

避難所計画問題の定式化と効果推定

清水 仁^{1,2} 諏訪 博彦^{2,3} 岩田 具治¹ 藤野 昭典¹ 澤田 宏¹ 安本 慶一²

概要：災害時には、避難所が必要である。これまでに、避難にかかる移動コストを最小化するように、避難所配置が計画されてきた。しかし、災害の規模が大きいくほど避難所を運営するためのコストは無視できなくなる。これに対して、被災者が減少したときに、避難所に残った被災者を別の避難所に移転してもらい、避難所をなるべく早期に閉鎖することで、運営コストを削減することができる。しかし、避難所間の移転は、被災者の負担が大きいと考えられる。そこで本研究では、被災者の減少を考慮した「避難所計画問題」を定式化する。ただし、定式化の際に必要な被災者の移動コストは、実際に支払が発生しないために過去データから求めることが難しい、という課題がある。この課題に対して我々は、実際の災害時の被災者数と避難所数の推移から移動コストを推定する手法を提案する。提案手法で得られたパラメータを用いて最適解を求めれば、被災者の移動コストと避難所の運営コストの和が最小となるように被災者を避難所に割り当てることができる。阪神大震災の記録を参考に条件設定したシミュレーション実験の結果、提案手法が運営コストを 62.1 億円 (59 %) 削減できることを示した。

1. はじめに

災害時には避難所が運営される。東日本大震災の際に多数の帰宅困難者が発生した事例 [1] があるため、各都市で避難所が整備されている [2]。たとえば東京都では、避難距離 3km 以内を目標として避難所を整備している [3]。このような整備で開設できる避難所の数が多くなると、災害発生時に被災者の位置の近くに避難所を開設できるため、被災者の避難コストを小さくすることができる。

しかし避難所の運営にはコストがかかる。また、避難所に被災者が滞在する期間が長期化すると、運営のコストも増大する。たとえば [4] は、阪神淡路大震災で避難所を開設した施設の貸し出し費用を元に、運営コストは 106.61 億円程度だったと試算している。一方で、避難所の数と比較して、被災者の人数が少ない場合もある [5]。そこで、なるべく少数で低コストの避難所に被災者を割り当てて、避難所の運営コストを小さくすることも重要である。

被災者の移動コストを削減したいという要望と、避難所の運営コストを削減したいという要望は、相反するものである。これまでに、移動コストと運営コストの和を最小化する課題に対して、施設配置問題 [6] が研究されている。しかし、この施設配置問題は時間を考慮しないため、被災

者数が変化する状況を表現できない。たとえば被災者が減少したときには、避難所に残った被災者を別の避難所に移転させ、避難所をなるべく早期に閉鎖することで、運営コストを削減することができる。ただし、被災者数の減少に合わせて被災者の宿泊場所を移動してもらうことには困難が伴うという実情も報告されている [7]。

以上のような状況で最適解を求めるためには、災害発生時における避難所開設当初のコストだけでなく、全避難所閉鎖までの累積コストを考慮する必要がある。本研究では施設配置問題を時間的に拡張して、全被災者が帰宅するまで避難所を運営するためのコストと被災者の移動に対するコストの和を最小にする割り当て問題を定式化する。この問題を解くことにより、時間が経過して被災者が帰宅して人数が減少する場合に、どの避難所をいつ閉鎖するとコストが最小になるかを求めることが可能となる。

しかし、定式化の際に必要な被災者の移動コストは、実際に支払が発生しないために過去データから求めることが難しい、という課題がある。この課題に対して我々は、実際の災害時の被災者数と避難所数の推移から推定する手法を提案する。提案手法の概要を図 1 に示す。まず、被災者の帰宅時刻が未知の場合の最適手順 FLP を仮定して、移動コストについてのパラメータを推定する。次に、得られたパラメータを用いて被災者の帰宅時刻が既知の場合の最適手順 OPT を実行することで、被災者の移動コストと避難所の運営コストの和が最小となるように被災者を避難所に割り当てる。この提案手法の運営コスト削減効果を評

¹ NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories

² 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

³ 理化学研究所革新知能統合研究センター, RIKEN AIP

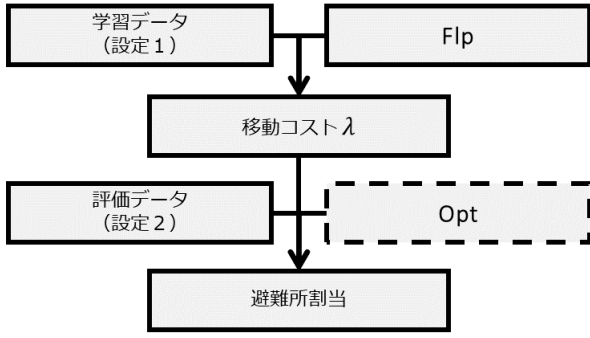


図 1: 提案手法の概要. 性能評価の際は, 点線で囲まれた部分を異なる手順にした手法と比較する.

価するために, 阪神大震災の記録を参考に条件設定したシミュレーション実験を行った.

本論文の貢献は以下の通りである.

- 避難所計画問題を定式化した.
- 被災者の移動コストを推定する手法を提案した.
- シミュレーション実験で提案手法の効果を推定した.

2. 問題設定

2.1 節で時間発展がない状況で被災者に避難所を割り当てる問題の定式化を示し, 2.2 節で時間発展を考慮した問題に拡張する.

