



# RBFネットワークと準モンテカルロ法を用いた 確率論的津波ハザード解析および南海トラフ地震に よる災害廃棄物量のリスク評価への適用

早稲田大学大学院創造理工学研究科建設工学・博士後期課程  
早稲田大学創造理工学部社会環境工学科・教授  
日本大学工学部土木工学科・助教  
日本工営株式会社  
東北大学災害科学国際研究所・教授

○青木康貴  
秋山充良  
石橋寛樹  
小島貴之  
越村俊一

# 目次

1. 背景・目的
2. RBFネットワークと準モンテカルロ法を用いた確率論的津波ハザード解析手法
3. ケーススタディ：南海トラフ地震を想定した災害廃棄物量のリスク評価への適用
4. まとめ

# 背景・目的

## 切迫する南海トラフ地震

- 今後30以内に発生する可能性が非常に高い  
→ 将来の地震発生を前提とした場合でも、  
実際に生起する断層の動きを予測することは、  
極めて困難



- 断層運動の不確定性を確率的に考慮した  
確率論的津波ハザード解析(地震の発生確率は1.0)を実施することで、

- 沿岸部に位置する個別橋梁の信頼性評価

Ishibashi, H., Akiyama, M., Frangopol, D.M., Koshimura, S., Kojima, T. and Nanami, K.: Framework for estimating the risk and resilience of road networks with bridges and embankments under both seismic and tsunami hazards, *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(4): 494-514, 2021.

- 道路ネットワークの接続性評価

青木康貴, 布施柚起, 石橋寛樹, 秋山充良, 越村俊一: 地震動と津波を受ける橋梁の損傷が道路ネットワークの接続性に及ぼす影響の確率論的評価手法, 土木学会論文集A1, 78(4) (地震工学論文集第41巻): 1\_127-1\_137, 2022.

- 災害廃棄物のリスク評価

Ishibashi, H., Akiyama, M., Kojima, T., Aoki, K., Koshimura, S. and Frangopol, D.M.: Risk estimation of the disaster waste generated by both ground motion and tsunami due to the anticipated Nankai Trough earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50: 2134-2155, 2021.

などの事前対策に  
資する情報を提供  
できる

# 背景・目的

## レジリエンス強化の観点からの災害廃棄物量のリスク評価の重要性

2011年東北地方太平洋沖地震  
東日本の太平洋沿岸部における津波被害

- 東北3県を中心に津波が襲来
- 相当数の構造物が倒壊・流出



構造物の倒壊・流出により  
約2300万トンの災害廃棄物の発生

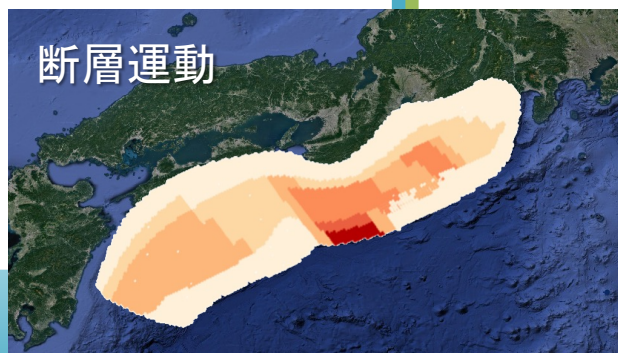
- 廃棄物の迅速な処理は、地域のレジリエンス（回復力）強化に直結
- 災害廃棄物のリスク評価には、陸域内を含む確率論的津波ハザード解析が不可欠



