼ぶ。

2.2. 問題設定

- 対象は青葉区及びその周辺地域とする。青葉区が指定した避難場所が隣接区内にある場合があるため周辺地区も対象とするが、周辺地区の割当ては現在の割当てを採用する。
- 割当ての地域区分は現在の広域避難計画で用いられている町丁目を採用する。
- 隣接する町丁目と避難場所の重心を結ぶネットワークを避難経路、その距離を避難距離とする。
- 同じ町丁目の住民は全員同じ避難場所に避難する。
- 人口や面積は同区のデータを採用する。 [4]

2.3. 定式化

定式化に用いる記号を定義する. 用いるデータに関して, $I = \{1, 2 \dots n\}$ を町丁目の集合, $J = \{1, 2 \dots m\}$ を避難場所の集合とする. 町丁目 i の人口を w_i , 避難場所 j の面積を S_j , 町丁目 i から避難場所 j までの避難距離を d_{ij} とする. Step1 割当てで得られる最大避難距離を D とする. 決定変数 x_{ij} は, 町丁目 i から避難場所 j に避難する場合 1, 避難しない場合 0 とする. α は定数とする.

以上の記号を用いて Step1 割当て, Step2 割当てを次のように定式化する.

<Step1 割当て>

$$\text{minimize } \{ \max d_{ij} x_{ij} \} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_{ij}}{S_j} \right\} \leq \alpha \quad (\forall j \in J) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in I) \quad (3)$$

<Step2 割当て>

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i d_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^m d_{ij} x_{ij} \leq D \quad (\forall i \in I) \quad (5)$$

$$\max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_{ij}}{S_j} \right\} \leq \alpha \quad (\forall j \in J) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in I) \quad (3)$$

式(1)は, 最大の避難距離を最小にする目的関数である. 式(2)は, 避難場所の人口密度に上限を設けることを示す. 式(3)は, すべての町丁目は必ずいずれかの避難場所に割当てられることを示す. 式(4)は, 総避難距離を最小にする目的関数である. 式(5)は, 避難距離が Step1 割当てで求めた最大の避難距離より小さいことを示す.

3. 実験と結果

前節の定式化をモデルファイルとし, 制約式(2)の α を 1.0, 0.8, 0.5, 0.4, 0.3 と変化させてソルバーの GLPK を用いて解を求めた.

表 1 は, Step1 割当て, 最近隣割当て, 現在の割当て, 総避難距離を最小にする割当て(以下, min-sum 割当て)のそれぞれの最大避難距離である. $\alpha = 0.3$ 以外の割当てでは最大避難距離が 1961m である. この値は最近隣割当ての最大避難距離と等しい. つまり, 既に最小の値をとっている避難距離が割当てにおける最大避難距離となっている. そのため, 本研究の対象地域である青葉区の広域避難計画では, min-max のモデルだけでは不十分であると考えられる.

図 1 は Step2 割当ての結果である. 実線が Step2 割当て, 点線が min-sum 割当ての結果を示す. $\alpha = 0.4, 0.5$ の場合に現在の割当てよりも総避難距離が小さく, かつ避難場所の人口密度に偏りが少ない割当ての存在が確認できる. また, 表 1 の最大避難距離は min-sum 割当てより Step1 割当ての方が短い, 図 1 の平均避難距離は min-sum 割当てより Step1 割当ての法が長い場合がある. これより, α の値が大きい場合は各町丁目割当てられる避難場所の候補があまり限定されないため, 各町丁目の避難距離を平均的に短縮することで総避難距離をより短縮することが可能だが, α の値が小さい場合は割当てられる避難場所の候補が限定され, 各町丁目短い避難距離の避難場所に割当てられない場合が発生するため, 一部の町丁目の避難距離が長く, 他の町丁目の避難距離が大幅に短縮される方が, 総避難距離をより短縮することが可能であると考えられる.