2.1 施設配置問題

被災者集合を N , 避難所集合を M とし, $|N|$ 人の被災者が $|M|$ 箇所の避難所に避難する状況を考える. 避難所 m には最大で C_m 人の被災者を収容できる. ただし, 被災者全員を避難所に収容可能となるように, $\sum_{m=1}^{|M|} C_m \geq |N|$ とする. 被災者 n が避難所 m まで移動するのにかかる移動コストを d_{mn} とする. また, 避難所 m を運営するのにかかる運営コストを f_m とする. ここで, 被災者 n が避難所 m に収容されることを示す変数 x_{mn} と, 避難所 m を運営することを示す変数 y_m を導入する, そして, 移動コスト $\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N|} d_{mn}x_{mn}$ と運営コスト $\sum_{m=1}^{|M|} f_my_m$ の和, すなわち以下の式 (1'') を最小化する避難所割当 (変数 x_{mn}, y_m) を求める問題を解く. この形式の問題は施設配置問題とよばれる [6]. ただし, 数式には提案手法に対応した式番号を割り当てた.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{n=1}^{|N|} d_{mn}x_{mn} + \sum_{m=1}^{|M|} f_my_m \quad (1'')$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{n=1}^{|N|} x_{mn} \leq C_my_m, \forall m \quad (2'')$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_{mn} = 1, \forall n \quad (3'')$$

$$x_{mn} \in \{0, 1\} \quad (10'')$$

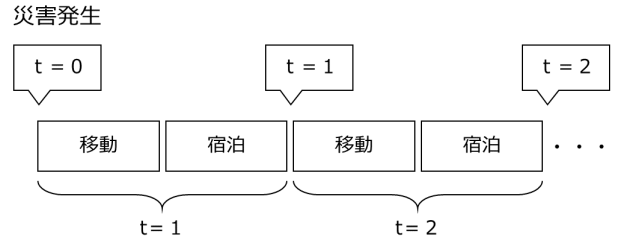


図 2: 避難所計画問題における時間の定義.

表 1: 記号の定義

記号	定義
N	被災者のインデクス集合: $n \in \{1, \dots, N \}$
N_t	時刻 t で避難所に宿泊する被災者のインデクス集合
M	地点のインデクス集合: $m \in \{1, \dots, M \}$
M_t	時刻 t で開設可能な避難所のインデクス集合
$\tilde{m}_t(n)$	時刻 t の被災者 n の位置
C_m	避難所 m の定員
T	考慮する時刻の最大値: $t \in \{0, \dots, T\}$
τ_n	被災者 n が帰宅する時刻
f_m	避難所 m の 1 ステップ分の運営コスト
$d_{tmm'}$	時刻 t に被災者が避難所 m から避難所 m' まで移動するコスト
x_{tmn}	被災者 n の時刻 t の位置が地点 m であることの指示変数
y_{tm}	時刻 t に避難所 m を運営することの指示変数
$z_{tmm'n}$	時刻 t に被災者 n が避難所 m から m' に移動することの指示変数
L_m	避難所 m と同じ施設タイプの施設数
U_m	避難所 m と同じ施設タイプの占有日数

$$y_m \in \{0, 1\} \quad (11'')$$

2.2 避難所計画問題

2.1 節の設定によって, 避難所に避難するためのコストと, 避難所を運営するためのコストの両方を考慮して最適な割当を求めることができる. しかし, この施設配置問題は時間を考慮しないため, 被災者数が増える状況や表現できない. そのため, 時間が経過して被災者が帰宅して人数が減少する場合に, どの避難所をいつ閉鎖するとコストが最小になるかを求めることはできない.

そこで我々は, 避難所に滞在中の避難者が時間の経過とともに逐次帰宅していく状況で, 避難所を減設するために別の避難所に移ってもらうことを想定して, 施設配置問題を時間的に拡張する. そして, 移動コストと運営コストの和が最小になるような避難所運営計画を求める「避難所計画問題」を定式化する. 本節の記号の定義を表 1 に示す.

2.1 節と同様に, 被災者集合を N , 避難所集合を M とし, $|N|$ 人の被災者全員が $|M|$ 箇所の避難所に避難する状

況を想定する。被災者 n は災害発生後にいずれかの避難所に滞在し、 τ_n ステップの滞在後に帰宅するものとする。本稿では τ_n を帰宅時刻と呼ぶ^{*1}。また、 $T = \max_n \tau_n$ とする。時刻は図 2 のように、災害発生時を $t = 0$ として離散化した整数 $t \in \{0, \dots, T\}$ で表現し、以降では単位時間を 1 ステップとよぶ。被災者は災害発生時に $|M|$ 箇所の地点のいずれかにいるものとし、被災者 n が災害発生時にいる地点を $\tilde{m}_0(n)$ とする。地点 m に避難所を開設した場合、避難所 m には最大で C_m 人の被災者を収容できる。ただし、避難所候補地ではない地点は $C_m = 0$ とし、被災者全員を避難所に収容可能となるように、 $\sum_{m=1}^{|M|} C_m \geq |N|$ とする。

