

水災害時の X バンドレーダ情報を考慮した 一時避難所の最適割当問題に関する研究

A study on optimal allocation of temporary gathering locations to a household
considering the information about X-band radar under water disaster

北海道大学工学部
北海道大学工学院
北海道大学大学院工学研究院

○学生員
学生員
正会員

酒井陽樹 (Yoki Sakai)
中尾晴子 (Haruko Nakao)
内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

近年、局地的な集中豪雨や台風等による豪雨が各地で多発しており、それらによって引き起こされる、洪水や氾濫・土砂災害による被害も拡大している。2014 年 8 月には広島県で集中豪雨が発生し、避難者数 566 世帯、1238 人、広島市安佐北区と安佐南区では多数の土砂災害が発生し、74 名もの死者をだすなど甚大な被害をもたらした¹⁾。

このような豪雨による被害を減らすために、本研究では、水災害時の気象状況を考慮した一時避難所の最適配置問題を考える。災害時に適切な一時避難所の選択を行うことができれば、災害発生時の被害を最小限に抑えることが可能である。また、水害時においては、気象状況の変化が被害状況に大きく影響を与える。本研究で考える一時避難所最適配置問題では、住民が避難するかどうか、避難する場合どの避難所を選択するかを内生化した上で、住民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。また、ベイズ統計を用いることにより、時々刻々と変化する気象情報の更新を行う。気象情報更新前と後での最適配置の比較を行うとともに、X バンドレーダと C バンドレーダにより得られた情報での最適配置問題の比較検討を行うことを念頭に置いたモデル構築を行う。

本研究の構成は以下の通りである。第 2 章では、X バンドレーダについて、C バンドレーダと比較しながら簡単な説明を行う。第 3 章では既存研究のレビューを行い、本研究の位置づけを明らかにする。第 4 章では、住民の避難に関する行動選択に基づいた期待費用の定式化を行う。第 5 章では、ベイズ統計を用いた発生確率の更新の定式化を行い、第 6 章では前章までに定式化した式を用いて、住民の避難先である一時避難所の最適配置問題の定式化を行う。第 7 章では、簡単な数値を用いたベイズ統計の計算例を示している。

2. X バンドレーダについて

2.1 X バンドレーダの特徴

X バンドレーダとは、電波により雨の強さ・雨の範囲を計測するものであり、近年 C バンドレーダの代替と

して整備されつつある。C バンドレーダに比べ、短い時間間隔できめ細かく、発達する雨雲を捉えることができ、集中豪雨・局所的大雨に対しての防災や避難所の指示に役立つと考えられている。現在、政令指定都市を中心に設置されており、さらに範囲を広げている。以下に X バンドレーダの利点を列挙する。

- ① 雨量計による補正が必要ない
- ② 誤差要因が少なく、高精度な観測が可能
- ③ 時間的・空間的なピークをリアルタイムにとらえることが可能
- ④ 設置コストが安価
- ⑤ レーダを小型化することが可能
- ⑥ 複数のレーダの設置が可能

上記のような利点を持っている一方、①非常に強い雨が降っていると、その後方のエリアが観測できない、②観測範囲が限られているなどの問題点が挙げられる。

2.2 C バンドレーダと X バンドレーダの比較

C バンドレーダは、現在までに全国 26 箇所に設置され、防災情報や河川管理などに役立てられている。しかし、同じ強さの雨でも粒径分布が異なると大きな変化が生じてしまうといった問題点が挙げられる。C バンドレーダと X バンドレーダを以下で比較する。

表-1 C バンドレーダと X バンドレーダの比較表^{2) 3)}

レーダ種類	C バンドレーダー (従来)	X バンドレーダー
観測目的	降雨の実況監視 (広域)	降雨の実況監視 (狭域・詳細) 雨域の発達、移動過程の観測
情報更新間隔	5分 (5分程度遅れる)	1分
提供するデータの分解能	1km×1kmの直行メッシュ	250m×250mの直行メッシュ
データ処理範囲	半径200～300km	半径80km
定量観測範囲	半径120km以内	半径60km以内
補正	均質化補正, メッシュ補正	(降雨ごとの補正) なし

