

水災害時の X バンドレーダ情報による河川水位予測に基づいた

避難行動モデルに関する研究

A study on evacuation behavior model based on river water level prediction
considering update of the information about X-band radar under water disaster

北海道大学工学部 ○学生員 高田悠平 (Yuhei Takada)
北海道大学大学院工学研究院 学生員 加藤哲平 (Teppei Kato)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

近年、日本各地で集中豪雨や台風等多発しており、それに伴い洪水等の被害が拡大している。2014 年 9 月には札幌において、集中豪雨が発生しており、いくつかの河川で水位が氾濫注意水位を超えた。また 2015 年 9 月には北関東の鬼怒川において豪雨による氾濫が起き、990 世帯、2,775 人に避難勧告が出され、2 名の死者を出すなど、甚大な被害をもたらした¹⁾。

豪雨による洪水・土砂災害が発生した場合、一時避難所は安全性において重要な役割を担っているが、水害の規模によっては避難を終えてもその一時避難所自体が被災する可能性もある。そのため、災害発生時に住民は最適な避難所を選択する必要がある。

そこで本研究では、水災害時の気象状況を考慮した避難行動モデルの定式化を行う。水災害時の時々刻々と変化する気象状況はベイズ統計を用いて更新を行う。気象状況の更新においては、X バンドレーダによる降雨情報を活用する。さらに、ベイズ統計における尤度関数の算定にベクトル自己回帰 (VAR) モデルを適用することにより、豪雨時に得られる降雨の情報を考慮した河川水位分布を推計する。そして情報更新の有無における、避難所の最適配置を検討し、それらの期待被害額の比較を行う。

2. X バンドレーダ

X バンドレーダとは、電波を発することにより降雨の強さや範囲を観測するものであり、従来から使用されてきた C バンドレーダよりも解像度が高く、観測から情報配信までの時間が短い、観測範囲は狭い。そのため、C バンドレーダが台風など広域的な降雨の監視に適しているのに対し、X バンドレーダは局所的に急激に発生・発達する降雨の観測に適している。ただし X バンドレーダは、強い降雨を観測した場合に、その後方エリアを観測できなくなるという問題点もある。

3. 既存研究

水災害を想定した一時避難所に関する研究として内田²⁾、酒井³⁾が挙げられる。内田²⁾は、水災害時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。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。酒井³⁾は、降雨時に得られる情報によって降雨量分布を更新する手法を内田²⁾の最適配置問題に適用した。降雨時に逐次的に得られる降雨量を用いて以降の降雨量推計を行うことで、確度の高い降雨量分布を推計することが出来る。しかし、水災害時の住民の避難行動には、降雨量の情報よりも居住地域の河川水位の情報が有用であると考えられる。本研究では、降雨時に得られる情報により、河川水位の発生確率を更新し、得られた河川水位分布を用いて、一時避難所の最適配置問題の定式化を行う。

4. 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
$a_k(d_k, h_k)$:	$k \in I \cup J$ の安全性指標
f :	被災時の人的被害額
P_{clw} :	水災害時における河川洪水被災確率
$P_{ie}(w)$:	世帯 i の住民が避難する確率
$P_{ij e}(w)$:	避難すると思慮決定した世帯 i の住民が避難所 j を選択する確率
$P_{i w e,j}(w)$:	避難所 $j \in J$ を選択した住民が避難所に入る確率
$P_{clw}(k)$:	施設 $k \in I \cup J$ にいる人の洪水の被災確率
u_{ij} :	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
X_{t1} :	時刻 t における河川水位分布
X_{t2} :	時刻 t における X バンドレーダの降雨量分布
X_{t3} :	時刻 t における C バンドレーダの降雨量分布
X_{t4} :	時刻 t における地上雨量計の降雨量分布
C_i :	水災害リスク下において、世帯 i の住民が負担する期待費用

5. 水災害時の住民の避難行動モデル

5.1 仮定

住民の避難行動の定式化に際して、以下に示す仮定を設けた。

- ・ 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。

5.2 避難行動モデル

以下ではランダム効用理論に基づいた定式化を行う。誤差項には iid ガンベル分布を適用するため、ロジット型選択モデルが導出される。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。

河川の水位が w に達したとき、その河川直近の洪水被災確率 P_{clw} を式(*)で与える。

$$P_{clw} = \frac{1}{1 + \exp(\beta_4 \cdot w + \beta_5)} \quad \beta_4(<0), \beta_5(>0) \quad (*)$$