# 背景・目的

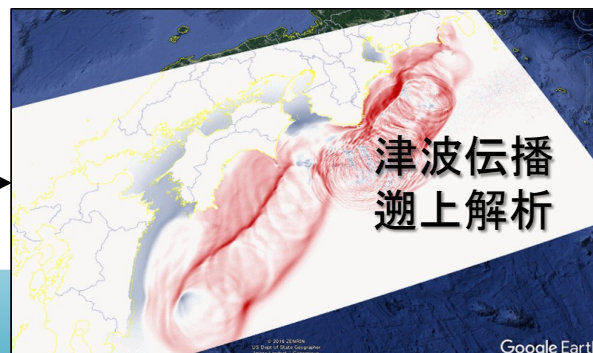
## 既存の確率論的津波ハザード解析の手順

### 1. 初期水位



断層

### 2. 津波伝播遡上解析



### 3. 津波ハザード強度

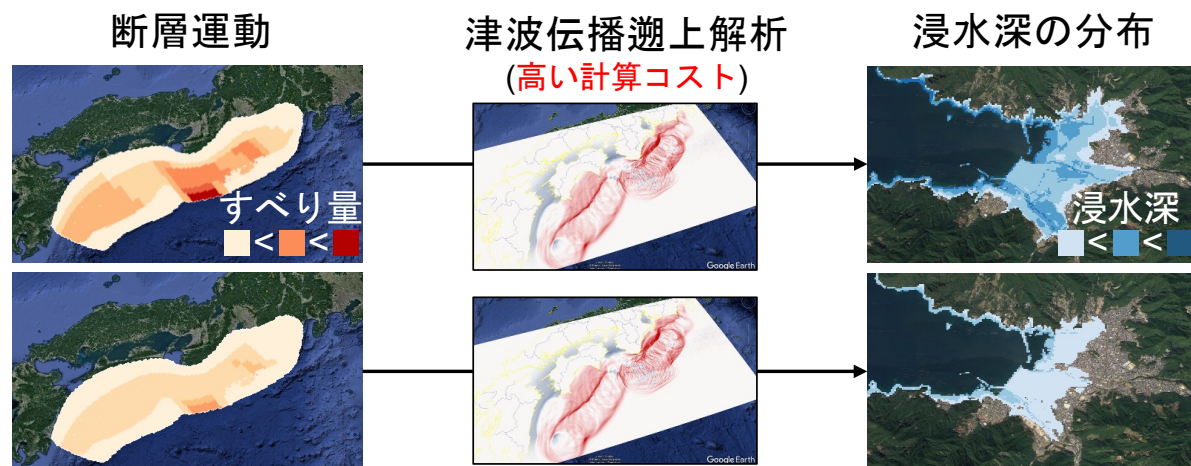


浸水深

# 背景・目的

## 既存の確率論的津波ハザード解析の手順

- 陸域内の浸水深の分布は、断層運動や地形・土地利用の影響を受け、強い非線形を持ちながら極めて複雑に変動

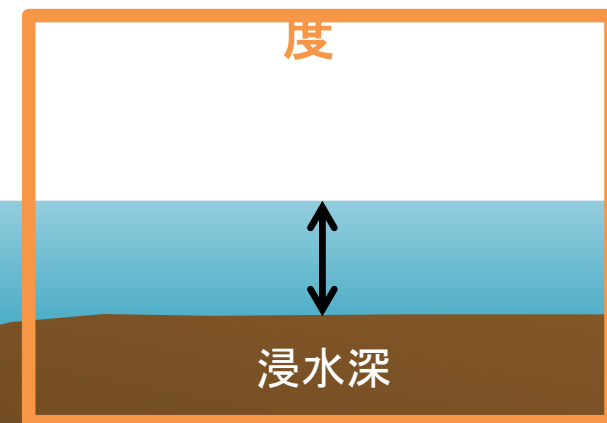


- モンテカルロ法により断層運動の不確定性を考慮し、津波伝播遡上解析の繰り返し計算が求められる

⇒ 確率論的津波ハザード解析の高速化が不可欠

## 播遡上解析

### 3. 津波ハザード強度



断層運動の推定に伴う  
不確定性

津波ハザード曲線  
(浸水深とその発生確率の関係)

