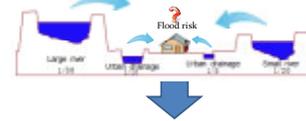


## 時空間相関を考慮した地先の水害リスクの評価方法に関する研究

京都大学防災研究所  
教授 多々納 裕一  
特任助教 蔣 新宇

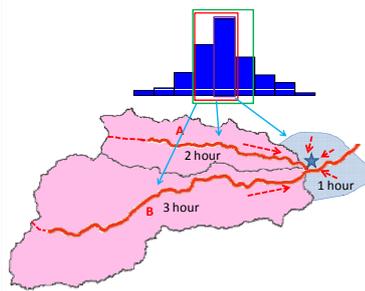
## 地先の水害リスク

- 統一の指標
  - 複数ハザード(外水、内水(支川氾濫、下水道)、高潮、津波、土石流、、、)
  - 現状: それぞれの施設ごとに設計外力が想定され、流域内の各地点における安全度は不明



人命損傷のリスク、資産損傷のリスク等、少なくとも流域内各地点におけるリスクを複数のハザードを考慮して推計することが必要

## 複数のハザードを考慮するには



- 個々のハザードを規定する要因を考慮
  - 河川(本川)からの氾濫(流域面積 $A_1$ 、洪水到達時間 $t_1$ )
  - 支川からの氾濫(流域面積 $A_2$ 、洪水到達時間 $t_2$ )
  - 内水氾濫(下水道)(集水面積 $A_3$ 、到達時間 $t_3$ )

- それぞれのハザードの特性を記述するために、洪水到達時間内の降水量(総量) $R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}$ を利用

- これらの降水量の同時生起確率
- $F(p, q, r) = \Pr\{R_{t_1}=p, R_{t_2}=q, R_{t_3}=r\}$ を算定

- $F(p, q, r)$ に従う降雨(シナリオ $s_1, \dots, s_n$ )を生成して、統合型シミュレーション(降雨一流出-氾濫-被害)を用いて被害額 $D(s_i)$ を算定

## 多次元同時生起分布の生成方法: コピュラの利用

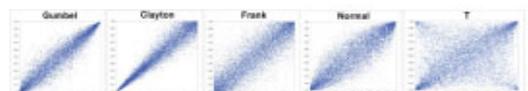
- コピュラ: 周辺分布と同時生起確率とを関係づける関数  $C: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$

$$H(x, y) = C(F(x), G(y))$$

ここで  $H(x, y)$  は同時分布、 $F(x)$  および  $G(y)$  は周辺分布

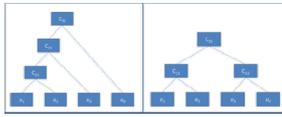
## 2変数のコピュラの例

Copula	Equation
Gumbel	$C_\theta(u, v) = \exp\{-[-(\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$
Hoggard	$C_\theta(u, v) = \frac{1}{\theta} \ln\left[1 + \frac{[\exp(\theta u) - 1][\exp(\theta v) - 1]}{\exp(\theta) - 1}\right]$
Clayton	$C_\theta(u, v) = [u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1]^{-1/\theta}$
Normal Copula	$C(u, v; \theta) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi(1-\theta^2)^{1/2}} \times \left\{ \frac{-(s^2 - 2\theta st + t^2)}{2(1-\theta^2)} \right\} ds dt$
t-Copula	$C(u, v; \theta, \tau) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi(1-\theta^2)^{1/2}} \times \left\{ 1 + \frac{-(s^2 - 2\theta st + t^2)}{\theta(1-\theta^2)} \right\}^{-\tau/2} ds dt$



### 高次元のコピュラの構成法

- The nested Archimedean constructions (NACs)



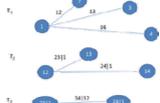
$$C(u_1, u_2, u_3, u_4) = C_{21}(C_{11}(u_1, u_2), C_{12}(u_3, u_4))$$

$$= \varphi_{11}^{-1}(\varphi_{11}(\varphi_{11}^{-1}(u_1) + \varphi_{11}(u_2))) + \varphi_{12}^{-1}(\varphi_{12}(\varphi_{12}^{-1}(u_3) + \varphi_{12}(u_4)))$$

$$C(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) = C_{21}(C_{11}(u_1, u_2, u_3), C_{12}(u_4, u_5))$$

$$= \varphi_{11}^{-1}(\varphi_{11}(\varphi_{11}^{-1}(u_1) + \varphi_{11}(\varphi_{11}^{-1}(u_2) + \varphi_{11}(u_3)))) + \varphi_{12}^{-1}(\varphi_{12}(\varphi_{12}^{-1}(u_4) + \varphi_{12}(u_5)))$$