時刻 t における地点 m から m' の移動には移動コスト $d_{tmm'}$ がかかり、任意の地点間の移動は 1 ステップ内に完了するものとする。また、避難所 m を開設した場合には、運営のために 1 ステップあたり f_m のコストがかかる。ただし、災害発生直後の避難コスト $d_{t=1,mm'}$ は、災害発生から時間が経過したときの移転コスト $d_{tmm'}, \forall t > 1$ とは異なることが想定されるため、移動コスト $d_{tmm'}$ は時刻 t に依存するものとする。以降では、 $t = 1$ での移動コストを避難コストとよび、 $t > 1$ での移動コストを移転コストとよぶ。ここで施設配置問題と同様に、時刻 t で被災者 n が避難所 m に収容されることを示す変数 x_{tmn} と、時刻 t で避難所 m を運営することを示す変数 y_{tm} を導入する。

以上の設定で、移動コストと運営コストの合計を最小にする問題は、以下の 0-1 整数二次計画問題 (BQP: Binary Quadratic Programming)[8] で表現することができる、我々はこの問題を「避難所計画問題」と名付けた。

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{m'=1}^{|M|} d_{tmm'} \sum_{n=1}^{|N|} x_{(t-1)mn} x_{tm'n} + \sum_{m=1}^{|M|} f_m y_{tm} \right) \quad (1')$$

$$\text{Subject to } \sum_{n=1}^{|N|} x_{tmn} \leq C_m y_{tm}, \forall t \geq 1 \quad (2')$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_{tmn} = 1, \forall t \leq \tau_n \quad (3')$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_{tmn} = 0, \forall t > \tau_n \quad (4')$$

$$x_{t=0,mn} = \begin{cases} 1, & m = \tilde{m}_0(n) \\ 0, & m \neq \tilde{m}_0(n) \end{cases} \quad (8')$$

$$y_{tm} \leq y_{(t-1)m} \quad (9')$$

$$x_{tmn} \in \{0, 1\} \quad (10')$$

$$y_{tm} \in \{0, 1\} \quad (11')$$

式 (1') は、被災者の移動コストと避難所の運営コストの和を最小化する、という目的関数である。式 (2') は、閉鎖中の避難所には被災者が滞在できず、開設中の避難所の被災者数が定員を超えない条件である。ただし災害発生時 ($t = 0$) においては、被災者はまだ避難所に収容されていないためこの制約は適用されない。式 (3')(4') は被災者が帰宅するまではいずれかの避難所に滞在する条件である。式 (8') は、被災者 n が災害発生時に所与の場所 $\tilde{m}_0(n)$ にいる条件である。式 (9') は、避難所を一旦閉鎖した後は再度開設しない条件 (以降、再開禁止) である。一般的に閉鎖した避難所を再度開設することは可能であるが、使用を中断する期間に別の用途に活用できず実質的に運営コストがかかると考えられるため、この制約を追加した。

この BQP を直接解くことは困難であるが、媒介変数 $z_{tmm'n} = x_{(t-1)mn} \times x_{tm'n}$ を導入することで、以下の 0-1 整数計画問題に変形できる [9],[8]。

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{m'=1}^{|M|} d_{tmm'} \sum_{n=1}^{|N|} z_{tmm'n} + \sum_{m=1}^{|M|} f_m y_{tm} \right) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{n=1}^{|N|} x_{tmn} \leq C_m y_{tm}, \forall t \geq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_{tmn} = 1, \forall t \leq \tau_n \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_{tmn} = 0, \forall t > \tau_n \quad (4)$$

$$z_{tmm'n} \geq x_{(t-1)mn} + x_{tm'n} - 1 \quad (5)$$

$$z_{tmm'n} \leq x_{(t-1)mn} \quad (6)$$

$$z_{tmm'n} \leq x_{tm'n} \quad (7)$$

$$x_{t=0,mn} = \begin{cases} 1, & m = \tilde{m}_0(n) \\ 0, & m \neq \tilde{m}_0(n) \end{cases} \quad (8)$$

$$y_{tm} \leq y_{(t-1)m} \quad (9)$$

$$x_{tmn} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$y_{tm} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$z_{tmm'n} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

*1 災害発生直後に避難所に向かう被災者が帰宅できる時刻は一般には事前に分からないが、ここでは τ_n を既知の値とする。

式 (5)(6)(7) は、移転前に移転元において、移転後に移転先

にいる場合にのみ、移転元から移転先に移転することを表す条件、すなわち、 $z_{tmm'n} = x_{(t-1)mn} \times x_{tmm'n}$ とするための条件である。

2.3 移動コスト推定問題

2.2 節の問題設定は、混合整数計画問題のソルバーを用いて最適解を求めることができる。しかしそのためには、移転コストと運営コストを適切に設定する必要がある。運営コスト f_m については、たとえば施設の貸し出し費用から推定することができる [4]。しかし被災者の移動コスト $d_{tmm'}$ は、実際に金銭の支払が発生しないために過去データから求めることが難しい。

一方で、[4] には施設タイプ別の施設数 L_m と占有日数 U_m が示されている。そこで、 f_m 、 L_m 、 U_m および実際の災害時の被災者数の推移 $|N_t|$ と避難所数の推移 $|M_t|$ を既知とし、移動コスト $d_{tmm'}$ を推定する問題を、移動コスト推定問題とする。