# 背景・目的

## 【背景】

南海トラフ地震に対する事前対策を検討するには、その広大な影響域を対象に、断層運動の不確定性を考慮した確率論的津波ハザード解析(地震の発生確率は1.0)が必須

- 計算コストが大きい津波伝播遡上解析を繰り返し実施する必要性
- 陸域内の浸水深の空間分布は、強い非線形を持ちながら極めて複雑に変動

## 【目的】

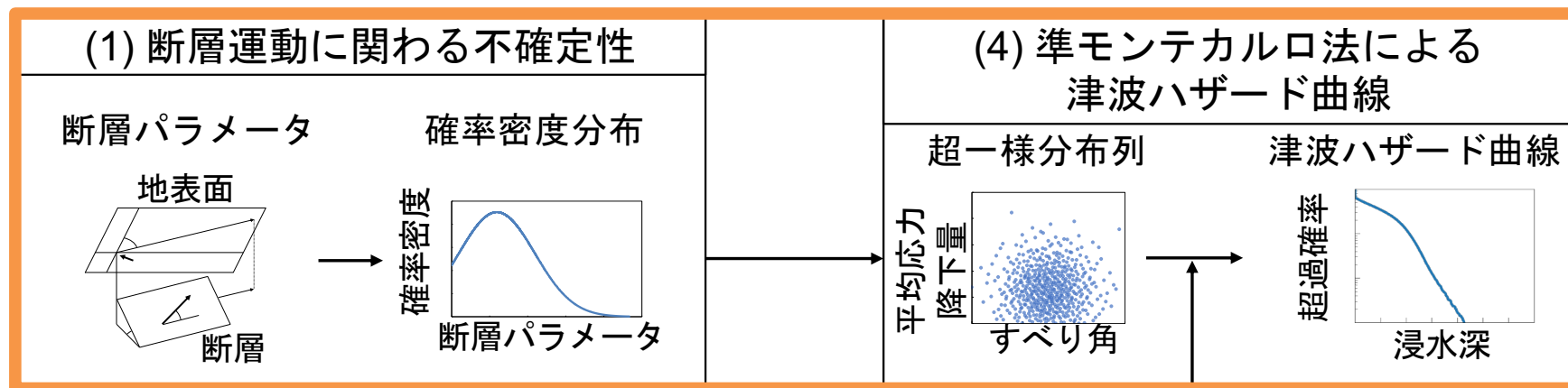
確率論的津波ハザード解析の計算コストの低減のため、

- Radial Basis Function Network(RBFネットワーク)に基づいて、断層パラメータと対象地点における浸水深の関係を近似した簡易モデルを作成
- 準モンテカルロ法を用いて、確率計算に要する試行回数を低減

