

# Xバンドレーダ情報が水災害時の避難行動 に与える影響に関する研究

A study on effect of X-band radar information on evacuation behavior under water  
disaster

内田 賢悦<sup>1</sup>  
Kenetsu UCHIDA

北海道大学大学院 工学研究院 准教授

## 要 旨

近年、局所的な集中豪雨や台風など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が拡大している。

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避難行動モデルの開発を行う。避難行動モデルでは、避難に関する一連の行動（避難するかどうか、避難する場合にはどの避難所を選択するか等）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最適割当問題も扱っている。水害時には、気象状況の変化が被害状況に大きく影響を与えると考えられるため、構築したモデルでは、ベイズ統計の適用によってXバンドレーダとCバンドレーダによる気象情報の更新を行い、気象情報の更新が避難行動に与える影響が分析可能となっている。開発したモデルに仮想データを適用して行った数値実験による結果を最後に示す。

《キーワード：Xバンドレーダ；避難行動；一時避難所》

## 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日本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が拡大している。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名もの死者を出すなど甚大な被害をもたらした<sup>1)</sup>。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。しかし、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。

本研究では、水災害時の気象状況を考慮した住民の避難行動モデルの開発を行う。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と考えられる。こうした考えから、本研究で開発する避難行動モデルでは、住民が避難するかどうか、避難する場合にはどの避難所を選択するかという一連の行動を内生化した上で、住民の期待費用を最小化する一時避難所割り当て問題も考える。また開発したモデルでは、ベイズ統計の適用によってXバンドレーダとCバンドレーダによる気象情報の更新を行い、気象情報の更新が避難行動に与える影響が分析可能となっている。

本研究の構成は以下の通りである。第2章では、Xバンドレーダの特徴を挙げたうえで従来のCバンドレーダとの比較を行う。第3章では、ベイズ統計を用いて洪水の発生要因である降雨の発生確率を定式化し、それを踏まえたうえで考慮する地域全体の世帯の総期待費用の定式化を行う。また、一時避難所の最適割り当て問題の定式化を行う。第4章では、世帯、一時避難所の配置を単純化した構造を仮定して数値実験を行った結果を示し、第5章では研究のまとめを行う。

## 2. Xバンドレーダ

### (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挙げる。

- ・雨量計による補正が必要ない
- ・誤差要因が少なく、高精度な観測が可能
- ・時間的・空間的なピークをリアルタイムに捉えることが可能
- ・設置コストが安価
- ・レーダを小型化することが可能
- ・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) 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。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。表1にXバンドレーダとCバンドレーダの特徴を比較したものを示す。

表1 CバンドレーダとXバンドレーダの比較表<sup>2)3)</sup>

レーダ種類	Cバンドレーダ (従来)	Xバンドレーダ
観測目的	降雨の実況観測 (広域)	降雨の実況観測 (狭義・詳細) 雨域の発達, 移動過程の観測
情報更新間隔	5分	1分
提供するデータの分解能	1km×1kmの直交メッシュ	250m×250mの直交メッシュ
データの処理範囲	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	なし

### 3. 降雨発生確率の定式化

#### (1) 想定

ある日に大規模な降雨が続き、行政の防災担当者が災害情報の発令を検討し始めた時点を想定する。防災担当者が災害情報の発令を検討するような状況下では、事後的に観測される日降雨量は、年最大日降雨量とみなすことができると考えられる。一方、過去の降雨観測データから年最大日降雨量の理論的確率分布が既に推定されており、それとCバンドレーダあるいはXバンドレーダからの降雨情報を活用し、防災担当者は将来の気象情報、すなわち降雨情報を住民に提供するものとする。ある地域の住民は、提供された気象情報に基づき、避難に関する一連の行動（避難するかどうか、避難する場合どの一時避難所を選択するか等）を決定すると考える。Cバンドレーダを想定した場合、その空間分解能が低いため、ある地域の住民に提供される気象情報は少ない。これに対して、空間分解能の高いXバンドレーダを想定した場合、その地域の住民に提供される気象情報は、住民（世帯）の立地地点に応じて多くの気象情報が提供されることになる。

