

水災害時のXバンドレーダ情報を用いた河川水位予測に関する研究

A study on water level prediction using rainfall data under water disaster

内田 賢悦¹
Kenetsu UCHIDA

¹ 北海道大学大学院 工学研究院 准教授

要 旨

本研究では、Xバンドレーダ情報を活用した河川水位の予測手法を開発する。河川水位予測は、自治体の防災担当者が避難勧告／避難指示を出すかどうかの意思決定に大きな影響を与えるものであり、本研究は、防災担当者の意思決定支援を行うものと位置付けられる。開発する手法では、ベクトル自己回帰モデルを用いて、過去の河川水位データの他に、Xバンドレーダ、Cバンドレーダと地上降雨量計のデータから河川水位分布を予測する。さらに、ここで予測される河川水位分布を尤度と捉え、ベイズ統計を活用することにより、より確度の高い水位を予測することを考える。実データを用いてベクトル自己回帰モデル数値計算を行ったところ、実用に耐えうる精度で将来の河川水位を予測できることが示された。

《キーワード：河川水位；ベクトル自己回帰モデル；Xバンドレーダ》

1. はじめに

近年、日本各地で集中豪雨や台風等が多発しており、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名の死者を出す等、甚大な被害をもたらした¹⁾。このように、水災害による被害は非常に大きく、被害軽減のための対策が求められている。

豪雨による水害が発生した場合、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。

その避難の際には、避難準備や避難所への移動等、時間を要するため、水害ハザードの予測が重要となる。水害ハザードの予測においては、Xバンドレーダによる降雨情報を活用することが有用であると考えられている。本研究では、ベクトル自己回帰（VAR）を適用し、豪雨時に得られる降雨の情報を活用した河川水位分布予測モデルを構築する。本研究で構築する水位予測モデルは、既存の避難行動モデル¹⁾²⁾への導入を念頭に構築されたものである。

研究の構成は以下の通りである。第2章においてXバンドレーダの説明を行い、第3章では河川水位分布予測手法の定式化を行う。河川水位分布の予測にはベクトル自己回帰（VAR）モデルとベイズ統計を用いる。第4章においてVARモデルに関する数値計算を行い、第5章では研究のまとめを行う。

2. Xバンドレーダ

日本では、国土交通省により全国各地にCバンドレーダが設置されている。それにより1km×1kmの直交メッシュで合成処理し全国をカバーし、情報発信を行っている。しかし近年頻発する局地的豪雨の正確な観測を行うためには、時間的にも空間的にも高分解能なデータが求められる。こうした背景から、日本においてXバンドレーダが整備されるようになった。

Xバンドレーダは、Cバンドレーダと同様に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る。このXバンドレーダの長所として、以下のものが挙げられる。

1. 時間分解能、空間分解能が高い
2. 小型化できるため都市内にも設置しやすい
3. Cバンドレーダに比べて施設整備費用が安い

このようにXバンドレーダは、従来から使用されてきたCバンドレーダよりも空間解像度が高く観測から情報配信までの時間が短いため、局所的豪雨の観測に適している。しかし、このような利点がある一方で以下に挙げるような問題点もある。

1. Cバンドレーダと比べて定量観測範囲が狭い
2. 強い降雨の発生時に、その裏側で電波が消散するエリアが生じてしまう

こうした問題点から、台風のような大規模でゆっくりと降雨の観測には、Cバンドレーダが適していると考えられている。

以下、表-1においてXバンドレーダとCバンドレーダの詳細な比較を示す。

表-1 CバンドレーダとXバンドレーダの比較⁴⁾

項目	Cバンドレーダ	Xバンドレーダ
データの処理範囲	半径200-300km	半径80km
定量観測範囲	半径120km	半径60km
空間解像度	1km×1kmの直交メッシュ	250m×250mの直交メッシュ
補正	均衡化補正, メッシュ補正	なし
情報更新間隔	5分	1分

3. 河川水位分布の定式化

(1) ベクトル自己回帰 (VAR) モデル

ここで定式化するベクトル自己回帰 (VAR) モデル³⁾は, 河川水位分布を推計・予測するものであり, ベイズ統計における尤度と位置付けられる. 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を事前分布として, 河川水位の事後分布を推計・予測する. ここでの河川水位の事前分布は, 自治体の防災担当者が経験的に知っていると考えられる分布であると考えられる. この事前分布とベクトル自己回帰モデルから予測される尤度を用いて確度の高い河川水位の事後分布を推計・予測することになる.