このとき、施設 $k \in I \cup J$ にいる人の洪水被災確率 $P_{clw}(k)$ を式(1)で与える。

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

ここで β_1, β_2 はパラメータである。水災害時において河川水位が w に達した場合、世帯 i の住民が避難する確率を式(2)で表される。

$$P_{ile}(w) = \frac{\exp(c_i(w))}{\exp(-f \cdot P_{clw}(i)) + \exp(w)} \quad \forall i \in I \quad (2)$$

where

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

世帯 i の住民が避難すると決定した場合、避難所 j を選

択する確率は式(4)で表される。

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

where

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

ここで、 $\beta_3 \cdot r_{ij}$ は避難所 j までの移動に対する心理的限界費用を表し、 s は避難自体に起因する心理的費用を示している。式(5)の右辺第 1 項は、世帯 i から避難所 j までの移動に対する心理的費用、第 2 項は避難所 j に入った場合の期待費用を表す。

一方、水災害時において避難所 j を選択した住民がその避難所に入れる確率 $P_{iwe,j}(w)$ を式(6)で定義する。

$$P_{iwe,j}(w) = \min \left(\frac{\pi_j}{\sum_{k \in I} P_{kile}} \cdot 1 \right) \quad (6)$$

以上の定式化から、水災害リスク下では、世帯 i の住民が負担する期待費用 C_i は式(7)で表される。

$$C_i(w) = (1 - P_{ile}(w)) \cdot f \cdot P_{clw}(i) + P_{ile}(w) \cdot \sum_{j \in J} P_{ijle}(w) \cdot \left(\frac{P_{iwe,j}(w) \cdot P_{clw}(j)}{(1 - P_{iwe,j}(w)) \cdot P_{clw}(j')} \cdot f - \beta_3 \cdot r_{ij} \right) \quad (7)$$

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)で定義する。

$$P_{clw}(j') = \min(1 - \beta_6 \cdot P_{clw}(j)) \quad \beta_6 \geq 1 \quad (8)$$

6. 河川水位分布の定式化

6.1 ベクトル自己回帰 (VAR) モデル⁴⁾

ベイズ統計を適用することにより、降雨情報による河川水位分布を更新する。ある時刻における X バンドレーダ情報を考慮した河川水位分布を尤度とし、その時刻における X バンドレーダ情報を考慮しない河川水位分布を事前確率として、事後確率を推計する。その際、尤度の算定方法として、ベクトル自己回帰 (VAR) モデルを用いる。VAR モデルとは、推計される変数自身と他の変数の一定期間前までの過去の値によって確率分布の推計を行うモデルである。このモデルを適用するより、複数の降雨量と河川の水位の時系列データ同士の相互の影響を考慮し、各時系列データの将来の予測を行う。また、降雨量と河川の水位の相互の影響を考慮することにより、降雨量と河川の水位のデータ間の時間的なずれも考慮が可能である。

時刻 $t-1$ 以前の河川水位データ、降雨量データが判明しているものとする。時刻 t における河川の水位 (X_{t1})、降雨量 (地上雨量計 (X_{t2}), X バンドレーダ (X_{t3}), C バンドレーダ (X_{t4})) を時刻 $t-1$ までに得られている過去のデータ (期間 n) を用いて、次のように与える。

$$X_{tl} = x_{tl} + \varepsilon_{tl} \quad (l=1, \dots, 4) \quad (9)$$

where

$$x_{tl} = c_l + \sum_{m=1}^n (\phi_{l1}^m x_{t-m,1} + \phi_{l2}^m x_{t-m,2} + \phi_{l3}^m x_{t-m,3} + \phi_{l4}^m x_{t-m,4}) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{tl} \sim N(0, \sigma_{tl}^2) \quad (11)$$

ここで、 c_l は定数項、 $\phi_{l1}^m, \phi_{l2}^m, \phi_{l3}^m, \phi_{l4}^m$ は係数、 $x_{t-m,1}, x_{t-m,2}, x_{t-m,3}, x_{t-m,4}$ はそれぞれ時刻 $t-1$ 以前の河川水位データ、降雨量データ（地上雨量計、X バンドレーダ、C バンドレーダ）、 ε_{tl} は誤差項を表す。式(9)はベクトルを用いて、式(12)で表現できる。

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{x}_t + \boldsymbol{\varepsilon}_t \quad (12)$$

where

$$\boldsymbol{\varepsilon}_t \sim MVN(\mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma}_t), \mathbf{X}_t = (X_{t1} \ X_{t2} \ X_{t3} \ X_{t4})^T,$$

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{c} + \sum_{m=1}^n \boldsymbol{\phi}^m \mathbf{x}_{t-m}, \quad \mathbf{c} = (c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4)^T,$$

$$\mathbf{x}_{t-m} = (x_{t-m,1} \ x_{t-m,2} \ x_{t-m,3} \ x_{t-m,4})^T,$$

$$\boldsymbol{\phi}^m = \begin{pmatrix} \phi_{11}^m & \phi_{12}^m & \phi_{13}^m & \phi_{14}^m \\ & \phi_{22}^m & \phi_{23}^m & \phi_{24}^m \\ & & \phi_{33}^m & \phi_{34}^m \\ & & & \phi_{44}^m \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_t = \begin{pmatrix} \sigma_{t1}^2 & \sigma_{t1,t2} & \sigma_{t1,t3} & \sigma_{t1,t4} \\ & \sigma_{t2}^2 & \sigma_{t2,t3} & \sigma_{t2,t4} \\ & & \sigma_{t3}^2 & \sigma_{t3,t4} \\ & & & \sigma_{t4}^2 \end{pmatrix}$$