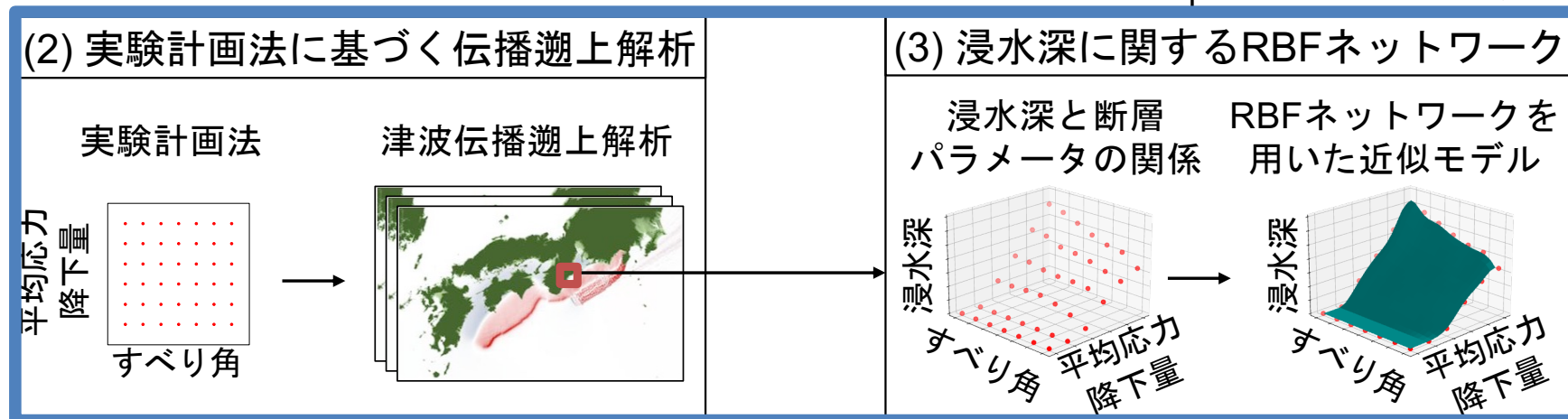
# 提案する確率論的津波ハザード解析

## 提案する確率論的津波ハザード解析の手順

B. 準モンテカルロ法



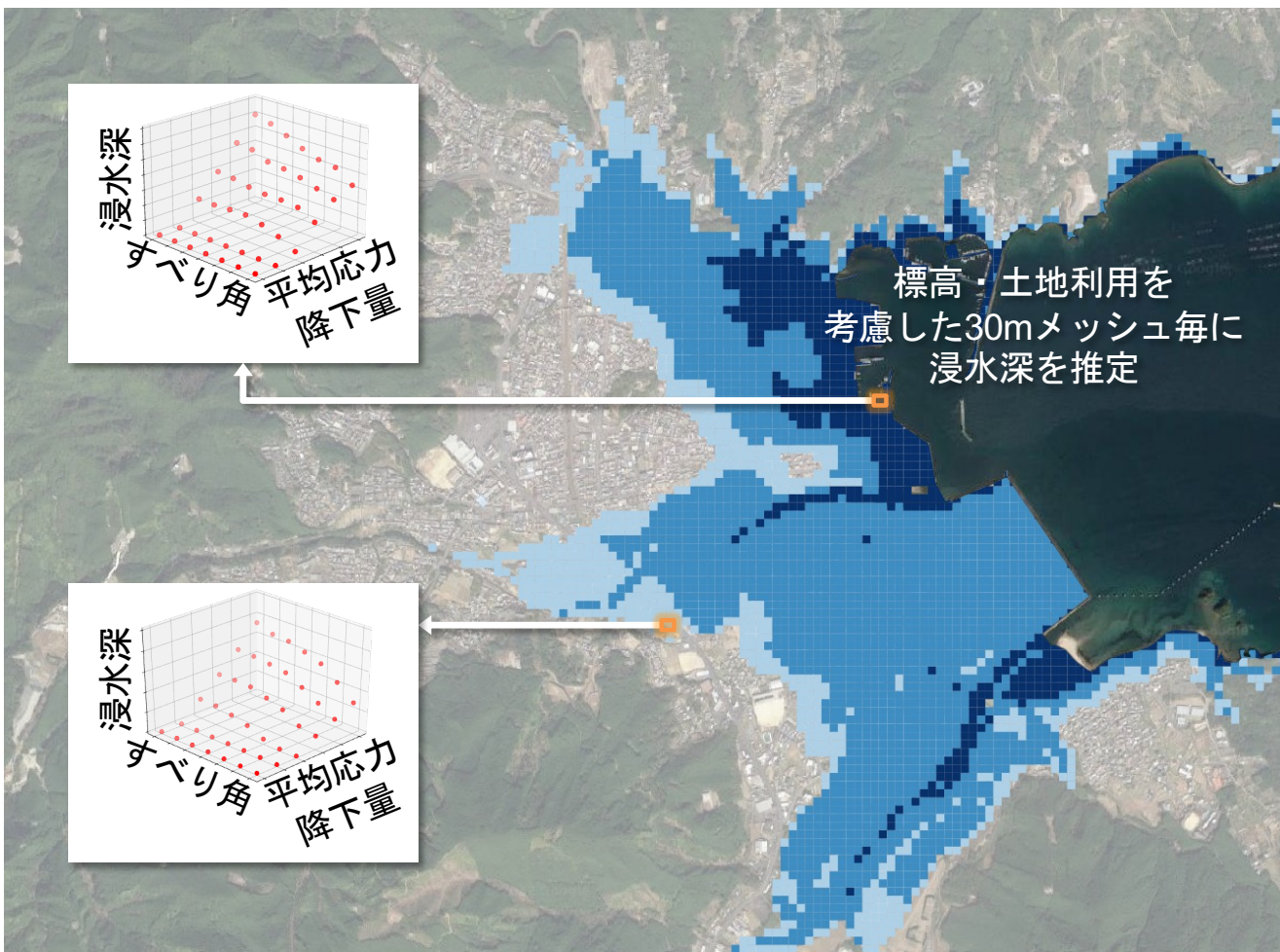
A. RBFネットワーク





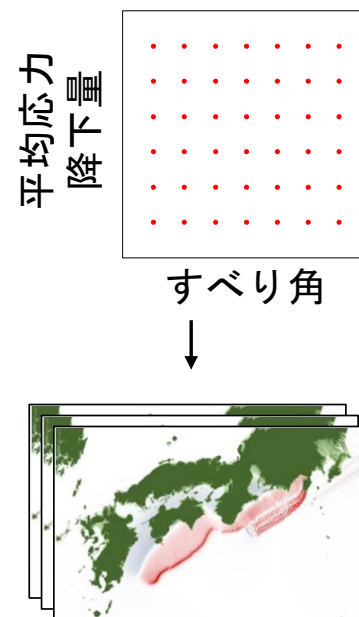