VARモデルとは, 予測/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ことにより, 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.

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

where

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

$$\varepsilon_{tl} \sim N(0, \sigma_{il}^2) \quad (3)$$

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 (1) はベクトルを用いて式 (4) で表現できる.

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{x}_t + \boldsymbol{\varepsilon}_t \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_t &\sim MVN(\mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma}_t) \\ \mathbf{X}_t &= (X_{t1} \quad X_{t2} \quad X_{t3} \quad X_{t4})^T \\ \mathbf{x}_t &= \mathbf{c} + \sum_{m=1}^n \boldsymbol{\phi}^m \mathbf{x}_{t-m} \\ \mathbf{c} &= (c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4)^T \\ \mathbf{x}_{t-m} &= (x_{t-m,1} \quad x_{t-m,2} \quad x_{t-m,3} \quad x_{t-m,4})^T \\ \boldsymbol{\phi}^m &= \begin{pmatrix} \phi_{11}^m & \phi_{12}^m & \phi_{13}^m & \phi_{14}^m \\ & \phi_{22}^m & \phi_{23}^m & \phi_{24}^m \\ & & \phi_{33}^m & \phi_{34}^m \\ & & & \phi_{44}^m \end{pmatrix}, \\ \boldsymbol{\Sigma}_t &= \begin{pmatrix} \sigma_{t1}^2 & \sigma_{t1,t2} & \sigma_{t1,t3} & \sigma_{t1,t4} \\ & \sigma_{t2}^2 & \sigma_{t2,t3} & \sigma_{t2,t4} \\ & & \sigma_{t3}^2 & \sigma_{t3,t4} \\ & & & \sigma_{t4}^2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

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、(1)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。

$$\hat{X}_{t1} = \hat{x}_{t1} + \varepsilon_{t1} \quad (5)$$

where

$$\hat{x}_{t1} = \hat{c}_1 + \sum_{m=1}^n \left(\hat{\phi}_{11}^m x_{t-m,1} + \hat{\phi}_{12}^m x_{t-m,2} + \hat{\phi}_{13}^m x_{t-m,3} + \hat{\phi}_{14}^m x_{t-m,4} \right) \quad (6)$$

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 $\hat{\boldsymbol{\phi}}^m = (\hat{\phi}_{11}^m \quad \hat{\phi}_{12}^m \quad \hat{\phi}_{13}^m \quad \hat{\phi}_{14}^m)^T$ 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⁹⁾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。

$$\hat{X}_{t+h,1|t} = \hat{c}_1 + \sum_{m=1}^h (\hat{\phi}^{m1})^T \hat{X}_{t+h-m} + \sum_{m=h+1}^n (\hat{\phi}^{m1})^T \mathbf{x}_{t+h-m} + \varepsilon_{t1} \quad (7)$$

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(8)、式(9)で与えられる。

$$\hat{x}_{t+h,1|t} = \hat{c}_1 + \sum_{m=1}^h (\hat{\phi}^{m1})^T \hat{X}_{t+h-m} + \sum_{m=h+1}^n (\hat{\phi}^{m1})^T \mathbf{x}_{t+h-m} \quad (8)$$

$$\sigma_{t+h,1|t}^2 = \sigma_{t1}^2 + \sum_{m=1}^h (\hat{\phi}^{m1})^T \Sigma_{t+h-m} \hat{\phi}^{m1} \quad (9)$$

式(8)(9)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

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

(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(10)で表される。

$$f_{pr}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{pr}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(w - w_h^{pr})^2}{2\sigma_{pr}^2}\right) \quad (10)$$

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(11)で表される。

$$f_l(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_l^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(w - w_h^l)^2}{2\sigma_l^2}\right) \quad (11)$$