3. 提案手法

移動コスト推定問題に対して、以下の手順で移転コスト $d_{tmm'}$ を推定する。まず、移転コスト $d_{tmm'}$ が時刻や避難所の組み合わせにかかわらず一定の値 λ と仮定する。次に、過去の避難所運営が 3.1 節の手順で行われたと仮定する。そして、学習用データに最も適合するパラメータ λ を選択する。学習用データから推定されたパラメータ λ (移動コスト) を用いて、2.2 節で定式化した問題について整数線形ソルバーを用いて最適解を求める (図 1)。この手順を OPT とよぶ。

3.1 逐次施設配置モデル: FLP

$t = 1$ から $t = T$ の各時刻ステップについて、逐次的に以下の施設配置問題 (Facility Location Problem: FLP) を解く。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{m \in M_t} \left(\sum_{n \in N_t} d_{t\tilde{m}_t(n)m} x_{tmn} + f_m y_{tm} \right) \quad (1.F)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{n \in N_t} x_{tmn} \leq C_m y_{tm}, \forall m \in M_t \quad (2.F)$$

$$\sum_{m \in M_t} x_{tmn} = 1, \forall n \in N_t \quad (3.F)$$

$$x_{tmn} \in \{0, 1\} \quad (10.F)$$

$$y_{tm} \in \{0, 1\} \quad (11.F)$$

ここで、 N_t は時刻 t で宿泊する被災者集合で $N_1 = \{1, \dots, N\}$ とし、 M_t は時刻 t で開設可能な避難所集合、すなわち時刻 $t-1$ で $y_{tm} = 1$ である避難所の集合であり、 $M_1 = \{1, \dots, M\}$ とする。得られた解が $x_{mn} = 1$ のとき、 $\tilde{m}_t(n) = m$ とする。

この手順 FLP は、被災者の帰宅時刻が未知の状態、各時刻の運営コストと移動コストの和が最小になるよう被災者を誘導して避難所を運営する手順とみなすことができる。 $\lambda \rightarrow \infty$ のとき、運営コストを無視してなるべく被災者が移動しない解となり、 $\lambda \rightarrow 0$ のとき、移動コストを無視してなるべく避難所を閉鎖する解となる。

3.2 パラメータの適合性の評価指標

モデルから得られた y_{tm} が、[4] に示されている施設タイプ別の占有日数 U_m と整合しているほど、モデルの適合性は高いと考えられる。そこで、得られた施設タイプ別の占有月数の推定値 $\sum_{t=1}^T y_{tm}$ に施設タイプ別の施設数の比率 L_m/L'_m と 1 か月当たりの日数 30 日 を乗じた値 $\hat{U}_m = 30 \times L_m/L'_m \times \sum_{t=1}^T y_{tm}$ と、施設占有日数 U_m との二乗平均平方根誤差 $\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^{|M|} (U_m - \hat{U}_m)^2}$ をパラメータ λ の適合性の評価指標として用いる。

また、[4] には運営コストの合計 (106.61 億円) が示されている。そこでこの運営コストと、上記の施設占有日数 \hat{U}_m に運営コスト f_m を乗じた推定運営コスト $\sum_{m=1}^{|M|} \hat{U}_m f_m$ を比較する。

4. 評価実験

4.1 実験概要

評価実験では、阪神大震災の際の神戸市のデータを参考にしたデータセットを作成して、実際の災害に近い設定で提案手法の効果を評価する。まず、被災者の移動コストを推定するための学習用データセット (HANSHIN 設定 1) と、提案手法の効果を評価するための評価用データセット (HANSHIN 設定 2) の 2 種類を用意する。そして、HANSHIN 設定 1 の実験によって、FLP モデルがその他のモデルよりも現実のデータに適合することを示す。また、HANSHIN 設定 1 の実験で得られた移動コストの推定値を HANSHIN 設定 2 に適用することで、提案手法 OPT が他の手法と比較して目的関数を最も小さくできることを示す。

4.2 データセット HANSHIN

避難所の数と定員と運営コストは [4] を参考にして、表 2 のように設定した。避難所の定員は [4] に示されていなかったため、施設利用総面積に比例した値を設定した。また、計算時間を抑制するために、各施設タイプについて避難所の数は 1 箇所ずつとした。HANSHIN 設定 1 は、1 施設当たりの定員を実際の施設に見合うようにして、HANSHIN 設定 2 は、厳密な最適解を現実的な計算時間で求められるように定員を縮小した。

避難所に宿泊する被災者数は、 $t = 1$ で全員収容できるように定員の 9 割 (設定 1 では $|N_1| = 3,933$ 、設定 2 では $|N_1| = 100$) とし、実際の阪神大震災の避難所数と就寝者

(単位) 施設タイプ	設定 1, 2 共通		設定 1	設定 2	評価用	
	(千円/月) 運営コスト f_m	(箇所) 施設数 L'_m	(人) 定員 C_m	(人) 定員 C_m	(箇所) 施設数 L_m	(日) 占有日数 U_m
保育所/幼稚園	1,110	1	90	3	39	4,353
小学校	5,490	1	840	21	145	19,882
中学校	5,280	1	840	21	55	7,437
高校	6,660	1	880	22	31	4,652
大学校	3,690	1	790	20	7	788
公的施設 (小)	1,350	1	80	2	131	14,866
公的施設 (中)	5,730	1	120	3	69	9,406
公的施設 (大)	8,940	1	310	8	20	2,749
民間施設 (小)	2,790	1	80	2	130	9,783
民間施設 (大)	13,740	1	130	4	6	388
公園	210	1	210	6	60	7,736
合計	54,990	11	4370	112	693	82,040

表 2: 避難所の運営コストと定員. [4] を用いたが, 計算を実行可能とするために施設数を全て 1 箇所とし, 施設利用総面積に比例した定員を設定した.

