

水災害時の一時避難所最適配置問題に関する研究

A model determining optimal location problem of temporary gathering locations in the case of a water disaster

内田 賢悦
Kenetsu Uchida

¹北海道大学大学院 工学研究院

本研究では、水災害時の一時避難所最適配置問題の定式化を行う。すなわち、収容人員に制約のない一時避難所候補が複数存在し、その中から最適な一時避難所の組合せを選択する問題の定式化を行う。水災害のリスクがある場合、世帯は、避難しない場合に受ける期待被害額と避難に要する心理的費用から、避難するかどうかの意思決定を行うと仮定する。また各一時避難所候補は、標高と水災害発災地点からの距離によって、その安全性指標が決定され、避難する世帯は各一時避難所までの距離と一時避難所の安全性指標により、一時避難所を1か所選択すると仮定する。以上の仮定の下、本研究では、住民が負担する期待費用が最小化される一時避難所の組合せを求める問題の定式化を行った。

In this study, a formulation of problem which determines the optimal location of temporary gathering locations in the case of a water disaster is presented. The candidates of temporary gathering locations assumed in this study have no capacity constraint. Among the candidates of temporary gathering locations, the problem presented in this study can choose some of them so that total expected cost for all of the households is minimized. The households assumed in this study decide whether or not to evacuate by considering both the expected costs they have to pay if disaster happens and the psychic cost they have to pay in evacuating. The households choose then one of the temporary gathering locations when they decide to evacuate by considering both the distance to a temporary gathering location and the safety index of the temporary gathering location which is characterized by both the altitude and distance from disaster point(s).

1. はじめに

災害時の一時避難所（広場、公園、空地などの一時的に避難できる場所）は、生命への危険性から住民を守るために重要な役割を果たしている。また、一時避難所の選択によって、住民の避難行動だけではなく、災害時の人的被害額も変化すると考えられる。このことは、前者に関しては、避難所までの距離が避難するかどうかの意思決定に影響し得ること、後者に関しては、災害規模によっては一時避難所に避難した場合であっても人的被害を受け得ることを考えると明らかであろう。そのため、一時避難所の配置は、住民の避難行動と災害規模の関係を考慮した上で慎重に検討されるべきである。

本研究では、水災害時を想定した一時避難所の最適配置問題を考える。ここで一時避難所の最適配置とは、一時避難所候補（一時避難所となり得る複数の場所）から最適な一時避難所の組合せを選択することを意味する。したがって、新たな用地買収を伴うような一時避難所新設は想定していない（たとえば、高台にある住宅に立ち退きをせまって、そこに一時避難所を新設するような非現実的な避難所配置）。本研究で考える一時避難所最適配置問題では、住民の避難行動（避難するかどうか）と避難する場合の避難所選択行動（どの避難所を選択するか）を内生化した上で、住民全体の期待費用を最小化する一時避難所の配置計画を考える。

本研究の構成は以下に示す通りである。第2章では、一時避難所の最適配置問題の定式化を行う。ここでは、先述したように住民の避難行動と避難所選択行動の関係を踏まえ、全世帯での総期待費用の定式化が行われる。さらに、総期待費用が最小化されるような一時避難所の最適配置を決定することができる。第3章では、本研究で示された一時避難所の最適配置問題を実問題に適用した場合に得られると予測される知見についてまとめる。

2. 問題の定式化

(1) 仮定

本研究で設定した仮定は以下の通りである。

- ・対象地域には、複数の避難所候補が存在する。
- ・避難所候補には収容人員に制約はない。
- ・住民は、災害時に避難しない場合に受ける期待被害額と避難に要する心理的費用を天秤にかけ、避難するかどうかの決定を行う。
- ・住民が避難すると決定した場合、避難所選択には、世帯から避難所までの経路距離と避難所の安全性が影響する。
- ・避難したとしても避難所の安全性が低い場合、被害を受ける可能性がある。

上記の関係をモデル化することによって、災害時に住民が負担する総費用を推計できると考えられる。この総費用を最小化する一時避難所の最適配置計画立案を念頭に置き、以下では避難行動のモデル化を行う。