上記の式(10)を事前分布、(11)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(12)で表される。

$$f_{po}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{po}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(w - w_h^{po})^2}{2\sigma_{po}^2}\right) \quad (12)$$

where

$$w_h^{po} = \frac{\frac{w_h^l}{\sigma_l^2} + \frac{w_h^{pr}}{\sigma_{pr}^2}}{\frac{1}{\sigma_l^2} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}} \quad (13)$$

$$\sigma_{po}^2 = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_l^2} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}} \quad (14)$$

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。

ベイズ統計適用の意義は以下に示すとおりである。事前分布とは、先述の通り、自治体の防災担当者が過去の経験と現在までの降雨状況を踏まえて予測される将来の河川水位であると考えられる。将来の河川水位は、誤差を伴って予測されるため、確率分布として表現されることになる。この事前分布は、Xバンドレーダの情報を踏まえて予測される将来の河川水位（尤度）を活用することによって、より確度の高い河川水位（事後分布）が得られることになる。こうして得られた将来の河川水位の情報が住民に与えられ、そうした情報を踏まえて住民は避難するかどうかの判断をすることになる。実際に住民に与えられる情報は、気象情報の他に避難勧告あるいは避難指示として与えられることになるが、特に防災担当者が避難勧告や避難指示を出す際の意思決定に将来の河川水位予測結果は大きな影響を与えるものと考えられる。

4. 数値計算例

(1) 解析データ

ここでは、VARモデルに実データを適用して河川水位分布の推計を行う。適用するデータは、北海道開発局よりご提供頂いた2014年9月11日の札幌で起きた豪雨時のものであり、河川水位、地上降雨量、およびX/Cバンドレーダによる上空降雨量である。午前0時から午前8時までの10分毎のデータに関して分析を行う。午前7時までのデータをVARモデルの推計に用い、午前7時10分以降のデータはVARモデルによる予測値との比較に用いる。

河川水位のデータは厚別観測所で観測されたものを用い、地上雨量計のデータも厚別観測所のものを用いる。またレーダ降雨量に関しては、設定したエリア内において各時点における最大降雨量の値を用いて分析を行う。実際に用いた各データは次に示す通りである（表-2、表-3）。

表-2 VARモデルの推計に用いたデータ

時刻	河川水位 [cm]	Xバンドレーダ [mm/h]	Cバンドレーダ [mm/h]	地上降雨 [mm/h]
0:00	48	89.6	79.9	1
0:10	30.3	135.1	124.4	1.1
0:20	56.7	134.2	112.7	1.2
0:30	66.5	138	129.9	1.4
0:40	51.7	120.9	109.1	1.6
0:50	30.8	120.7	47.2	1.7
1:00	57	120.7	47.2	2
1:10	51	116.8	107.2	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5:50	229.8	143.8	137.6	15.2
6:00	221	140.2	138	15
6:10	225.3	132.8	130.1	13.1
6:20	242.7	129.6	120.4	11.4
6:30	248	141.5	108.6	9.4
6:40	241.7	131.1	107	7.8
6:50	274.2	128.7	119.5	5.8
7:00	272	128.7	119.5	4

表-3 VARモデルの予測値との比較に用いたデータ

時刻	河川水位 [cm]
7:10	291.4
7:20	311.0
7:30	301.1
7:40	348.1
7:50	371.5
8:00	366.0

(2) VARモデルの推計

VARモデルのパラメータ推計を行う。推計を行う前に、まず情報量基準によりモデルの次数を決定する必要がある。表-2で示したデータから、6次のVARモデルが最適であることがわかった。6次のVARモデルの式に対し、最小二乗法を用いてパラメータ推計を行った結果は以下に示す通りである（表-4）。

表-4 最小二乗法により推計されたVARモデルのパラメータ

	次数	係数	t 値		次数	係数	t 値
河川水位	1	0.28	1.06	Cバンドレーダ	1	0.19	0.71
	2	0.39	1.7		2	0.35	1.32
	3	0.51	1.83		3	-0.1	-0.34
	4	0.2	0.75		4	-0.05	-0.17
	5	0.29	1		5	0.35	1.38
	6	-0.4	-1.33		6	0.35	1.5
Xバンドレーダ	1	-0.14	-0.37	地上降雨	1	7.21	0.91
	2	-0.25	-0.71		2	-5.48	-0.36
	3	0.12	0.37		3	-4.18	-0.29
	4	0.31	0.94		4	-10	-0.65
	5	-0.32	-1.098		5	18.79	1.12
	6	-0.85	-0.34		6	-11.07	-1.18