表 3: 阪神大震災の避難所数と就寝者数の推移 [10] を参考にした HANSHIN の設定

阪神大震災 [10]			HANSHIN $ N_t $		
日付	避難所数	就寝者数	t	設定 1	設定 2
1995/1/17	497	202,043	1	3,933	100
1995/2/17	527	106,050	2	2,065	53
1995/3/17	442	62,604	3	1,220	32
1995/4/17	391	42,330	4	826	22
1995/5/17	361	31,132	5	609	17
1995/6/17	314	21,609	6	424	13
1995/7/17	283	16,748	7	330	11
1995/8/17	222	8,491	8	170	7

表 4: 元データ [10] とシミュレーション設定 (データセット HANSHIN) との比率

	元データ	設定 1	(倍率)	設定 2	(倍率)
被災者	202,043	3,933	(51.4)	100	(2,020.4)
避難所	693	11	(63.0)	11	(63.0)

数の推移 [10] に比例して減少するように, 帰宅時刻を設定した (表 3). 地震が発生した 1 月 17 日から神戸市が全避難所を廃止した 8 月 20 日までを考慮できるように, 時間ステップは 1 カ月で $T = 8$ とした. 被災者 n の初期位置 $\tilde{m}_0(n)$ は, 帰宅時刻 τ_n とは独立に $|M| = 11$ 箇所の避難所から等確率で選択した. 各データセットを 10 個ずつ生成した*2. 以上のデータセットは, 実際の元データと比較すると, 表 4 の比率となる.

*2 現実には被災状況が地域に依存するため独立ではないと思われるが, 議論を簡単にするために独立とした.

4.3 比較手法

提案手法の OPT を以下の手順に置き換えたものと比較し, 目的関数および避難所の運営コストと被災者の移転の回数进行评估する.

- 逐次施設配置モデル: FLP
提案手法の中で用いた FLP をベースラインとする.
- 移転なしモデル: NoMOVE
避難所を閉鎖するための被災者の移転が発生しない手順である. 被災者は $t = 1$ で, 最寄の避難所 $\tilde{m}_0(n)$ に宿泊する. 避難所 $\tilde{m}_0(n)$ に入れない被災者は, 避難コストの和が最小となるように避難所 m を割り当てる. $t > 1$ では被災者は移転せずに, 帰宅時刻まで $t = 1$ と同じ避難所に滞在する. 被災者が全て帰宅して 0 人になった避難所は閉鎖する. この手順は, 移転コストが最小となる. 避難所計画問題において移動コスト $\lambda \rightarrow \infty$ の極限の解に一致する.
- ビンパッキングモデル: BINPACK
各時刻 t における宿泊者数 $|N_t| = \sum_{n=1}^{|N|} x_{tmn}$ は既知である. そこでまず移動コストを無視して, 避難所の運営コストの和を最小化する以下のビンパッキング問題を解き, 各時刻で開設する避難所 y_{tm} を決定する.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{|M|} f_m y_{tm} \quad (1.y)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{m=1}^{|M|} y_{tm} \leq |N_t|, \forall t \geq 1 \quad (2.y)$$

$$y_{tm} \leq y_{(t-1)m} \quad (9.y)$$

$$y_{tm} \in \{0, 1\} \quad (11.y)$$

その後, y_{tm} を固定して以下の最適化問題を解き, 避難所と被災者の割当問題を求解する.

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^{|M|} \sum_{m'=1}^{|M|} d_{tmm'} \sum_{n=1}^{|N|} z_{tmm'n} \right) \quad (1.x)$$

$$\text{Subject to } \sum_{n=1}^{|N|} x_{tmn} \leq C_m y_{tm}, \forall t \geq 1 \quad (2.x)$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_{tmn} = 1, \forall t \leq \tau_n \quad (3.x)$$

$$\sum_{m=1}^{|M|} x_{tmn} = 0, \forall t > \tau_n \quad (4.x)$$

$$z_{tmm'n} \geq x_{(t-1)mn} + x_{tm'n} - 1 \quad (5.x)$$

$$z_{tmm'n} \leq x_{(t-1)mn} \quad (6.x)$$

$$z_{tmm'n} \leq x_{tm'n} \quad (7.x)$$

$$x_{t=0,mn} = \begin{cases} 1, & m = \tilde{m}_0(n) \\ 0, & m \neq \tilde{m}_0(n) \end{cases} \quad (8.x)$$

$$x_{tmn} \in \{0, 1\} \quad (10.x)$$

$$z_{tmm'n} \in \{0, 1\} \quad (12.x)$$

この手法は、避難所の運営コストを最小にする解が得られる。避難所計画問題において移動コスト $\lambda \rightarrow 0$ の極限の解の一つに一致する。

4.4 実験環境

本稿の実験は、Intel(R) Core(TM)i7 1065G7 1.50GHz の CPU, 16GB のメモリを搭載した計算機で実行した。実装には Google OR-Tools[11] を用いた。整数線形ソルバーとして SCIP[12], [13] を用いた。