(2) 記号

I	: 世帯の集合
J	: 一時避難所の集合
r_{ij}	: 世帯 $i \in I$ から避難所 $j \in J$ までの最短経路距離
d_j	: 発災地点（河川決壊箇所または海岸線）から避難所 j までの最短距離
h_j	: 避難所 j の標高
$a_j(d_j, h_j)$: 避難所 j の安全性指標 $(\frac{\partial a_j(d_j, h_j)}{\partial d_j} > 0 \ \& \ \frac{\partial a_j(d_j, h_j)}{\partial h_j} > 0)$

f	: 被災時の人的被害額
p_y	: ある年 y における被災確率
$P_e^i(p_y)$: 被災確率が p_y のときに世帯 i の住民が避難する確率
$P_s^i(p_y) = 1 - P_e^i(p_y)$: 被災確率が p_y のときに世帯 i の住民が避難しない確率
$P_{j e}^i$: 世帯 i の住民が避難する場合、避難所 j を選択する確率
$P_{f j,e}^i(p_y)$: 世帯 i の住民が避難所 j を選択した場合の被災確率
TC_i^y	: ある年 y における世帯 i の住民が負担する期待総費用 (避難に要する心理的費用+人的被害額)

(3) 定式化

以下では、ランダム効用理論に基づいた定式化を行うが、その誤差項にはiidガンベル分布を適用する(ロジット型選択モデル)。被災確率が p_y のときに世帯 i の住民が避難する確率は式(1)で与えられる。

$$P_e^i(p_y) = \frac{\exp(c_i)}{\exp(-f \cdot p_y) + \exp(c_i)} \quad \forall i \in I \quad \dots\dots\dots (1)$$

where

$$c_i = \ln \left(\sum_j \exp(u_j^i) \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)は、被災確率が高いほど、さらに近い避難所が多いほど、避難する確率が高くなることを示している。ここで式(2)は、2. (1)の3番目の仮定に示したように、世帯 i が避難する場合の心理的期待最小費用であると解釈できる。さらに、避難しない場合の期待被害額 $(-f \cdot p_y)$ と c_i の関係から避難確率が推定されることから、関係するパラメータによって、両者の単位は一致する。したがって、 c_i は金銭的価値(費用)を示している。 c_i を構成する u_j^i は、世帯 i からみた避難所 j の貨幣価値化された効用であり、次に示すように求められる。

世帯 i の住民が避難する場合、避難所 j を選択する確率は式(3)で与えられる。

$$P_{j|e}^i = \frac{\exp(u_j^i)}{\sum_{j'} \exp(u_{j'}^i)} \quad \forall i \in I \quad \dots\dots\dots (3)$$

where

$$u_j^i = \beta_1 \cdot r_{ij} + \beta_2 \cdot a_j(d_j, h_j) + s \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\beta_1 (< 0), \beta_2 (> 0)$: パラメータ

式(2)の $\beta_1 \cdot r_{ij}$ は世帯 i から避難所 j までの移動に要する心理的費用、 $\beta_2 \cdot a_j(d_j, h_j)$ は避難所の安全性を貨幣価値化した値、 $s < 0$ は避難自体に起因する心理的費用を示している。式(3)は、2. (1)の4番目の仮定に示したように、世帯からの経路距離が短い避難所ほど、また安全性指標の高い避難所ほど、選択確率が高くなることを示している(図-1)。

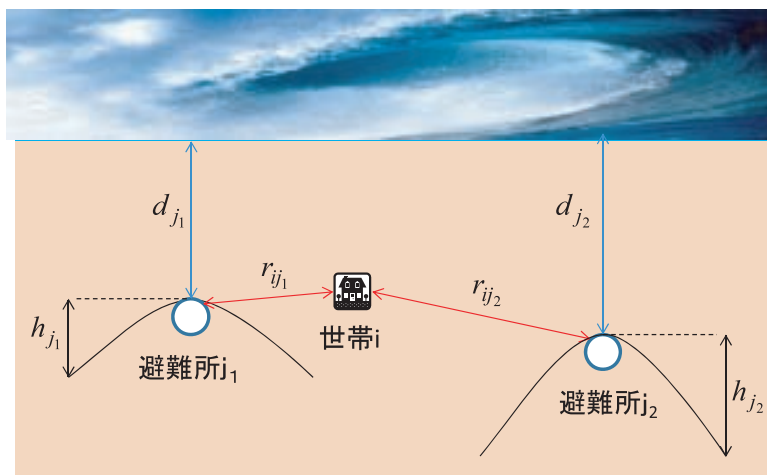


図-1 定式化における地理的条件

世帯*i*の住民が避難所*j*を選択した場合の被災確率を式(5)で与える.