このパラメータ推計における自由度修正済みの決定係数は0.97となり、このモデルの適合度は高いと考える。

また、このモデルの河川水位、Xバンドレーダ降雨量、Cバンドレーダ降雨量、地上降雨量の4つの式はそれぞれ平均が0で、ある分散を持った正規分布に従う誤差項を持つ。その分散共分散行列は次に示した通りに得られた（式(15)）。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_t &= (\varepsilon_{t1} \quad \varepsilon_{t2} \quad \varepsilon_{t3} \quad \varepsilon_{t4})^T \\ \boldsymbol{\varepsilon}_t &\sim MVN(\mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma}_t) \end{aligned} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_t = \begin{pmatrix} 175.4 & 33.2 & -18.6 & 4.7 \\ 33.2 & 103.1 & 52.3 & 2.7 \\ -18.6 & 52.3 & 196.6 & 0.2 \\ 4.7 & 2.7 & 0.2 & 0.3 \end{pmatrix}$$

この分散共分散行列から、河川水位分布の分散は175.4cm²と得られた。

(3) VARモデルによる予測

最小二乗法により得られたモデルの推計結果から予測を行う。予測期間は実際の避難時を想定して、避難準備に30分、そして実際に避難し避難所に辿り着くまでの時間を30分と仮定して合計して1時間とした。予測は午前7時10分から午前8時まで、10分毎に6期先まで行う。予測による河川水位分布の平均と標準偏差は次に示す表の通りである（表-5）。

表-5 1時間先までの河川水位分布の平均と標準偏差

時刻	平均 [cm]	標準偏差 [cm]
7:10	303.8	13.2
7:20	299.6	14.8
7:30	308.5	18.0
7:40	332.5	22.4
7:50	346.3	24.2
8:00	377.7	29.2

そして得られた予測水位とその95%の信頼区間の上限値と下限値を用いて、実測水位との比較を行う(表-6, 図-1).

表-6 実測水位とVARモデルによる予測結果

時刻	実測水位	予測水位	上限値	下限値
7:10	279.9	303.8	329.7	277.8
7:20	307.0	299.6	328.7	270.5
7:30	337.4	308.5	343.8	273.2
7:40	341.8	332.5	376.5	288.5
7:50	353.7	346.3	393.8	298.8
8:00	366.0	377.7	434.9	320.5

単位 [cm]

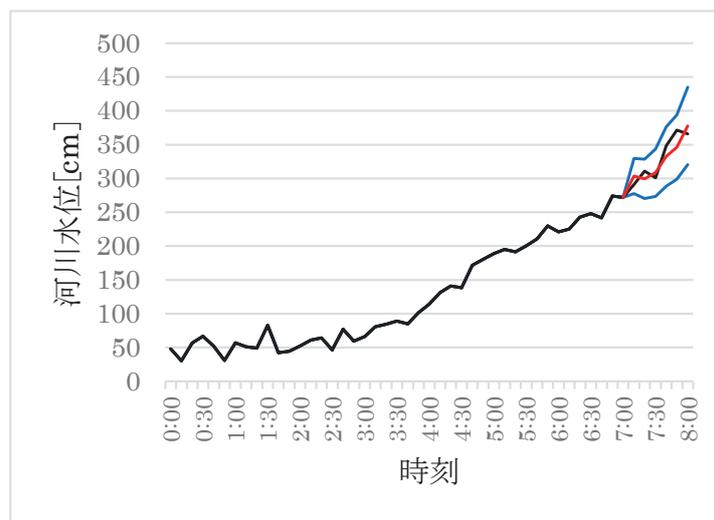


図-1 予測水位と実測水位の比較

図-1は、黒線が実測水位、赤線が予測水位、そして青線が予測水位の95%の信頼区間における上限値と下限値を表している。得られた予測水位は、実測水位と大きく乖離することはない、実測水位が予測