5. 実験結果

5.1 移動コスト λ の推定結果

データセット HANSHIN 設定 1 に対して様々な λ を与えて FLP を実行し、各 λ に対する推定運営コスト $\sum_{m=1}^{|M|} \hat{U}_m f_m$ を、現実の避難所の総数に合わせて計算した値を図 3 に示す。 $\lambda = 50$ のとき占有日数 U_m の RMSE が最小となり、最もデータに適合した。このとき、対応する推定運営コストも現実の値 (106.61 億円) に近くなった。一方、同じデータセット HANSHIN 設定 1 に対して、NoMove を適用すると運営コストが 205 億円で現実よりも過大となり、BINPACK を適用すると運営コストが 31.7 億円で現実よりも過少となる。

以上の結果から、阪神大震災では FLP のような方法で避難所の集約を行っていたと考えられる。また、 $\lambda = 50$ は 1 人 1 回当たり 5 万円の移動コストに対応し、移動させる被災者へ金銭を支払う場合に必要となるコスト (迷惑料) とみなすことができる。すなわち、被災者は 1 人 1 回当た

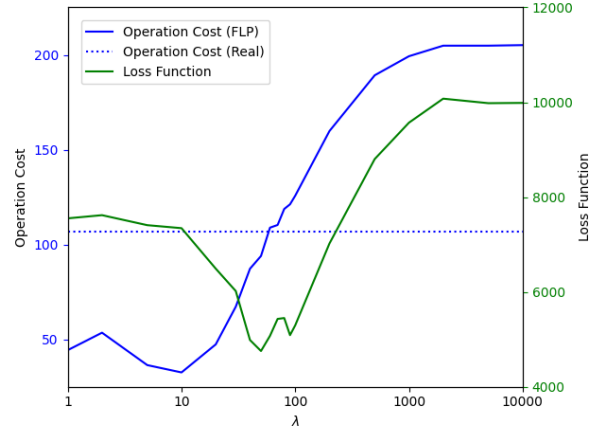


図 3: データセット HANSHIN の設定 1 のシミュレーション実験による被災者の移動コスト (λ) の推定。横軸は移動コスト (対数軸), 縦軸は運営コスト (左軸) と RMSE (右軸) を示す。青線が FLP の運営コストの平均値 (10 回試行), 青点線が実際の運営コスト, 緑線が FLP の RMSE を示す。 $\lambda = 50$ で RMSE が最小となる。

りの移転に 5 万円相当の負担を感じていたため、避難所削減のための移転を容易には受容しなかったと考えることができる。一方、受容した被災者は別の避難所に移転したため、各時刻における最適解 FLP に近いタイミングで避難所を閉鎖して運営コストを抑制していたと推察される。

5.2 性能評価の実験結果

データセット HANSHIN 設定 2 を用いた性能評価の実験結果を表 5 に示す。設定 2 の被災者数は設定 1 の約 1/40 であるため移動コストは 40 人分と対応させて、「1 人 1 回当たり 200 万円」となる $\lambda = 2000$ に固定した。

ベースライン FLP と比較すると、NoMove は移動コストが減少しているものの、運営コストが大幅に増加してしまう。また、BINPACK は運営コストが減少しているものの、移動コストが増加している。それに対して OPT は目的関数を最小にしており、運営コストが 62.1 億円 (59%) 削減された。運営コストを最小とする BINPACK よりは大いなるもの、被災者の移動の回数は BINPACK より小さく、FLP に近い回数となった。すなわち、もし被災者の帰宅時刻が事前にわかっていたら、提案手法を適用することで阪神大震災の避難所の運営コストを 62.1 億円 (59%) 削減できていたことが示された。

FLP と OPT で求めた解の具体例を表 6 に示す。FLP では $T = 8$ まで複数の避難所を開設し続けているが、OPT では $T \geq 5$ で被災者を単独の避難所に集約しているため、運営コストを節約できていることがわかる。

6. 関連研究

利用者の位置を考慮して施設の位置を適切に決定する

表 5: データセット HANSHIN の設定 2 のシミュレーションの目的関数と、その内訳の移動コストと運営コスト。運営コストには金額に換算した値を併記した。移動コストには被災者の移動回数の累計を併記した。全て 10 回試行の平均値。移動コスト λ は 2000 に固定した。

手法	FLP	NoMove	BinPack	OPT
目的関数	264,215	407,431	201,290	190,550
移動コスト (回)	105,200 52.6	76,600 38.3	127,40 63.7	107,600 53.8
運営コスト (億円)	159,015 105.2	330,831 152.3	73,890 31.5	82,950 43.1
計算時間 (ms)	447.3	103.4	3,551.8	837,058.3

表 6: データセット HANSHIN 設定 2 ($\lambda = 2000$) に対して FLP と OPT で求めた解の一例。各手法について、各時刻の避難所に宿泊する人数を示す。網掛けは、避難所がその時刻に開設されていることを示す。