#### (2) 避難行動モデルの概要

内田<sup>4)</sup>は降雨時の洪水及び土砂災害を想定した一時避難所の最適割当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を想定し、住民の避難行動を考慮した上で、水災害時に発生する費用の最小化する最適な一時避難所の組合せを各世帯に割り当てている。

本研究で扱う避難行動モデルは基本的に内田<sup>4)</sup>に基づいており、そこでのn年降雨を年最大日降雨量（以下、単に降雨量とする） $q$  (mm) と読み替えている。さらに降雨時の気象情報を活用した降雨情報の更新による影響を評価可能なように改良されている。避難行動モデルおよび一時避難所最適割当問題に関しては、ここではその概要のみを示すものとする。詳細については、内田<sup>4)</sup>を参照されたい。

はじめに降雨量が $q$ であるときの河川直近にいる人の被災確率を $P_{clq}^f$ と表すことにする。このとき、施設 $k \in I \cup J$  (I: 世帯の集合, J: 一時避難所の集合) にいる人の被災確率 $P_{clq}^f(k)$ を式(1)で与える。

$$P_{clq}^f(k) = \frac{1}{1 + \exp(\beta_1 + \beta_2 \cdot a_k^f(d_k, h_k))} \cdot P_{clq}^f \quad (1.1)$$

where

$$P_{clq}^f = \frac{1}{1 + \exp(\beta_3 \cdot q + \beta_4)} \quad (1.2)$$

ここで、 $\beta_1(<0), \beta_2(>0), \beta_3(<0), \beta_4(>0)$ はパラメータである。また $a_k^f(d_k, h_k)$ は、施設kの安全性指標であり、河川からの距離( $d_k$ )と標高( $h_k$ )によって表現されている。

降雨量が $q$ である時、世帯 $i$ の住民が避難すると決定した場合、避難所 $i$ を選択する確率を式(2)で与える。

$$P_{ij|e}(q) = \frac{\exp(u_{ij}(q))}{\sum_{l \in J} \exp(u_{il}(q))} \quad \forall i \in I \quad (2.1)$$

where

$$u_{ij}(n) = \beta_5 \cdot r_{ij} - f \cdot P_{clq}(j) - s \quad (2.2)$$

ここで $\beta_5(<0)$ はパラメータであり、また $r_{ij}$ ,  $f$ は、それぞれ世帯 $i \in I$ から避難所 $j \in J$ までの最短経路距離(m)、被災時の人的被害額(円)である。式(2)において $-\beta_3 \cdot r_{ij}$ は世帯 $i$ から避難所 $j$ までの移動に要する心理的費用、 $f \cdot P_{cln}(j)$ は避難所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。式(2)は、世帯からの経路距離が短い避難所ほど、さらに、避難所に入れた場合の期待効用が高いほどその選択確率が高くなることを示している。

### (3) 気象情報による降雨確率の更新

過去の観測データから推計された確率的降雨量 $Q_{pr}$ 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(3))。

$$Q_{pr} \sim N(\bar{q}_{pr}, \sigma_{pr}^2) \quad (3.1)$$

$$g_{pr}(q) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{pr}^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(q - \bar{q}_{pr})^2}{2 \cdot \sigma_{pr}^2}\right) \quad (3.2)$$

防災担当者が災害情報の発令を検討し始めた時点では、式(3)に示される確率的降雨量の情報しかない想定する。

その後、現在までの累積降雨量とCあるいはXバンドレーダから観測された降雨率(mm/unit time)の情報が防災担当者に届けられると考えることにする。これらの情報から、防災担当者は世帯 $i$ の立地地点における確率的日降雨量を $Q_r^m(i) (m=1, \dots, M)$ 推計するものとする。 $Q_r^m(i)$ が正規分布 $N(\bar{q}_r^m(i), \sigma_r^2(i))$ に従っていると仮定し、その確率密度関数を $f_i(q)$ と表現する(式(4))。

$$Q_r^m(i) \sim N(\bar{q}_r^m(i), \sigma_r^2(i)) \quad (4.1)$$

$$f_i(q|\bar{q}_r^m(i), \sigma_r^2(i)) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_r^2(i)}} \cdot \exp\left(-\frac{(q - \bar{q}_r^m(i))^2}{2 \cdot \sigma_r^2(i)}\right) \quad (4.2)$$