VAR モデルは、各回帰式の目的変数に他の回帰式の目的変数が含まれないため、同時方程式モデルではない。また、全ての回帰式が同一の説明変数を持つため、(9)の方程式ごとに OLS（最小二乗法）を適用し、パラメータを推計できるという特徴がある。

時刻 $t-1$ までのデータから河川の水位を表す式のパラメータを OLS により推計すると次のように表せる。

$$\hat{X}_{t1} = \hat{c}_1 + \varepsilon_{t1} \quad (13)$$

where

$$\hat{X}_{t1} = \hat{c}_1 + \sum_{m=1}^n (\hat{\phi}_{11}^m x_{t-m,1} + \hat{\phi}_{12}^m x_{t-m,2} + \hat{\phi}_{13}^m x_{t-m,3} + \hat{\phi}_{14}^m x_{t-m,4}) \quad (14)$$

ここで、 $\hat{\cdot}$ は OLS によって推計された値であることを意味する。時刻 $t-1$ までのデータから推計されるパラメータベクトルを $\hat{\boldsymbol{\phi}}^{m1} = (\hat{\phi}_{11}^m \ \hat{\phi}_{12}^m \ \hat{\phi}_{13}^m \ \hat{\phi}_{14}^m)^T$ と定義すると、これを用いて時刻 t から h 期先の河川水位分布を予測可能である。この予測値を尤度として用いることにする。予測手法としてデルタ法⁵⁾を用いる。時刻 t における推計結果を用いると、時刻 $t+1$ の河川水位分布を推計できるように、得られた推計結果を 1 期先の推計に用いることを繰り返すことより、 h 期先の予測値を各時点の予測値を用いて次のように表すことができる。

$$\hat{X}_{t+h,1|t} = \hat{c}_1 + \sum_{m=1}^h (\hat{\boldsymbol{\phi}}^{m1})^T \hat{\mathbf{X}}_{t+h-m} + \sum_{m=h+1}^n (\hat{\boldsymbol{\phi}}^{m1})^T \mathbf{x}_{t+h-m} + \varepsilon_{t1} \quad (15)$$

また $\hat{X}_{t+h,1|t}$ の平均 $\hat{x}_{t+h,1|t}$ 分散 $\sigma_{t+h,1|t}^2$ は、それぞれ式(16)、式(17)で与えられる。

$$\hat{x}_{t+h,1|t} = \hat{c}_1 + \sum_{m=1}^h (\hat{\boldsymbol{\phi}}^{m1})^T \hat{\mathbf{X}}_{t+h-m} + \sum_{m=h+1}^n (\hat{\boldsymbol{\phi}}^{m1})^T \mathbf{x}_{t+h-m} \quad (16)$$

$$\sigma_{t+h,1|t}^2 = \sigma_{t1}^2 + \sum_{m=1}^h (\hat{\boldsymbol{\phi}}^{m1})^T \boldsymbol{\Sigma}_{t+h-m} \hat{\boldsymbol{\phi}}^{m1} \quad (17)$$

式(16),(17)より、現在の時刻 t の h 期先の河川の水位の分布 $\hat{X}_{t+h,1|t}$ は、正規分布 $N(\hat{x}_{t+h,1|t}, \sigma_{t+h,1|t}^2)$ に従う。以下では、式が煩雑になるのを避けるため、河川の水位のみに着目して、観測情報を活用して推計される h 期先の河川の水位を以下に示す正規分布で表すことにする。

$$W_h^l \sim N(w_h^l, \sigma_l^2)$$

where

$$w_h^l = \hat{x}_{t+h,1|t}, \quad \sigma_l^2 = \sigma_{t+h,1|t}^2$$

6.2 ベイズ統計の適用

水災害時の X バンドレーダ情報を考慮しない場合、 h 期先の河川水位分布 W_h^{pr} が正規分布 $N(w_h^{pr}, \sigma_{pr}^2)$ に従うと仮定すると、その確率密度関数 $f_{pr}(w)$ は式(18)で表される。

$$f_{pr}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{pr}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(w - w_h^{pr})^2}{2\sigma_{pr}^2}\right) \quad (18)$$