$$P_{f|j,e}^i(p_y) = \frac{1}{1 + \exp(\beta_3 \cdot (1 - p_y) \cdot a_j(d_j, h_j))} \dots\dots\dots (5)$$

$\beta_3 (> 0)$: パラメータ

式(5)は、2. (1)の5番目の仮定に示したように、避難所の安全性指標が高いほど、人的被害を受ける確率が小さくなることを示している一方で、避難しない場合の被災確率が高くなるほど、すなわち、災害規模が大きいくほど、人的被害を受ける確率が大きくなることも示している。

以上の定式化をもとに、被災確率が p_y のときに世帯*i*の住民が負担する期待総費用は式(6)で与えられる。

$$TC_i^y = P_s^i(p_y) \cdot f \cdot p_y + P_e^i(p_y) \cdot \sum_j P_{j|e}^i \cdot (P_{f|j,e}^i(p_y) \cdot f + c_i) \dots\dots\dots (6)$$

Y 年間で世帯*i*の住民が負担する期待総費用 (TC_i) は式(7)で与えられる。

$$TC_i = \sum_{y=1}^Y TC_i^y \dots\dots\dots (7)$$

したがって、全世界帯での総期待費用 (TC) は式(8)で与えられる。

$$TC = \sum_{i \in I} TC_i \dots\dots\dots (8)$$

以上の定式化を適用すれば、全世界帯での総期待費用 (TC) を最小化するような避難所の組合せ、すなわち、避難所の最適配置計画を考えることができる。

3. 予想される結果とまとめ

本研究で示したモデルを実問題に適用した場合、以下に示す対象地域に固有な問題点が明らかになると考えられる。

- ・安全性の低い避難所を多く設定してもあまり意味がない。
- ・避難所は、世帯から近いところに設定しなければ、住民は避難しない。
- ・十分な一時避難所が確保されていない地域が存在する。

第一の点は、たとえば津波を想定した場合、海から近い避難所や標高の低い避難所を多く設定したとしても、災害規模が大きい場合、避難所として機能しない可能性があることである。すなわち、そうした避難所に避難しても人的被害を受ける可能性があることを示している。

第二の点は、避難所までの距離が避難行動の妨げとなり得ることである。一般的に言えることではあるが、避難所への距離が近い程、避難行動は誘発されるものと考えられるため、世帯の居住地区に対応した配置計画を行うことが肝要であると考えられる。

第三の点は、災害規模が大きい場合、どこに避難したとしても人的被害が発生する可能性のある地域が存在することである。特に山間部の河川流域に居住人口を抱えるような地域では、こうした問題が顕在化する可能性がある。

上記の問題点が顕在化した場合には、避難所の見直し等、何らかの対策が講じられなければならないが、こうした問題点の発掘に本研究で示した一時避難所最適配置問題は寄与するものと考えられる。今後は、実問題に適用した分析を行う所存である。

<付録>

以下では仮想データを用いたシミュレーション結果を示す。ここでは、災害として地震による津波を想定した。 $k(k=1, \dots, K=100)$ 年に一度の確率で起こる地震を k 年確率地震と呼ぶが、 k 年確率以上の地震が発生する確率 $p_{>k}$ を以下で与えた。

$$p_{>k} = \frac{1}{k}$$

その場合、 k 年確率地震が発生する確率 p_k は以下で与えられる。

$$p_k = p_{>k} - p_{>k+1} = \frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} = \frac{1}{k \cdot (k+1)}$$

k 年確率地震が発生したときに避難しない場合の被災確率 $p_{c|k}$ を以下で与えた。

$$p_{c|k} = k$$

上記の確率は、 $K(=100)$ 年確率地震が発生したときに避難しない場合、100%の確率で被災することを意味している。一般性を失うことなく、 K を任意の値に設定し（たとえば、1000）、 $p_{c|k}$ に適当な変換を施せば、たとえば、1000年確率地震を対象としたシミュレーションも可能となることに注意されたい。地震は1年に1回発生し、さらに発生する地震規模は上記の確率で決まることを仮定すると、一様分布Uni(0,1)からのランダムサンプリングからある年の被災確率 p_i を決定できる。避難所の安全性指標は、以下で与えた。

$$a_j(d_j, h_j) = d_j + h_j$$

計算に必要なパラメータは、表-1に示す通りである。

表-1 パラメータ値

f	β_1	β_2	β_3	s
20	-1	0.5	0.5	-5

シミュレーションは、図-2に示すように2つの避難所と1つの世帯を仮定して行った。各施設の位置と標高は、x-y-z座標により表現されている。発災地点から世帯までの距離、世帯から避難所までの距離および避難所の標高は、すべてx-y-z座標から計算される。