式 (1) を事前分布, 式 (2) を尤度関数としてベイズ統計を適用すると, 世帯*i*におけるQprの事後確率分布  $Q_{po}^i$  は正規分布  $N(\bar{q}_{po}(i), \sigma_{po}^2(i))$  に従い, その確率密度関数  $g_{po}(q)$  は式 (5.2) で与えられる<sup>5)</sup>.

$$Q_{po}^i \sim N(\bar{q}_{po}(i), \sigma_{po}^2(i)) \quad (5.1)$$

$$g_{po}^i(q) = \frac{g_{pr}(q) \cdot f_i(q)}{\int g_{pr}(q) \cdot f_i(q) dq} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{po}^2(i)}} \cdot \exp\left(-\frac{(q - \bar{q}_{po}(i))^2}{2 \cdot \sigma_{po}^2(i)}\right) \quad (5.2)$$

where

$$\bar{q}_{po}(i) = \frac{\frac{\sum_m \bar{q}_r^m(i)}{\sigma_r^2(i)} + \frac{\bar{q}_{pr}}{\sigma_{pr}^2}}{\frac{M}{\sigma_r^2(i)} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{po}^2(i) = \frac{1}{\frac{M}{\sigma_r^2(i)} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}} \quad (5.5)$$

防災担当者は, 式 (5) で表される降雨情報を住民に提供し, 住民はその情報に基づいて一連の避難行動を決定することは先述したとおりである. 過去の観測データから得られる事前確率とレーダによってリアルタイムに得られる追加情報 (尤度) を活用することによって, より確度の高い降雨情報を住民に提供できることが表現されている.

#### (4) 一時避難所の最適割当問題の概要

ある世帯が地域内に存在するすべての一時避難所を選択可能と想定すると, その世帯が安全性の低い避難所を選択した場合, 災害規模によっては大きな費用を負担することが考えられる. そこで本研究では, 選択可能な一時避難所の集合を予め各世帯に割り当てておくことによって, 水災害時に発生する総費用を最小化する方法を考える. すなわち, 総費用最小化を目的とした一時避難所の最適割当問題を考える. 一時避難所の最適割当問題では, 分析対象地域に含まれる全世帯を対象とし, 長期間に渡って発生する総費用の最小化を考える. ここでは問題を簡略化するため, 1年間の内, 年最大日降雨量が発生する日のみを対象とし, 水災害時の総費用を定式化する.

ある年  $y$  の世帯  $i$  の住民が負担する期待費用  $C_{iy}$  は, 式 (6) で与えられる.

$$C_{iy} = \int_0^{\infty} g_{po}^i(q) \cdot C_{iy}(q) dq \quad (6)$$

ここで  $C_{iy}(q)$  は, ある年  $y$  に降雨  $q$  が発生したとき, 世帯  $i$  の住民が負担する期待費用である<sup>4)</sup>.  $Y$ 年間で世帯  $i$  の住民が負担する期待総費用 ( $C_i$ ) は式 (7) で与えられる.

$$C_i = \sum_{y=1}^Y C_{iy} \quad (7)$$

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(8)で与えられる。

$$C = \sum_{i \in I} C_i = \sum_{i \in I} \sum_{y=1}^Y C_{iy} = \sum_{i \in I} \sum_{y=1}^Y \int_0^{\infty} g_{po}^i(q) \cdot C_{iy}(q) dq \quad (8)$$

最適避難所割り当て問題では、式(8)を最小化するように、各世帯が選択可能な避難所の集合を求める問題として定式化される。

#### 4. 計算例

ここでは、第3章で定式化した避難行動モデルに仮想データを適用した数値実験についての説明を行う。

##### (1) 設定

図1に示すように世帯*i*と避難所*j*によって構成される地域を考える。ここで、XバンドレーダとCバンドレーダを適用した場合の結果を比較するため、対象地域を4つの区域に分割して考える。なお、対象区域内では避難者は区域を越えて避難行動を行わないと仮定する。

ここで図2に示すように、それぞれの区域には、世帯数、避難所数がそれぞれ5世帯、4避難所存在するものとし、対象地域内には河川が存在し、大規模降雨によって洪水被害が起こるような立地関係を設定した。図2では、黒丸が世帯、四角が避難所を表し、それぞれに識別番号が振られている。