X バンドレーダはゲリラ豪雨などの狭くて速い雨の監視に有効であり、C バンドレーダは台風などの大きくてゆっくり動く雨の監視に有効である。

3. 既存研究のレビュー

内田⁴⁾は降雨時の洪水及びを想定した一時避難所の最適配置問題の定式化を行った．ここでは，収容人員に制約のある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っている．この研究では，すべての降雨に対して同一の発生確率分布を定義している．

本研究では，上記の定式化を基礎とするが，さらに降雨時に得られる情報により発生確率の更新を行いそれぞれの降雨に対しての発生確率を更新する手法を提案する．このようにして得られる確度の高い降雨の発生確率を用いて，住民の最適な一時避難所の配置計画を行うモデルを提案する．

4. 問題の定式化

4.1 仮定

- ・ 1年間で最大の降雨量が観測される日を対象とする．
- ・ 対象地域には，複数の一時避難所が存在する．
- ・ 降雨による水災害が発生した場合，避難所および世帯の安全性はそれらの地理的条件，すなわち，立地点の標高と河川までの距離によって決定される．
- ・ 避難所候補には収容人員容量のある建物が含まれ，そうした避難所は，容量を超える人員を収容できない．
- ・ 避難所に到着しても，容量制約のため避難所に入れない住民の安全性は，避難所周辺施設の地理的条件から決定される．
- ・ 避難所に入れたとしても，その安全性が低い場合，降雨による水災害の規模によっては，被害を受ける可能性がある．
- ・ 降雨による水災害発生時に住民は，避難した場合の期待費用（避難に要する費用と期待被害額の和）と，避難しない場合の期待費用（期待被害額）を考慮し，避難するかどうかの決定を行う．
- ・ 避難すると決定した住民は，世帯から避難所までの（経路）距離と避難所に入れた場合の期待費用から避難所選択を行う．

4.2 記号

$I(I)$:	世帯の集合（数）
$J(J)$:	一時避難所の集合（数）
π_j :	避難所 $j \in J$ の収容人員数
r_{ij} :	世帯 $i \in I$ から避難所 $j \in J$ 最短経路距離
d_k :	施設 $k \in I \cup J$ から最寄り河川までの距離
h_k :	施設 $k \in I \cup J$ の標高
$\alpha_k^f(d_k, h_k)$:	$k \in I \cup J$ の安全性指標
f :	被災時の人的被害額
P_{cln}^f :	n 年確率降雨による河川洪水の発生確率
$P_{ie}(n)$:	世帯 i の住民が避難する確率
$P_{ijle}(n)$:	避難すると意思決定した世帯 i の住民が避難所 j を選択する確率

$P_{mle,j}(n)$:	避難所 $j \in J$ を選択した住民が避難所に入る確率
$P_{cln}^f(k)$:	施設 $k \in I \cup J$ にいる人の洪水の被災確率
$u_{ij}(n)$:	世帯 $i \in I$ の住民が避難して避難所 $j \in J$ に入れた場合の期待費用
$P(\bar{q}_{pr}, \sigma_{pr}^2)$:	年最大日降水量の確率分布
$C_y(n)$:	ある年 y において，世帯 i の住民が負担する期待総費用

4.3 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）．ロジット型選択モデルの分散パラメータは全て 1 であると仮定する．

河川直近の洪水被災確率が P_{cln}^f のとき，施設 $k \in I \cup J$ にいる人の洪水被災確率 $P_{cln}^f(k)$ を式(1)で与える．

$$P_{cln}^f(k) = \frac{1}{1 + \exp(\beta_1 + \beta_2 \cdot \alpha_k^f(d_k, h_k))} \cdot P_{cln}^f \quad \beta_1(<0), \beta_2(>0) \quad (1)$$

n 年降雨があったときに世帯 i の住民が避難する確率を式(2)で与える．

$$P_e(n) = \frac{\exp(c_i(n))}{\exp(-f \cdot P_{cln}^f(i)) + \exp(n)} \quad \forall i \in I \quad (2)$$