図-3は、100年間に渡る世帯の総期待費用を示したものである。世帯は1つしか存在しないが、図-3では1つの世帯に対して、1000回のシミュレーションを行った結果を表わしている。図-4は、避難所 j_2 の座標を(4, 2, 5)と変更した場合の世帯の総期待費用を示している。図-3と図-4における避難所 j_2 のシミュレーション上の違いは、標高のみが1から5へ変化している点であることに注意が必要である（世帯から避難所までの距離は変化しない）。

図-3と図-4を比較することにより、安全性の低い避難所を設定した場合、総期待費用が増大することがわかる。これらのシミュレーションが意味するところは、1つの世帯に複数の避難所から2つの避難所を設定する問題を考えた場合、その選択結果が人的被害に影響するため、選択には慎重になるべきということである。3.11大震災から我々が学んだ教訓は、複数の一時避難所を設定することの重要性、すなわち、より安全な避難所への避難が重要となることである。しかしながら、ある世帯を対象とした場合、設定できる避難所はせいぜい2か所程度であると考えられ、それ以上設定できたとしても住民には選択に関する混乱が生じると考えられる。ここで示した1世帯・2避難所によるシミュレーション結果であっても、現実問題に与えるインプリケーションは少なくはないことがわかる。

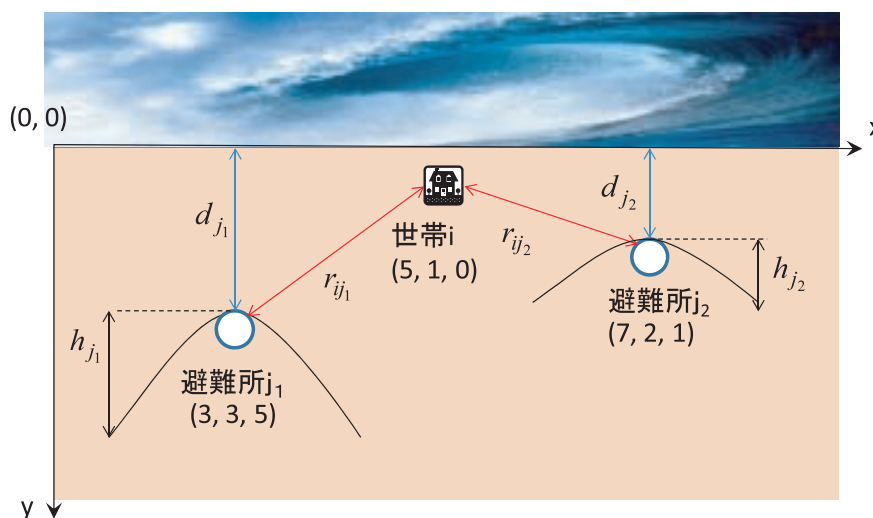


図-2 海岸線と世帯と避難所の位置関係

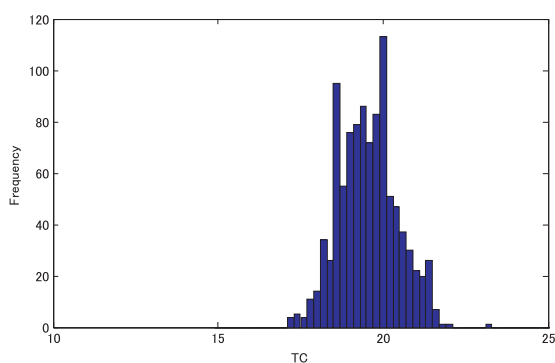


図-3 世帯の総期待費用（ケース1）

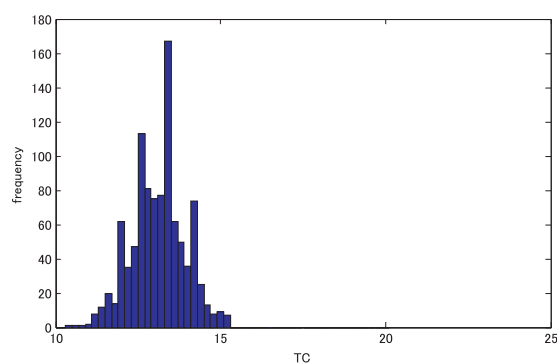


図-4 世帯の総期待費用（ケース2）