施設 タイプ	時刻									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
FLP										
幼・保	8	3	3	2	1	0	0	0	0	0
小学校	10	21	11	7	6	5	3	0	0	0
中学校	6	21	11	7	5	5	4	5	3	3
高校	8	14	6	4	0	0	0	0	0	0
大学	3	20	13	11	10	7	6	6	4	4
公的施設	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0
公的・中	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0
公的・大	14	8	6	0	0	0	0	0	0	0
民間施設	14	2	0	0	0	0	0	0	0	0
民間・大	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
公園	10	6	3	1	0	0	0	0	0	0
OPT										
幼・保	8	3	1	0	0	0	0	0	0	0
小学校	10	21	16	0	0	0	0	0	0	0
中学校	6	21	17	12	0	0	0	0	0	0
高校	8	16	0	0	0	0	0	0	0	0
大学	3	18	17	18	20	17	13	11	7	7
公的施設	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0
公的・中	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0
公的・大	14	8	0	0	0	0	0	0	0	0
民間施設	14	2	0	0	0	0	0	0	0	0
民間・大	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
公園	10	6	2	2	2	0	0	0	0	0
N_t	100	100	53	32	22	17	13	11	7	7

施設配置問題は古くから研究されており、起源としては Weber[14] や Hotelling[15] の研究までさかのぼることができる。施設配置問題の応用範囲は広く、工場や倉庫の配置

が典型的な例であるが、病院、消防署、学校、ゴミ処理場などの配置など、多くの分野に適用できる [16],[17]。本稿の研究は、利用者の位置と施設の候補地が離散的で、施設に対するコストと施設と利用者の組合せに対するコストの和を最小化するタイプの施設配置問題である。そのような問題の中にもバリエーションがあり、施設に収容できる利用者数に制約がないシンプルなタイプ (UFLP: Uncapacitated Facility Location Problem)[18],[16],[19] と、制約があるタイプ (CFLP: Capacitated Facility Location Problem) の 2 種類に分類される [20]。本研究の定式化で $T = 1$ の場合は CFLP と一致する。

施設配置問題を時間的に拡張したモデルとしてこれまでに、需要が変化する動的施設配置問題 (DFLP: dynamic facility location problem) が提案されている [21], [22]。また、施設配置において確率的な要素を考慮した問題設定も検討されている [23], [24]。さらに、複数の施設を経由する経路を考慮するモデルとして複数段階施設配置問題 (MSUFLP: Multi-Stage Uncapacitated Facility Location Problem) が定式化されている [19]。様々な研究が進展している。本研究と同様に数理モデルを避難所の配置計画に適用する手法も提案されている [25],[26]。しかし、避難所を閉鎖するために被災者が移転するコストを考慮できるモデルは、我々の知る限りこれまでに定式化されていない。

7. まとめと今後の課題

本研究では、被災者の逐次的な帰宅に伴う避難所の閉鎖を考慮した避難所割当問題について定式化を行った。また、移動コストの推定手法を提案した。さらに、阪神大震災を模擬したシミュレーション実験によって提案手法の効果を推定した。

定式化において、今回は被災者が減少する場合のみを検討したが、増加する場合も自然な拡張として定式化可能である。また、避難所の運営計画を例として説明したが、数理モデルの適用先としては避難所に限定されない。たとえば、ユーザに対応づけられる設備を持つサービスにおいて、ユーザの増減に対応して設備を増減設して運用コストを最小化する際に、解約時期を予測できればユーザの移転の回数も抑える効率的な割り当てを求めることができる。

本研究では、阪神大震災の避難所の状況を想定してシミュレーション条件を決めた。実際の災害で提案手法を実施するためには、過去の災害における移動コストを推定して、異なる災害に対して適用する必要がある。本稿ではデータセットが限定されていたため、同一の災害で推定と評価の両方を行った。異なる災害において移動コストがどの程度異なるかについては、今後の課題として検討したい。

また、計算量の限界のため、 T のステップを 1 カ月と粗くした上で、現実的な時間で解を得られる規模に避難所数 M と被災者数 N を縮小した。しかし、たとえば京都市に

は100以上の避難所数があり[27], 帰宅困難者は39万人と想定されている[28]. このような現実の規模の問題を解くためには, より効率的な計算方法を開発する必要がある.

本研究では被災者の帰宅時刻を所与とした. 実際には, 災害発生時に交通機関が復旧する時刻や, 仮設住宅が整備される時刻などを正確に予測することは困難だろう. しかし被災者の住所が近いほど帰宅が早い, などの大まかな予測をすることで, 本稿のモデルは適用可能と考える. 一方で, 避難所に宿泊する被災者の快適さなどは考慮しなかった. 避難所の運営コストを直接負担しない被災者は, 屋外の避難所や混雑した避難所をなるべく避けたいという気持ちもあるだろうが, 避難所を運営する側としては, なるべく早期の帰宅を促進したいという考え方もあるだろう. このような事情を反映するためには, 目的関数の設計に工夫の余地が残る.