表 1 : 最大の避難距離

		最大避難距離 (m)
最近隣割当て		1961
現在の割当て		2772
min-sum 割当て	$\alpha = 1.0$	2367
	$\alpha = 0.8$	2367
	$\alpha = 0.5$	1961
	$\alpha = 0.4$	2177
	$\alpha = 0.3$	2258
Step1 割当て	$\alpha = 1.0$	1961
	$\alpha = 0.8$	1961
	$\alpha = 0.5$	1961
	$\alpha = 0.4$	1961
	$\alpha = 0.3$	2007

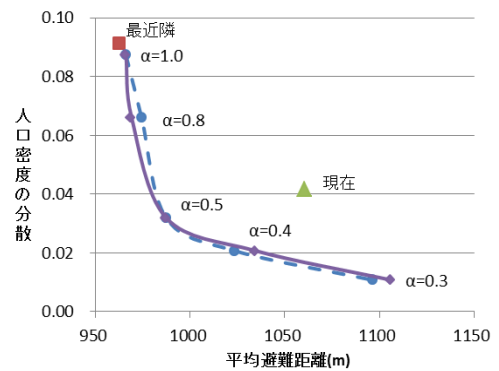


図 1 : 総避難距離を最小にする割当て

4. 施設配置問題

4.1. 提案するモデル

第 2, 3 節では, 避難場所の位置が既知の割当て問題において, min-max/min-sum 問題という 2 つのモデルを統合したモデルを提案することで, 現状より優れた割当ての可能性を示した.

一方で, 施設の位置を候補点集合の中から自由に決定し, 住民の割当てを求める施設配置問題として P-センター/P-メディアン問題[3]という 2 つのモデルが代表的である. 前者は最大移動距離の最小化(min-max)を, 後者は平均移動距離の最小化(min-sum)を目指すモデルにあたる. 本章では, 2, 3 章で有効性を示した「2 つのモデルを統合する」という手法を, P-センター問題と P-メディアン問題を統合したモデルの提案という形で施設配置問題に応用し, 2, 3 章で用いた青葉区の実データを用いて現在の割当てや P-メディアン問題を単独で解いた結果と比較することで, その有効性を示す.

Step1: 最大避難距離を最小にする避難場所配置と割当てを求めることで, 最大避難距離を求める.

Step2: 平均避難距離を最小にする避難場所配置と割当てを求める際, Step1 で求めた最大避難距離を避難距離の上限として解を求める.

この 2 段階の作業による問題を, 避難場所の収容定員に上限を設けた環境で解く. なお, 以下では最大避難距離を最小にする問題を「Step1 問題」, Step1 で求めた最大避難距離を避難距離の上限とする平均避難距離を最小にする問題を「Step2 問題」と呼ぶ.

4.2. 問題設定

- 対象は青葉区及びその周辺地域とする.
- 割当ての地域区分は現在の広域避難計画で用いられている町丁目を採用する.
- 隣接する町丁目の重心を結ぶネットワークを避難経路, その距離を避難距離とする.
- 町丁目の集合を避難場所配置の候補点集合とし, その集合から配置する点を選択する.
- 同じ町丁目の住民は全員同じ避難場所に避難する.
- 人口や面積は同区のデータを採用する[4]

4.3. 定式化

定式化に用いる記号を定義する. $V = \{1, 2 \dots n\}$ を町丁目の集合, 避難場所の数を P とする. 決定変数 y_j は, 町丁目 j に避難場所が配置される場合 1, されない場合 0 とする. β, M は定数とする. また, パラメータ w_i, d_{ij}, D , 決定変数 x_{ij} は, 第 2 節の記号の定義と同様とする.

以上の記号を用いて Step1 問題, Step2 問題を次のように定式化する.