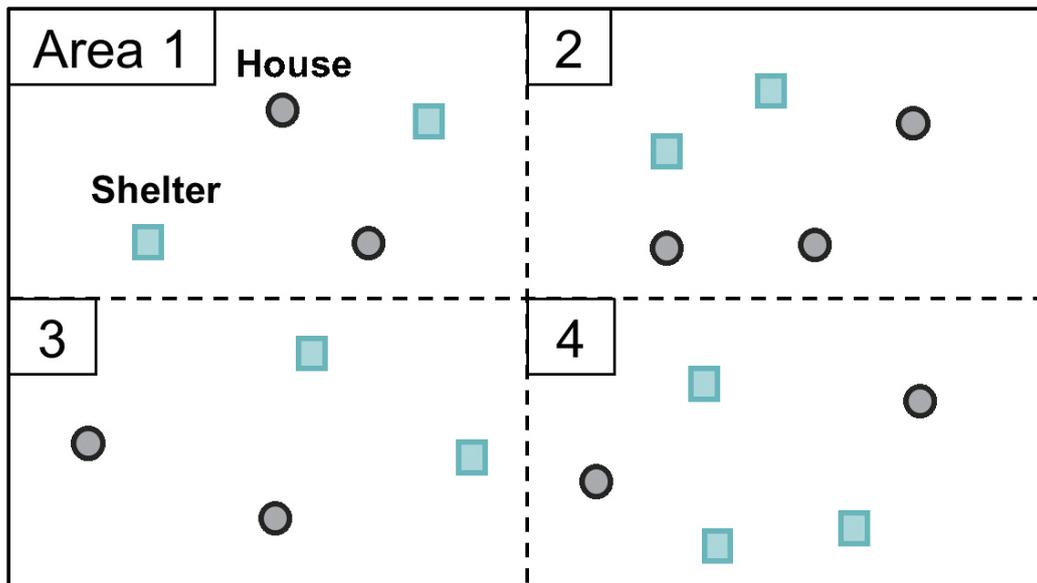


図1 対象地域

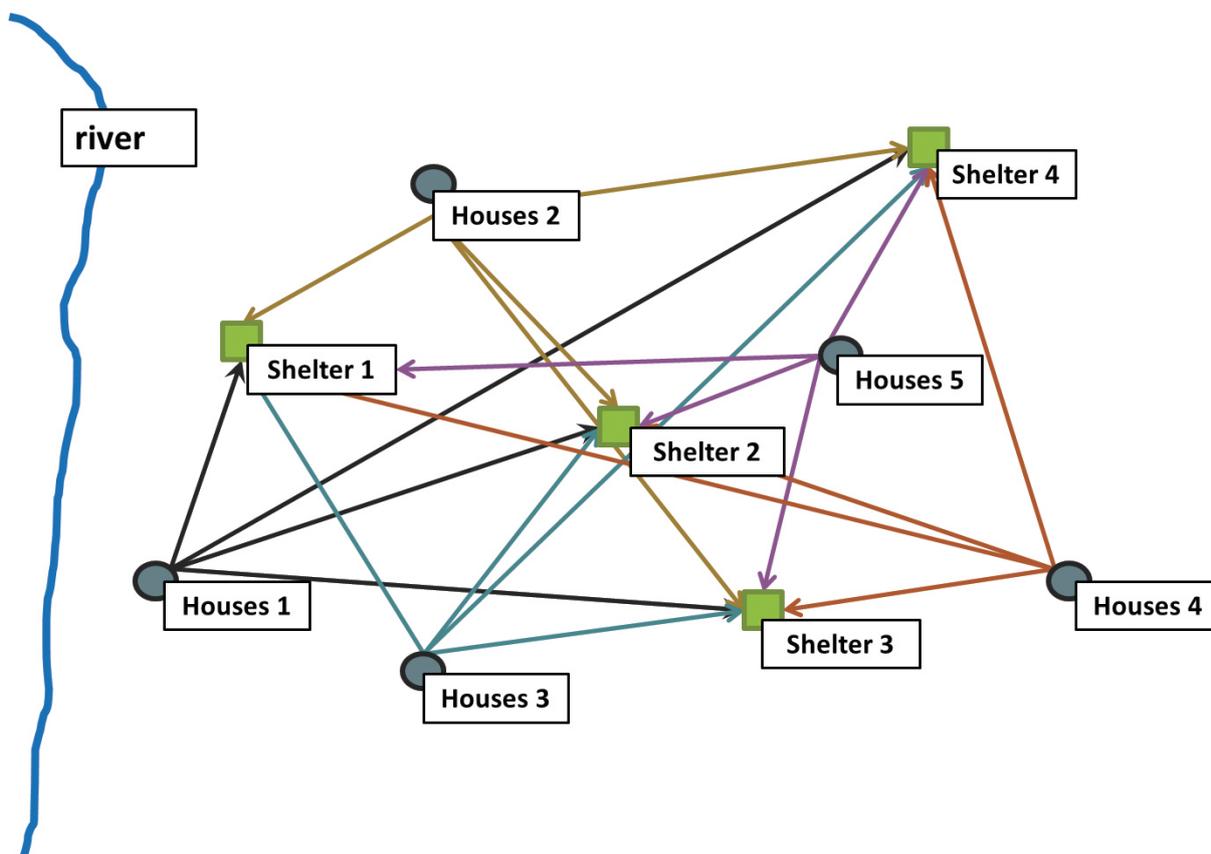


図2 対象地域

式 (1) に示される各施設の被災確率に用いるパラメータ値は、 $\beta_1 = -5, \beta_2 = 0.2, \beta_3 = -0.05, \beta_4 = 6$  と設定した。式 (2) に示される効用関数のパラメータ値は、それぞれ  $f = 1.0 \times 10^8$  (円),  $s = 3.0, \beta_5 = -0.03$  とした。また、年最大日降雨量の分布は全ての区域に対して同一となり、正規分布  $N(160, 30^2)$  と仮定した。ここで、CバンドレーダはXバンドレーダに比べ空間解像度が低いため、4つの区域に1つの観測雨量が得られるとした。それに対し、Xバンドレーダでは、4つの区域それぞれに固有の観測雨量が得られるとした。ここで、Cバンドレーダの観測雨量は、Xバンドレーダの4つの観測雨量の平均値となるようにした。また、事後的に明らかとなる実降雨量は、Xバンドレーダから推計される降雨量に近い値とした。こうした設定は、Cバンドレーダから推計される降雨量は、各区域において事後的に観測される降雨量から乖離することを表現している。このことは、恣意的にCバンドレーダがXバンドレーダよりも劣っていることを表現するために設定したのではなく、表1に示した特徴に基づいて設定したことに注意が必要である。

モデルで仮定した設定値を表2～7および図3、4に示す。

表2 区域1における各施設のパラメータ

区域1	世帯					避難所			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
標高 : $h_k$	20	25	10	15	20	20	30	25	22
距離 : $d_k$	500	1000	200	600	800	800	100	1000	1500
収容人員						100	100	50	70
安全指標 : $a_k^f(d_k, h_k)$	25	35	15	25	30	30	35	35	37

表3 区域2における各施設のパラメータ

区域2	世帯					避難所			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
標高：hk	10	25	20	15	25	25	30	22	20
距離：dk	250	800	500	600	1000	1000	150	1500	800
収容人員						70	100	50	100
安全指標： $a_k^f(d_k, h_k)$	15	35	25	30	35	40	35	37	30

表4 区域3における各施設のパラメータ

区域3	世帯					避難所			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
標高：hk	20	25	10	15	20	20	30	25	22
距離：dk	0	300	50	600	800	800	100	1000	1500
収容人員						60	100	50	40
安全指標： $a_k^f(d_k, h_k)$	25	35	15	25	30	30	35	35	37

表5 区域4における各施設のパラメータ

区域4	世帯					避難所			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
標高：hk	20	20	50	25	10	15	30	25	10
距離：dk	800	200	50	200	500	1500	1000	800	500
収容人員						100	100	50	70
安全指標： $a_k^f(d_k, h_k)$	25	30	55	35	20	20	40	40	40