where

$$c_i(n) = \ln \left(\sum_{j \in J} \exp(u_{ij}(n)) \right) \quad (3)$$

世帯 i の住民が避難すると決定した場合，避難所 j を選択する確率を式(4)で与える．

$$P_{ijle}(n) = \frac{\exp(u_{ij}(n))}{\sum_{l \in J} \exp(u_{il}(n))} \quad \forall i \in I \quad (4)$$

where

$$u_{ij}(n) = \beta_3 \cdot r_{ij} - f \cdot P_{cln}^f(j) + s \quad (5)$$

$\beta_3 \cdot r_{ij}$ は世帯 i から避難所 j までの移動に要する心理的費用， $-f \cdot P_{cln}^f(j)$ は避難所 j に入れた場合の期待費用， s は避難自体に起因する心理的費用を示している．

一方， n 年確率降雨のときに避難所 j を選択した住民がその避難所に入れる確率 $P_{mle,j}(n)$ を式(6)で与える．

$$P_{mle,j}(n) = \min \left(\frac{\pi_j}{\sum_{k \in I} P_{kjl}(n)}, 1 \right) \quad (6)$$

以上の定式化から，ある年 y に n 年確率降雨が発生したとき，世帯 i の住民が負担する期待費用 $C_y(n)$ は式(7)で与えられる．

$$C_y(n) = (1 - P_e(n)) \cdot f \cdot P_{cln}^f(i) + P_e(n) \cdot \sum_{j \in J} P_{ijle}(n) \cdot \left(\frac{P_{mle,j}(n) \cdot P_{cln}^f(j)}{(1 - P_{mle,j}(n)) \cdot P_{cln}^f(j)} \cdot f - \beta_3 \cdot r_{ij} \right) \quad (7)$$

ここで j' は、避難所 j の周辺の施設を示しており、その被災確率は式(8)で与えることとする。

$$P_{c|n}(j') = \min(1, \beta_6 \cdot P_{c|n}^f(j)) \quad \beta_6 \geq 1 \quad (8)$$

5. 発生確率の定式化

5.1 ベイズ統計の適用

年最大日降水量 Q が正規分布 $N(\bar{q}_{pr}, \sigma_{pr}^2)$ に従うと仮定し、その確率密度関数を $g_{pr}(q)$ と表すことにする(式(9))。

$$Q \sim N(\bar{q}_{pr}, \sigma_{pr}^2) \quad (9.1)$$

$$g_{pr}(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{pr}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(q - \bar{q}_{pr})^2}{2\sigma_{pr}^2}\right) \quad (9.2)$$

なお、式(9)をベイズ統計の事前分布として扱う。

水害発生直後に得られる気象情報から得られる降雨量 Q_i ($i=1, \dots, m$) が正規分布 $N(\bar{q}_i, \sigma_i^2)$ に従っており、その尤度関数を $f(q_i)$ と表現する(式(10))。尤度関数 $f(q_i)$ の $N(\bar{q}_i, \sigma_i^2)$ は X バンドレダにより推計される。

$$Q_i \sim N(\bar{q}_i, \sigma_i^2) \quad (10.1)$$

$$f(q_i|\bar{q}_i, \sigma_i^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(q_i - \bar{q}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (10.2)$$

式(9)の事前分布と式(10)の尤度関数より、ベイズ統計を適用すると Q は正規分布 $N(\bar{q}_{po}, \sigma_{po}^2)$ に従い、その確率密度関数 $g_{po}(q)$ で表されることになる⁵⁾ (式(11))。

$$Q \sim N(\bar{q}_{po}, \sigma_{po}^2) \quad (11.1)$$

$$\begin{aligned} g_{po}(q) &= \frac{g_{pr}(q) \cdot f(q)}{\int g_{pr}(q) \cdot f(q) dq} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{po}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(q - \bar{q}_{po})^2}{2\sigma_{po}^2}\right) \end{aligned} \quad (11.2)$$

where

$$\bar{q}_{po} = \frac{\sum q_i}{m} + \frac{\bar{q}_{pr}}{\sigma_i^2 + \sigma_{pr}^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{po}^2 = \frac{1}{\frac{m}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}} \quad (13)$$