前節より、X バンドレーダ情報を考慮した h 期先の河川水位分布 $W_h^l \sim N(w_h^l, \sigma_l^2)$ となり、河川水位の尤度関数 $f_l(w)$ は式(19)で表される。

$$f_l(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_l^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(w - w_h^l)^2}{2\sigma_l^2}\right) \quad (19)$$

上記の式(18)を事前分布、(19)を尤度として、ベイズ統計を適用すると、 h 期先の河川水位の事後分布 W は正規分布 $N(w_h^{po}, \sigma_{po}^2)$ と推計され、その確率密度関数は式(20)で表される。

$$f_{po}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{po}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(w - w_h^{po})^2}{2\sigma_{po}^2}\right) \quad (20)$$

where

$$w_h^{po} = \frac{\frac{w_h^l}{\sigma_l^2} + \frac{w_h^{pr}}{\sigma_{pr}^2}}{\frac{1}{\sigma_l^2} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}} \quad (21)$$

$$\sigma_{po}^2 = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_l^2} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}} \quad (22)$$

以上のようにして、水災害時のXバンドレーダの情報を考慮した河川水位の事後分布を推計することが出来る。これまでの議論で河川の水位を w と表現していたが、それは正規分布 $W \sim N(w_h^{po}, \sigma_{po}^2)$ から生じたものと解釈できる点に注意が必要である。

7. 総期待費用の定式化

式(20)で得られた河川水位の事後分布より、河川水位が w に達する確率 P_w は次のように表される。

$$P_w = f_{po}(w) \quad (23)$$

以上の関係より、水災害リスク下において世帯 i の住民が負担する期待費用 C_i は、式(24)で与えられる。

$$C_i = \int_0^{\infty} P_w \cdot C_i(w) dw \quad (24)$$

対象地域全世帯での総期待費用 C は式(25)で与えられる。

$$C = \sum_{i \in I} \int_0^{\infty} P_w \cdot C_i(w) dw \quad (25)$$

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。

8. 最適避難所割り当てモデル²⁾

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(26)で与える。

$$y_{ij}(x_{ij}) = 1 + \exp(\beta_7 \cdot x_{ij}) \quad (26)$$

ここで、 β_7 は正に十分に大きな実数であると仮定し、式(26)に示した関数は、式(27)に示す関数を満たすものとする。

$$y_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij} < 0 \\ 2 & \text{if } x_{ij} = 0 \\ \infty & \text{if } x_{ij} > 0 \end{cases} \quad (27)$$

$y_{ij}(x_{ij})$ 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(28)で定義される。

$$\hat{\beta}_1(x_{ij}) = \beta_1 \cdot y_{ij}(x_{ij}) \quad (28)$$

$\hat{\beta}_1(x_{ij})$ 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 $\hat{P}_{clw}(j)$ を式(29)で定義する。

$$\hat{P}_{clw}(j) = \min \left(1, \frac{y_{ij}(x_{ij})}{1 + \exp(\hat{\beta}_1^{(o)}(x_{ij}) + \beta_2 \cdot a_i(d_j, h_j))} \right) \cdot P_{clw} \quad (29)$$

$x_{ij} < 0$ 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。

避難所 j の修正被災確率 $\hat{P}_{clw}(j)$ を用いて計算される全世帯での修正総期待費用を $\hat{C}(\mathbf{x})$ と表現する。式(30)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。

$$\min \hat{C}(\mathbf{x}) \quad (30)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x} = \{x_{ij} \mid \forall i \in I, \forall j \in J\} \quad (31)$$

上記は目的関数、すなわち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）。

9. まとめ

本研究では、水災害時における住民の避難行動モデルの構築を行った。水災害時における住民の選択行動は、避難するか否か、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。避難するか否かは、避難する場合と避難しない場合の期待費用を考慮して決定され、避難所の選択は、世帯から避難所までの距離と避難所に入ることが出来た場合の期待費用から決定される。この場合に住民がとり得る行動から総期待費用を計算し、その最小化を目的として、世帯への最適避難所割り当て問題の定式化を行なった。

近年整備が進んでいるXバンドレーダにより、精度の高い降雨情報が得られるようになった。本研究ではXバンドレーダから得られる情報を活用し、時々刻々と変化する気象状況の変化を考慮した河川水位分布を解析的に求める手法を開発した。今後は、実問題への適用から、モデルの検証を行う所存である。

10. 参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局：『平成27年9月関東・東北豪雨』に係る鬼怒川の洪水被害及び復旧状況等について 国土交通省 HP (2015年12月現在) (http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000633805.pdf)
- 2) 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、一般財団法人北海道河川財団
- 3) 酒井陽樹：水災害時のXバンドレーダ情報を考慮した避難行動モデルに関する研究、北海道大学卒業論文 2014
- 4) 沖本竜義：経済・ファイナンスデータの計量時系列分析 朝倉書店 p74-79
- 5) 山下智志：市場リスクの計量化とV a R 朝倉書店 p46-53