表6 Xバンドレーダより得られる尤度関数

Xバンドレーダ	区域1	区域2	区域3	区域4
平均	120	130	125	90
標準偏差	30	10	15	15

(単位：mm)

表7 Cバンドレーダより得られる尤度関数

Cバンドレーダ	区域1	区域2	区域3	区域4
平均	110			
標準偏差	60			

(単位：mm)

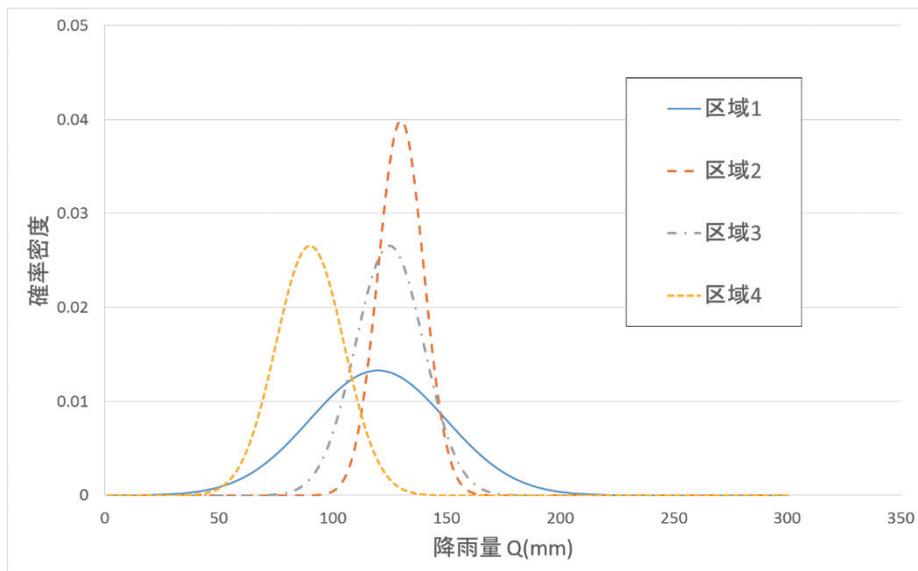


図3 Xバンドレーダでの尤度関数

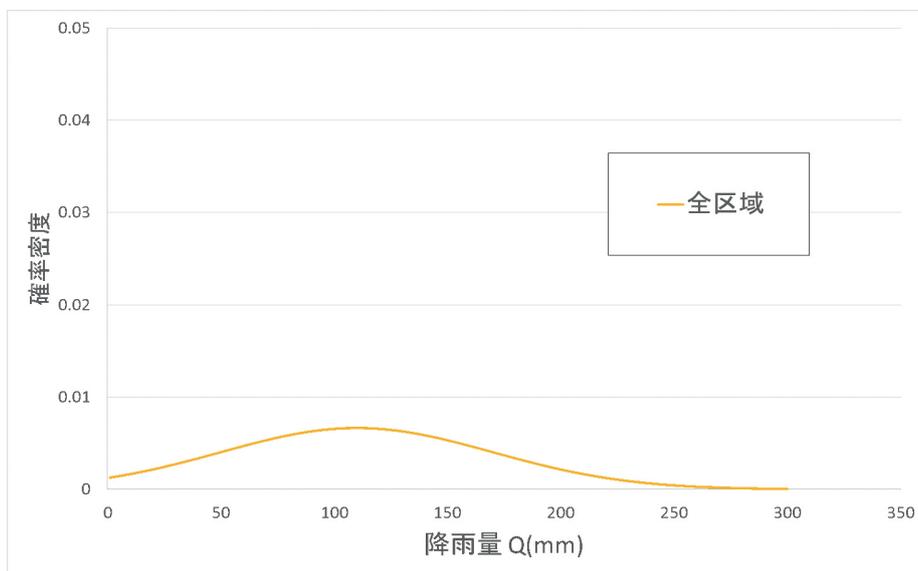


図4 Cバンドレーダでの尤度関数

## (2) ベイズ統計による気象情報の更新

ここでは、ベイズ統計を用いた確率的降雨量の更新を行った結果を示す。区域1においては事前分布、尤度はそれぞれ、 $N(160,30^2)$ 、 $N(120,20^2)$  ( $M=1$ )となっている。以上の設定を式(5)に適用した結果、確率的降雨量の事後分布が正規分布  $N(132.3,16.5^2)$  として推計された。図5に事前分布、尤度および事後分布の関係を示す。この図から、気象情報を活用することによって、事後分布では不確実性が減少していることがわかる。また、その他の区域で同様の計算を行った結果を表8~11に示す。