の上下限の範囲内に含まれるという結果となった。このことから1時間先までに関して有用な予測が出来たと考える。1時間先の河川水位を予測すると設定した理由は、多くの住民にとって避難勧告／避難指示を出してから避難を完了するまで1時間程度あれば十分であると考えたためである。モデル的には、それ以上先の水位も予測可能ではあるが、予測精度が低下するため、あまり意味がないと考えられる。

(4) ベイズ統計の適用

VARモデルにより得られたXバンドレーダ情報を考慮した河川水位の将来分布を尤度として、ベイズ統計により情報更新を行う。VARモデルによる予測の結果から、尤度は平均377.7cm、標準偏差29.2cmの正規分布に従う。ここで、事前分布を平均300cm、標準偏差40cmの正規分布に従うと仮定して計算すると、事後分布は平均350.7cm、標準偏差23.6cmの正規分布に従う分布となった。各分布のグラフは次に示す通りである (図-2)。

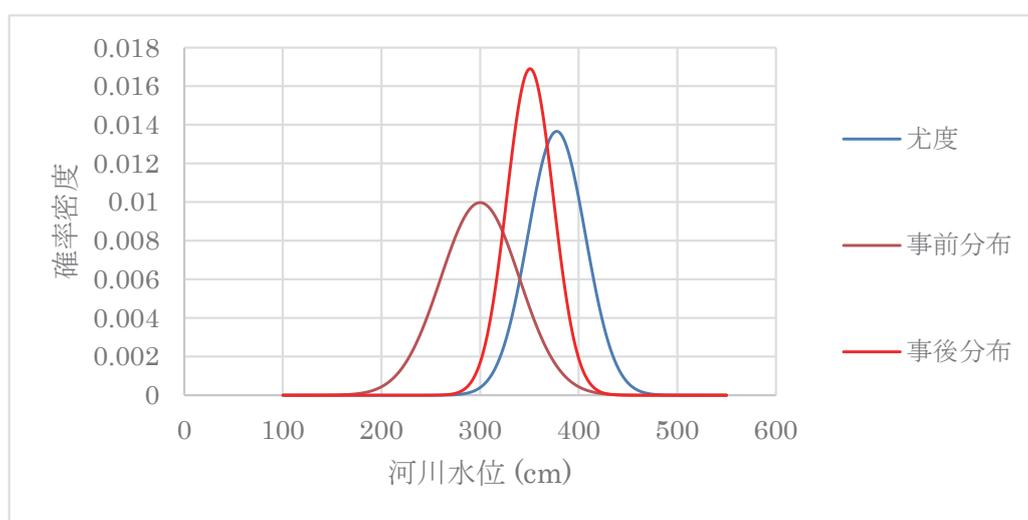


図-2 尤度，事前分布，事後分布

計算結果からわかるように、Xバンドレーダによる気象情報を考慮した河川水位分布を尤度として用いることによって、事後分布では分散が減少し確度が向上している。

このベイズ統計により得られる事後分布を用いる避難行動モデルにおいて、Xバンドレーダ情報を用いることでより精度の高い結果が得られるということが期待できる。

5. まとめ

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構築した。具体的には、VARモデルを用いて河川水位分布を推計し、1時間先までの水位変化の予測を行った。VARモデルの予測では、予測水位により実測水位を概ね表現することができ、実測水位が予測の95%の信頼区間の上下限の範囲に含まれるという結果となった。このようにVARモデルにより有用な予測を行うことができ、得られた河川水位分布を尤度として、ベイズ統計による情報の更新を行った。その結果、事後分布では確度が向上しており、ここで得られた事後分布を用いて行う先行研究における避難行動モデルの改良が期待できる。加えて、現実問題として、豪雨時における河川水位の情報提供にも有用性があり、住民の避難行動の意思決定サポートにおいて重要な意味を持つと考える。

謝辞：本研究は北海道大学社会工学科社会基盤学コース4年の高田悠平君の卒業論文として行われたものである。また、Xバンドレーダデータは、国土交通省北海道開発局よりご提供頂いた。ここに記して深謝の意を表する。

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（2016年2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) 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
- 5) 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）
- 6) 山下智志：市場リスクの計量化とVaR 朝倉書店（p46-53）