- The pair copula construction (PCC)

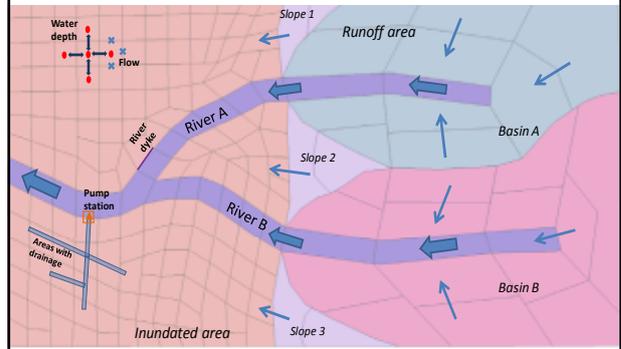


$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2) \cdot f(x_3 | x_1, x_2) \cdot f(x_4 | x_1, x_2, x_3) \cdot \dots \cdot f(x_n | x_1, \dots, x_{n-1})$$

$$C(u_1, u_2, u_3, u_4) = C_{12}(F_{12}(u_1), F_{12}(u_2)) \cdot C_{13}(F_{13}(u_1), F_{13}(u_3)) \cdot C_{23}(F_{23}(u_2), F_{23}(u_3)) \cdot C_{14}(F_{14}(u_1), F_{14}(u_4)) \cdot C_{24}(F_{24}(u_2), F_{24}(u_4)) \cdot C_{34}(F_{34}(u_3), F_{34}(u_4))$$

### 降雨一流出一氾濫総合型シミュレーションモデルの開発

How to simulate: Model schema



### Numerical methods for rainfall-runoff and inundation simulations

- Rainfall-runoff

$$h_t + f(h)_x = s$$

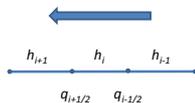
- For slope flow  $f(h) = q = \sqrt{\sin\theta_s} / N \times h^{3/5}$   $s = R_e$
- For river flow  $f(h) = q = \sqrt{\sin\theta} / n \times h^{3/5}$   $s = \frac{q_s}{B}$

- Godunov's method and local Lax-Friedrichs method

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{i+1/2}^n - q_{i-1/2}^n) + \Delta t s$$

$$q_{i-1/2}^n = \frac{1}{2} [f(h_{i-1}) + f(h_i) - a_{i-1/2} (h_i - h_{i-1})]$$

$$a_{i-1/2} = \max(|f'(h_{i-1})|, |f'(h_i)|)$$



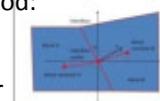
- Inundation model:

$$\mathbf{u}_t + \mathbf{f}_x + \mathbf{g}_y = \mathbf{s}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} hu^2 + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\mathcal{F}_b) \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\mathcal{F}_b) \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} hv \\ hvu \\ hv^2 + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\mathcal{F}_b) \end{bmatrix} \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_b}{\rho} - gJ \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ -\frac{\tau_b}{\rho} - gJ \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix}$$

- Godunov type finite volume method:

$$\mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^n + \frac{\Delta t}{A} \sum_{j=1}^m \mathbf{f}_j / \mathbf{n} + \Delta t \mathbf{s}$$



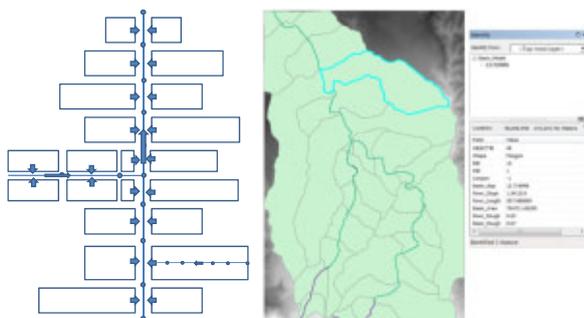
- HLLC approximate Riemann solver

$$\mathbf{f} = \begin{cases} \mathbf{f}_L & 0 \leq S_L \\ \mathbf{f}_L & S_L \leq 0 \leq S_M \\ \mathbf{f}_R & S_M \leq 0 \leq S_R \\ \mathbf{f}_R & 0 \geq S_R \end{cases} \quad \epsilon = \frac{S_L \mathbf{f}_L - S_R \mathbf{f}_R + S_M (u_R - u_L)}{S_M - S_L} \quad u_* = \frac{1}{2}(u_L + u_R) + \sqrt{g h_L} + \sqrt{g h_R}$$