<Step1 問題>

$$\text{minimize } \max \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \leq d_{ij} + (1 - y_j) M \quad (\forall i \in V) \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in V) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = P \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad (\forall i, j \in V) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i x_{ij} \leq \beta \quad (\forall j \in V) \quad (11)$$

<Step1 問題>

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i d_{ij} x_{ij} \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \leq D \quad (\forall i \in V) \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in V) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = P \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad (\forall i, j \in V) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i x_{ij} \leq \beta \quad (\forall j \in V) \quad (11)$$

式(6)は、最大の避難距離を最小にする目的関数である。式(7)は、すべての町丁目は必ずいずれかの避難場所に割当てられることを示す。式(8)は、配置する避難場所が P ヶ所であることを示す。式(9)は、町丁目の集合から避難場所を配置する点を選択することを示す。式(10)は、避難場所の収容定員に上限を設けることを示す。式(11)は、平均避難距離を最小にする目的関数である。式(12)は、町丁目の集合から避難場所を配置する点を選択することを示す。式(13)は、避難距離が Step1 問題で求めた最大の避難距離より小さいことを示す。

5. 実験と結果

前節の定式化をモデルファイルとして、制約式(10)の β を 50000, 45000, 40000, 35000 と変化させてソルバーの GLPK を用いて解を求めた。

表 2 は Step1 問題の結果である。Step1 問題の全ての結果において、現在の割当てより平均避難距離と最大避難距離が共に短縮されている。これより、2 つのモデルを統合したモデルは現在の割当てよりも避難距離の改善において有効性があることが確認できる。

表 3 は Step2 問題の結果と、P-メディアン問題を単独で解いた結果である。Step2 問題の全ての解において、P-センター問題を単独で解いた結果よりも平均避難距離と最大避難距離が共に短縮されている。これより、より避難距離が短い配置と割当ての存在が確認できる。

また、最大避難距離が短縮されているということは、特定の町丁目だけが長い避難距離を持つことで平均避難距離が短縮されているのではなく、すべての町丁目の避難距離が平均的に短縮されていることを示すと考えられる。よって、現実に求められる住民全体の避難における負担の軽減という視点でも、2 つのモデルを統合したモデルは有効性があることが確認できる。

表 2：最大避難距離を最小にする問題

		平均避難距離 (m)	最大避難距離 (m)
現在の割当		1060.36	2772
Step 1問題	制約なし	742.72	1356
	$w_j \leq 50000$	719.43	1356
	$w_j \leq 45000$	724.01	1423
	$w_j \leq 40000$	765.72	1449
	$w_j \leq 35000$		

表 3：平均避難距離を最小にする問題

		平均避難距離 (m)	最大避難距離 (m)
P-メディアン	制約なし	840.15	1924
	$w_j \leq 50000$	846.65	1924
	$w_j \leq 45000$	866.49	1924
	$w_j \leq 40000$	862.49	1924
	$w_j \leq 35000$	854.08	1924
Step 2割当て	制約なし	820.76	1342
	$w_j \leq 50000$	820.76	1342
	$w_j \leq 45000$	829.69	1423
	$w_j \leq 40000$	849.72	1427
	$w_j \leq 35000$		

6. まとめと今後の課題

本研究では広域避難計画における割当て問題や施設配置問題に対して、2 つの手法を統合するモデルを提案した。その結果、避難距離と人口密度に関して現在の広域避難計画に対してより良いモデルの存在が明らかになった。

本研究では、避難経路を町丁目の重心のネットワークで与え、避難する人口をその地域の人口で考えたが、現実の広域避難計画を考える際には道路網や外部地域からの避難人口を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 武松 裕樹・鈴木 勉：火災や建物倒壊の影響を考慮した避難場所への割当，日本オペレーションズ・リサーチ学会，(2006)
- [2] 横浜市青葉区役所：横浜市青葉区広域避難場所冊子抜粋，(2008)
- [3] 加藤 直樹：数理計画法，コロナ社，(2008)
- [4] 横浜市統計ポータルサイト：<http://www.city.yokohama.lg.jp/ex/stat/jinko/cho/new/aoba.html>.
最終閲覧日(2011/11/4)