以上で、水災害発生直後に得られる気象情報を活用することによって、年最大日降水量 Q の事後確率を求めることができる。

5.2 総期待費用の定式化

ここでは、被災確率の定式化を行う。 $n(n=1, \dots, N)$ 年に一度の確率で起こる降雨を n 年確率降雨と呼ぶ。式

(11)で得られた事後分布より、ある年に n 年確率降雨が発生する確率 P_n が与えられる。

n 年確率降雨と降雨量の関係を式(14)で与えられる。

$$n_q = \frac{1}{\text{Pr}(Q > q)} \quad (14)$$

式(14)と式(11)の事後分布により、ある年に n 年降雨が発生する確率 P_n は式(15)で与えられる。

$$P_n = \frac{1}{n_q^2} \cdot \left(\frac{dn_q}{dq} \right) \quad (15)$$

where

$$n_q = \left(1 - \int_{-\infty}^q \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{po}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(q - \bar{q}_{po})^2}{2\sigma_{po}^2}\right) dq \right)^{-1} \quad (16)$$

ある年に n 年確率降雨が発生したとき、河川付近にいる人が被災する確率 $P_{c|n}$ を式(17)で与える。

$$P_{c|n} = \frac{1}{1 + \exp(\beta_4 \cdot n + \beta_5)} \quad \beta_4 (< 0), \beta_5 (> 0) \quad (17)$$

以上の関係より、ある年 y の世帯 i の住民が負担する期待費用 C_{iy} は、式(18)で与えられる。

$$C_{iy} = \int_0^\infty P_n \cdot C_{iy}(n) dn \quad (18)$$

Y 年間で世帯 i の住民が負担する期待総費用(C_i)は式(19)で与えられる。

$$C_i = \sum_{y=1}^Y C_{iy} \quad (19)$$

したがって、 Y 年間での対象地域全世帯での総期待費用 C は式(20)で与えられる。

$$C = \sum_{i \in I} C_i = \sum_{i \in I} \sum_{y=1}^Y C_{iy} = \sum_{i \in I} \sum_{y=1}^Y \int_0^\infty P_n \cdot C_{iy}(n) dn \quad (20)$$

以上の定式化より、全世帯での期待費用(C)を最小化するような避難所の組み合わせ、すなわち、避難所の最適配置計画を考えることができる。

6. 最適避難所割り当てモデル

世帯 i に避難所 j を割り当てるかを表現する変数 x_{ij} を導入する。 x_{ij} は、任意の実数をとるものとし、 x_{ij} の関数 $y_{ij}(x_{ij})$ を式(21)で与える。

$$y_{ij}(x_{ij}) = 1 + \exp(\beta_7 \cdot x_{ij}) \quad (21)$$

ここで、 β_7 は正に十分に大きな実数であると仮定し、式(21)に示した関数は、式(22)に示す関数を満たすものとする

$$y_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij} < 0 \\ 2 & \text{if } x_{ij} = 0 \\ \infty & \text{if } x_{ij} > 0 \end{cases} \quad (22)$$

$y_{ij}(x_{ij})$ を用いて式(1)の係数 β_1 を変換した係数を $\hat{\beta}_1(x_{ij})$ と表し、式(23)で定義される。

$$\hat{\beta}_1(x_{ij}) = \beta_1 \cdot y_{ij}(x_{ij}) \quad (23)$$

$\hat{\beta}_1(x_{ij})$ と $y_{ij}(x_{ij})$ を用いて計算される避難所 j の修正被災確率 $\hat{P}_{c|n}^f(j)$ を式(24)で定義する。

$$\hat{P}_{c|n}^f(j) = \min \left(1, \frac{y_{ij}(x_{ij})}{1 + \exp(\hat{\beta}_1^{(m)}(x_{ij}) + \beta_2 \cdot a_i(d_j, h_j))} \right) \cdot P_{c|n} \quad (24)$$

避難所 j の修正被災確率 $\hat{P}_{c|n}^f(j)$ を式(25)で与える。

$$\hat{P}_{c|n}(j) = \hat{P}_{c|n}^f(j) \quad (25)$$

$x_{ij} < 0$ となる避難所 j は世帯 i の選択肢の一つになり、 $x_{ij} \geq 0$ となる避難所 j は選択肢には入らないことを表現している。