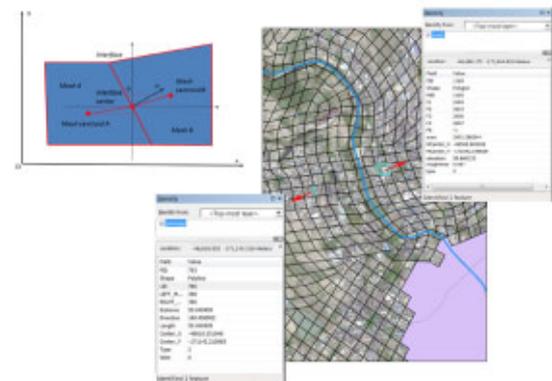
$$S_L = \begin{cases} u_L - 2\sqrt{g h_L} & h_L = 0 \\ \min(u_L - \sqrt{g h_L}, u_L + \sqrt{g h_L}) & h_L > 0 \end{cases} \quad h_* = \frac{1}{2} \left( \sqrt{g h_L} - \sqrt{g h_R} \right) + \frac{1}{2} (u_L - u_R)$$

$$S_R = \begin{cases} u_R - 2\sqrt{g h_R} & h_R = 0 \\ \max(u_R - \sqrt{g h_R}, u_R + \sqrt{g h_R}) & h_R > 0 \end{cases} \quad S_M = \frac{S_L h_L (u_L - S_M) - S_R h_R (u_R - S_M)}{h_L (u_L - u_R) - h_R (u_L - u_R)}$$

### GIS realization of rainfall-runoff model



### GIS realization of inundation model

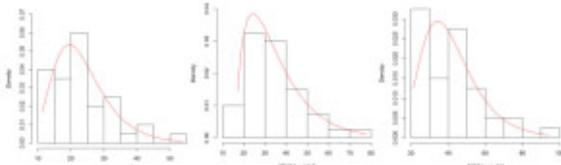




## (2) 周辺分布の推定

Generalized Pareto分布 (GP), Generalized Extreme Value分布 (GEV), Exponential分布 (EXP), Gamma分布 (GM), lognormal分布とWeibull分布を候補として、KSテストとAICで選択する。

最大1時間の降雨はパラメータ (3.098, 0.359) lognormal分布である、年間最大2時間の降雨はパラメータ (1.76, 16.259, 10.725) のPearson分布である、年間最大3時間の降雨はパラメータ (3.672, 0.369) のlognormal分布である。

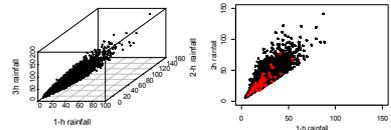


## (3) 同時分布の構成と降雨シナリオの生成

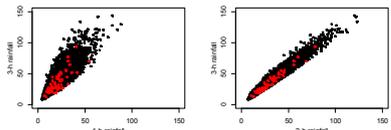
- 同時分布の構成

$$H(r_1, r_2, r_3) = C(F_1(r_1), G(r_2, r_3))$$

$$G(r_2, r_3) = C(F_2(r_2), F_3(r_3))$$

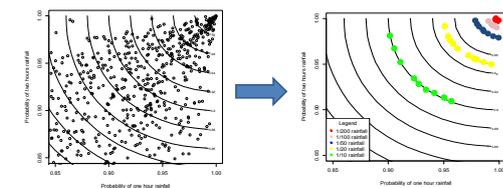


- 同時分布に基づく降雨シナリオの生成



- ヴァリデーション

- Monte Carlo simulation of rainfall event according to return period

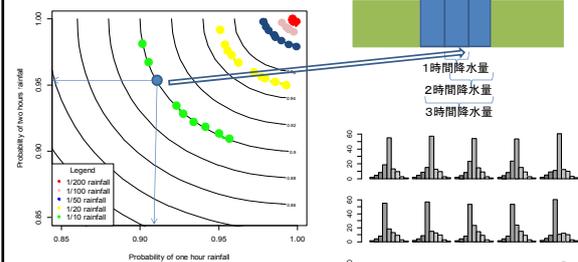


1. Generate extremely large numbers of random data from the copula model, such as more than 100,000.
2. Select the point closest to the counter line by the following formula:  