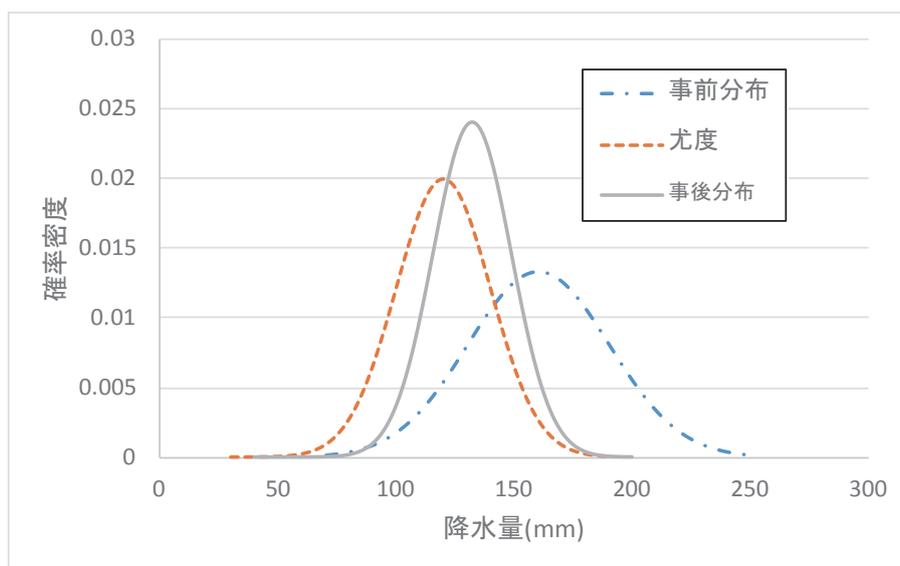


図5 発生確率の更新（区域1）

表8 区域2における発生確率の更新（Xバンドレーダ）

区域2	事前分布	尤度関数	事後分布
平均	160	130	133
標準偏差	30	10	9.49

(単位：mm)

表9 区域3における発生確率の更新（Xバンドレーダ）

区域3	事前分布	尤度関数	事後分布
平均	160	125	132
標準偏差	30	15	13.4

(単位：mm)

表10 区域4における発生確率の更新（Xバンドレーダ）

区域4	事前分布	尤度関数	事後分布
平均	160	90	104
標準偏差	30	15	13.4

(単位：mm)

表11 全区域における発生確率の更新（Cバンドレーダ）

全区域	事前分布	尤度関数	事後分布
平均	160	110	150
標準偏差	30	60	26.8

(単位：mm)

### (3) 結果

以上で設定した確率的降雨量の事後確率に基づき、避難行動モデルから期待総費用を推計した結果を図6に示す。図6は、降雨量と期待総費用の関係を表しており、その関係は正規分布に従っているようにみえるが、そのようになっていないことに注意が必要である。図6では、Xバンドレーダ、Cバンドレーダともに、確率的降雨量の事後確率を用いて期待総費用を計算している。Xバンドレーダからの情報を活用した場合、期待総費用の最大値は降雨量が約135 (mm) のときに発現しているのに対して、Cバンドレーダの場合、約150 (mm) のときに発現していることがわかる。Xバンドレーダの方が期待総費用の最大値が大きいため、Cバンドレーダによる情報を活用した場合に費用（あるいは被害）が小さくなると感じられるかもしれないが、こうした解釈は間違いである。正しくは、Xバンドレーダに基づいて推計される確率的降雨量の分散はCバンドレーダのものよりも小さいため、Xバンドレーダにおける135 (mm) 付近の降雨量の発生確率はCバンドレーダにおける150 (mm) 付近のそれよりも高い。こうした関係が、結果に反映されていると解釈できる。