以上の定義を用いて計算される Y 年間の全世帯での修正総期待費用を $\hat{C}(\mathbf{x})$ と表現する。式(26)で示すように、その値が最小となる最適避難所の割り当てを行う。

$$\min \hat{C}(\mathbf{x}) \quad (26)$$

$$\text{w.r.t } \mathbf{x} = \{x_{ij} \mid \forall i \in I, \forall j \in J\} \quad (27)$$

上記は目的関数、すなわち Y 年間の全世帯での修正総期待費用 $\hat{C}(\mathbf{x})$ を最小化する $\mathbf{x}$ を求める問題となっており、 x_{ij} に関して何の制約も課されていないことに注意が必要である。また、 $x_{ij} = 0$ が解となる場合、特定の世帯がある避難所を選択する確率を下げることを意味し、現実的な避難所集合が得られない可能性はあるようにも感じられるが、 $x_{ij} = 0$ が解となることはない(証明略)。

7. 事後確率の計算例

ここでは、簡単な数値を用いたベイズ統計の計算例を示す。事前分布と尤度の設定を行い、事後分布の導出を行う。なお、数値は以下のように設定する。

事前分布 $N(160, 900)$

尤度関数 $N(100, 400)$ 標本数 $m = 7$

これを以下の式に代入すると事後分布が得られる。

$$\bar{q}_{po} = \frac{\sum q_i + \bar{q}_{pr}}{\frac{\sigma_i^2}{m} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}}, \quad \sigma_{po}^2 = \frac{1}{\frac{m}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}}$$

事後分布 $N(1036, 53.7)$

図1から、気象情報を用いることによって、事後分布では分散が減少し、不確実性が減少していることがわかる。この不確実性の減少は、避難行動支援、たとえば災害情報提供などにおいて、重要な意味を持つと考えられ

る。すなわち、確度の高い情報提供が可能になると考えられ、確度の低い災害情報を提供し続けることによる情報の軽視化などに起因する被害の拡大が防げるものと考えられる。

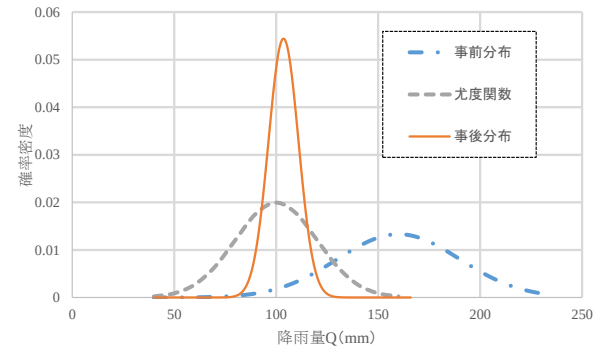


図-1 降雨量の事前・事後確率

8. まとめ

本研究では、災害時における住民の避難行動選択モデルを構築した。住民の選択行動は、災害時に避難するかどうか、避難する場合、どの避難所を選択するかの2段階から構成される。さらに、住民がとり得る行動から総期待費用を計算し、その最小化を目的関数とする、世帯への最適避難所割当問題の定式化を行なった。

Xバンドレーダなど精度の高い気象情報の獲得が可能となった。本研究ではその情報を活用し、ベイズ統計に基づく年最大日降水量の確率分布を解析的に求める手法を開発した。今後は、実問題への適用を通して、モデルの検証を行う所存である。

9. 参考文献

- 1) 消防庁災害対策本部：「8月19日からの大雨などによる広島県における被害状況及び消防の活動について」 総務省消防庁 HP 災害情報、(2014年12月現在)
- 2) 国土交通省：「XバンドMPレーダについて」 国土交通省 HP、(2014年12月現在) (<http://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/gijutsukaihatsu/xband/sankou.pdf>)
- 3) 栗城稔：XバンドMPレーダの活用について、財団法人 河川情報センター河川情報研究所
- 4) 内田賢悦：津波発生時の一時避難所の最適配置問題に関する研究、北海道河川財団
- 5) Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang 他：「土木・建築のための確率・統計の基礎」丸善出版 (P448-449)