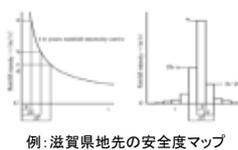
$$(u, v) = \underset{(x, y) \in D}{\operatorname{argmax}} F_1(F_2^{-1}(u), F_3^{-1}(v))$$

$$x = F_2^{-1}(u) \quad y = F_3^{-1}(v)$$
3. Select the point as a candidate point and delete the point from the original dataset.
4. Repeat step 2 and step 3 for  $n$  times, so that  $n$  points consistent with return period  $t$  can be selected. The selected points are rainfall events most likely to occur according to return period  $t$ .

## 降雨イベント(シナリオ)の生成

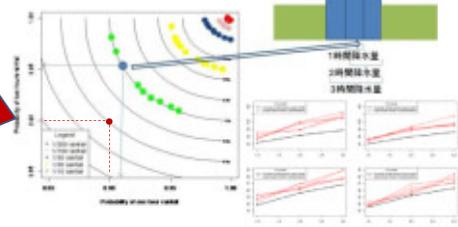


- 既存の方法との比較



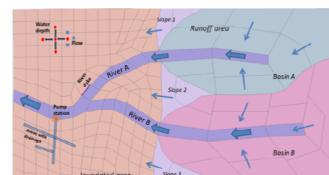
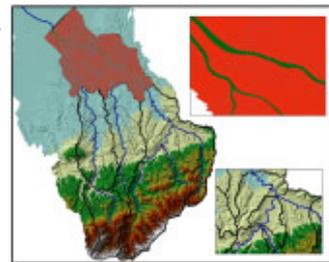
例: 滋賀県地先の安全度マップ

滋賀方式に従って1/10の降雨をプロットすると必ず生起確率に関して過小評価を引き起こす



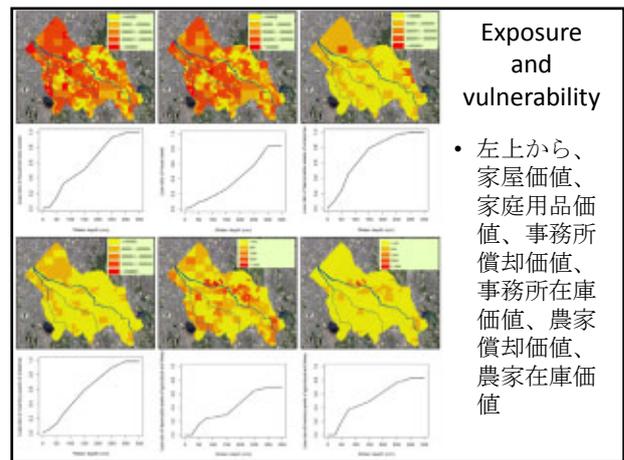
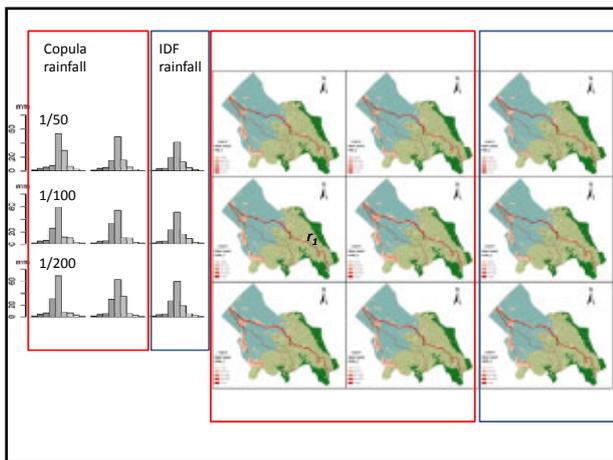
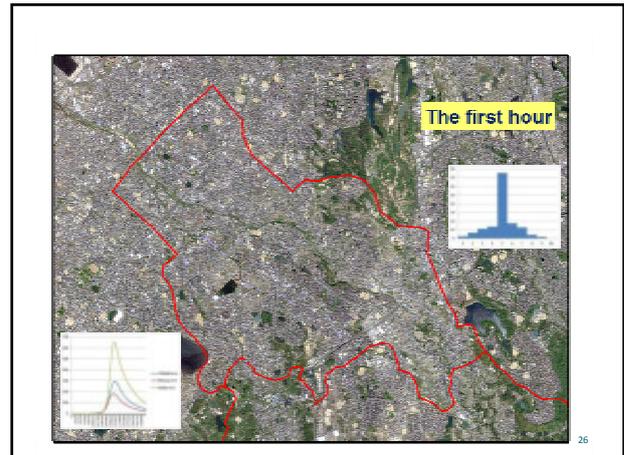
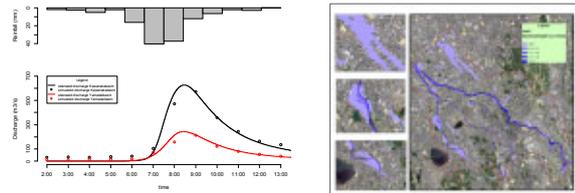
## 統合型シミュレーション