参考文献

- [1] 朝日新聞. 大震災、都内の帰宅困難者は9万人以上 首都圏白書, 2011. <http://www.asahi.com/special/10005/TKY201106140148.html> (2011年6月14日掲載, 2021年1月13日アクセス).
- [2] 秋田県. 「観光客等の防災対策」ガイドライン, 2015. <https://www.bousai-akita.jp/uploads/user/system/File/guidelines/kankoukyaku.pdf> (2015年3月掲載, 2021年1月13日アクセス).
- [3] 東京都. 東京都震災対策事業計画(平成23年度~27年度), 2013. <https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/taisaku/torikumi/1000061/1000364.html> (2013年9月掲載, 2021年2月26日アクセス).
- [4] 大塚和徳, 越山健治. 災害時に利用される空間コスト算定に関する研究. 日本都市計画学会関西支部研究発表会講演概要集, Vol. 14, pp. 121-124, 2016.
- [5] NHK. 地震 福島県内 39人が避難, 2021. <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210214/k10012865501000.html> (2021年2月14日掲載, 2021年2月16日アクセス).
- [6] Gérard Cornuéjols, George Nemhauser, and Laurence Wolsey. The uncapacitated facility location problem. Technical report, Cornell University Operations Research and Industrial Engineering, 1983.
- [7] 中平遥香ほか. 阪神・淡路大震災における学校避難所の研究~「記憶」と「記録」を継承するために~. 2018.
- [8] Shinji Ito and Ryohei Fujimaki. Optimization beyond prediction: Prescriptive price optimization. In *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 1833-1841, 2017.
- [9] 梅谷俊治. しっかり学ぶ数理最適化. 講談社, 2020.
- [10] 神戸市民生局. 平成7年 兵庫県南部地震神戸市災害対策本部 民生部の記録, 1996. <http://www.lib.kobe-u.ac.jp/directory/eqb/book/4-265/html/pdf/8-11.pdf> (1996年2月発行, 2021年4月19日アクセス).
- [11] Laurent Perron and Vincent Furnon. Google or-tools, version 7.2, 2019. <https://developers.google.com/optimization/>.
- [12] Gerald Gamrath, Daniel Anderson, Ksenia Bestuzheva, Wei-Kun Chen, Leon Eifler, Maxime Gasse, Patrick Gemander, Ambros Gleixner, Leona Gottwald, Katrin Halbig, Gregor Hendel, Christopher Hojny, Thorsten Koch, Pierre Le Bodic, Stephen J. Maher, Frederic Matter, Matthias Miltenberger, Erik Mühmer, Benjamin Müller, Marc E. Pfetsch, Franziska Schülöcker, Felipe Serrano, Yuji Shinano, Christine Tawfik, Stefan Vigerske, Fabian Wegscheider, Dieter Weninger, and Jakob Witzig. The SCIP Optimization Suite 7.0. Technical report, Optimization Online, March 2020.
- [13] Gerald Gamrath, Daniel Anderson, Ksenia Bestuzheva, Wei-Kun Chen, Leon Eifler, Maxime Gasse, Patrick Gemander, Ambros Gleixner, Leona Gottwald, Katrin Halbig, Gregor Hendel, Christopher Hojny, Thorsten Koch, Pierre Le Bodic, Stephen J. Maher, Frederic Matter, Matthias Miltenberger, Erik Mühmer, Benjamin Müller, Marc E. Pfetsch, Franziska Schülöcker, Felipe Serrano, Yuji Shinano, Christine Tawfik, Stefan Vigerske, Fabian Wegscheider, Dieter Weninger, and Jakob Witzig. The SCIP Optimization Suite 7.0. ZIB-Report 20-10, Zuse Institute Berlin, March 2020.
- [14] Alfred Weber. *Theory of the Location of Industries*. University of Chicago Press, 1929.
- [15] Harold Hotelling. Stability in competition. *The Economic Journal*, Vol. 39, No. 153, pp. 41-57, 1929.
- [16] Mark S Daskin. What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics (NRL)*, Vol. 55, No. 4, pp. 283-294, 2008.
- [17] 田中健一. 数理最適化入門(4): 施設配置の数理モデル(チュートリアル). *応用数理*, Vol. 23, No. 4, pp. 178-183, 2013.
- [18] Philip Robers and Leon Cooper. A study of the fixed charge transportation problem. *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 2, No. 2, pp. 125-135, 1976.
- [19] Yury Kochetov. Facility location: Discrete models and local search methods., 2011.
- [20] Ling-Yun Wu, Xiang-Sun Zhang, and Ju-Liang Zhang. Capacitated facility location problem with general setup cost. *Computers & Operations Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 1226-1241, 2006.
- [21] Tony J Van Roy and Donald Erlenkotter. A dual-based procedure for dynamic facility location. *Management Science*, Vol. 28, No. 10, pp. 1091-1105, 1982.
- [22] Stefan Nickel and Francisco Saldanha-da Gama. Multi-period facility location. In *Location science*, pp. 303-326. Springer, 2019.
- [23] Susan Hesse Owen and Mark S Daskin. Strategic facility location: A review. *European journal of operational research*, Vol. 111, No. 3, pp. 423-447, 1998.
- [24] Isabel Correia and Francisco Saldanha-da Gama. Facility location under uncertainty. In *Location science*, pp. 185-213. Springer, 2019.
- [25] 太田裕, 鏡味洋史. 地震時避難場所の配置計画の検討(1) 問題の定式化の試み. *地震* 第2輯, Vol. 32, No. 1, pp. 25-39, 1979.
- [26] 瀧澤重志. 避難計画問題への離散アルゴリズムの適用(特集 データを読み解く技術: ビッグデータ, e-サイエンス, 潜在的ダイナミクス). *電子情報通信学会誌*, Vol. 97, No. 5, pp. 393-398, 2014.
- [27] 京都市. 指定避難所一覧. <https://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/cmsfiles/contents/0000132/132312/hinansyoR20801.pdf> (2017年4月4日公開, 2021年1月7日アクセス).
- [28] 京都市. 大規模災害時における観光客等帰宅困難者対策, 2020. <https://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/page/0000076886.html> (2020年8月4日掲載, 2021年1月13日アクセス).