表12に事後的に観測された降雨量の設定値を示す。これらの値は、Xバンドレーダによる事後確率に近い値をとっているが、これは分析上置いた仮定に基づくものである。表12に示した値を用いて計算した期待費用の基準値は50億円と推計された。これに対し、Xバンドレーダにより得られた値は50.2億円、Cバンドレーダにより得られた値は57.0億円と推計された。Xバンドレーダを活用することによって、より基準値に近い値を得ることが可能であることがわかる。以上の総費用の推計値は、各世帯の住民が区域内すべての一時避難所を選択可能と仮定して計算されたものである。ここで基準値とは、不確実性のない降雨量（事後的に得られる観測降雨量）に基づいて推計される総費用であり、総期待費用の下限值と解釈することができる。

次にXバンドレーダでの値を用いて最適一時避難所割り当て問題を解いた結果、全区域での期待総費用は45.8億円と推計され、約4.4億円削減されることが明らかとなった。各区域での最適割り当て後の総期待費用を表13に示す。

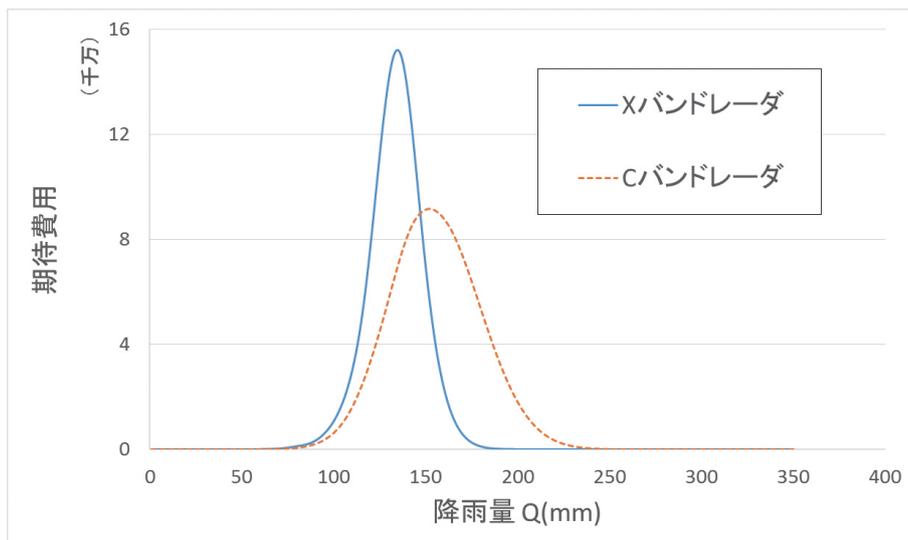


図-6 期待総費用

表12 事後的に得られた観測降雨量（基準値）

	区域1	区域2	区域3	区域4
観測結果	125	125	130	90

(単位：mm)

表13 各区域の最適割り当て後の期待総費用

	区域1	区域2	区域3	区域4	合計
総期待費用	1940	897	1960	225	5020
最適割当	1730	881	1810	151	4580
差	210	16	145	74	440

(単位：千万円)

## 5. おわりに

本研究で気象情報の更新を反映した避難行動モデルの開発を行った。さらに、仮想データを用いたモデルの検証を行った。その結果、Xバンドレーダの活用は、避難行動支援において有効である可能性が示された。また、Xバンドレーダの活用は、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、Xバンドレーダを活用することにより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災害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。

今後の改題として以下の点が挙げられる。

- ・数値実験では、パラメータ値や事前分布の平均・分散などに仮定した値を適用した。そのため、今後は実在するエリアの世帯と避難所を対象に、Xバンドレーダの情報を元に避難行動モデルを考える必要がある。
- ・本研究では、降雨の確率分布を正規分布と仮定し、その分布を発生確率として扱った。しかし、降雨の確率分布が正規分布とならないことも考えられるため、正規分布以外の分布形状にも対応できるようなベイズ統計を行う必要がある。
- ・洪水に対する安全性指標は、河川までの距離と標高により決定されるが、実際には構造物の耐久性や地面の状態などもかかわってくるため、今後は考慮する必要がある。

## 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活動について」総務省消防庁HP災害情報（2014年2月現在）
- 2) 国土交通省：「XバンドレーダMPレーダについて」国土交通省HP，（2014年2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）