- 氾濫域と流出域に区別
- 氾濫域は、不定形メッシュでモデル化(平均サイズは概ね  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ )。河川や道路の形状および斜面勾配等を考慮。
- 流出域は部分流域に分割。



### 現象再現性

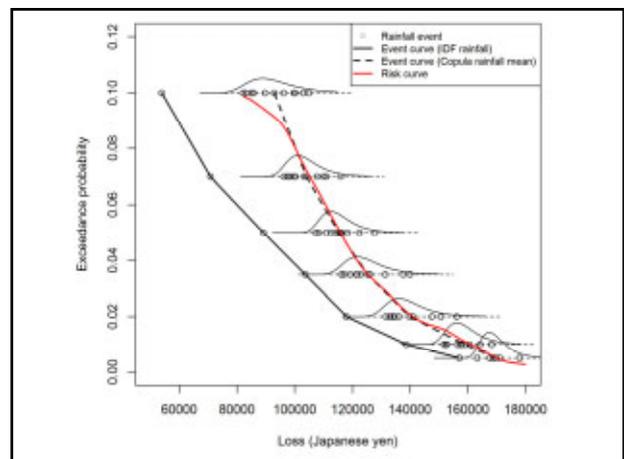
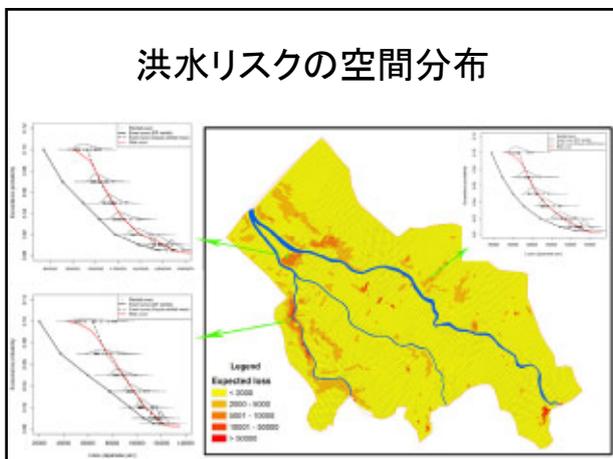
- 1995年7月4日の降雨 (時間最大降雨量 46 mm/h) を対象に再現性をチェック



### Exposure and vulnerability

- 左上から、家屋価値、家庭用品価値、事務所償却価値、事務所在庫価値、農家償却価値、農家在庫価値

### 洪水リスクの空間分布



## まとめ

- コンピュータを用いた複数のハザード(異なる継続時間を有する降雨)の同時生起確率の算定方法
- 同時生起確率分布に基づく災害シナリオ(頻度、規模)の生成方法
- 統合型シミュレーションを用いた災害シナリオに対応する被害の算定方法(災害カタログの作成(頻度、被害の分布))
- 地先の洪水リスクの生成法