# 提案する確率論的津波ハザード解析

## 提案する確率論的津波ハザード解析の手順 (A. RBFネットワーク)



RBFネットワークによる近似モデルを用いた浸水深の空間分布の推定

1. 実験計画法に基づいた比較的少数の津波伝播遡上解析

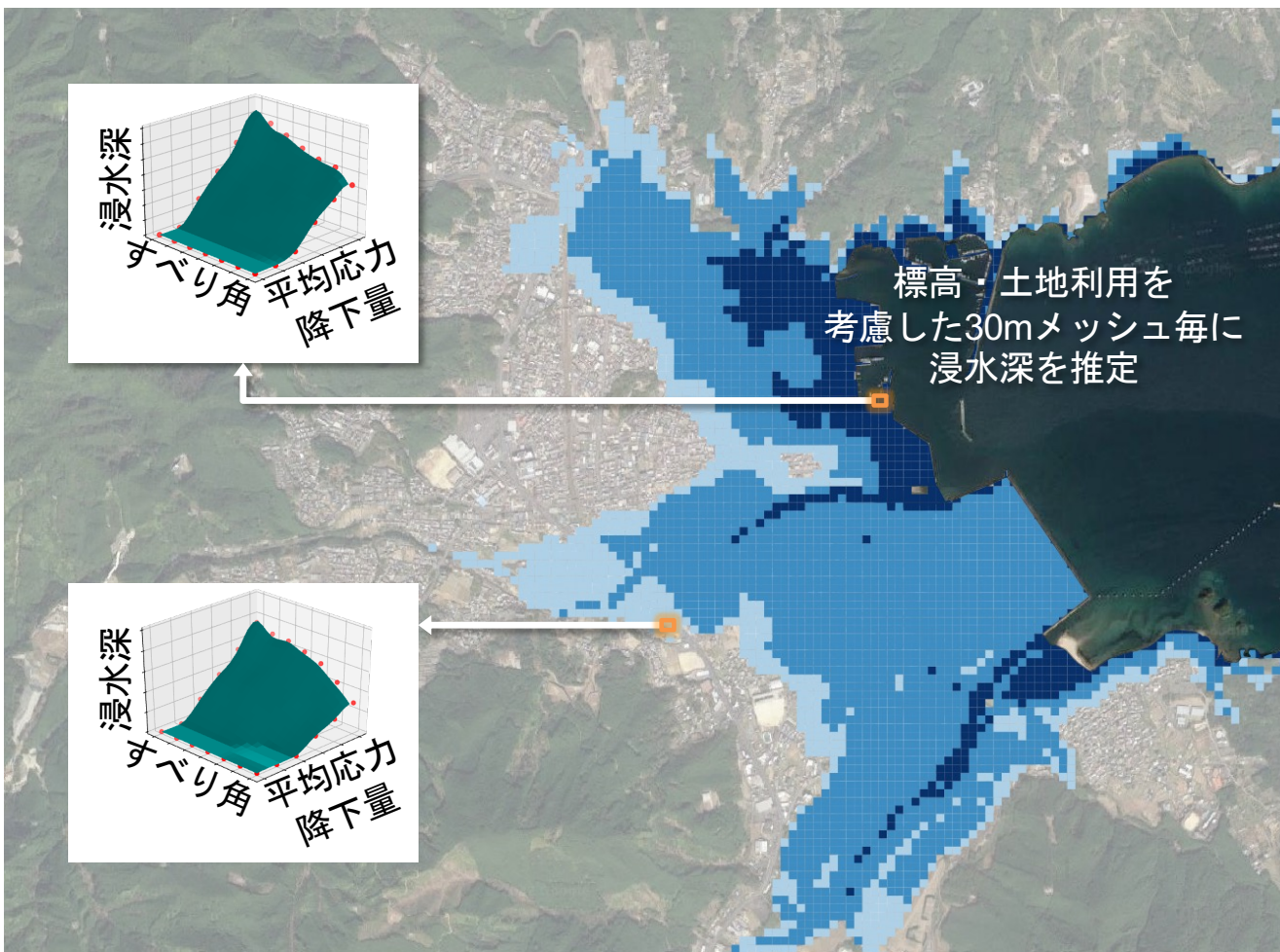


断層パラメータの不確定性 (変動範囲) を考慮した実験計画法 (入力値の組み合わせ)

実験計画法に基づく津波伝播遡上解析

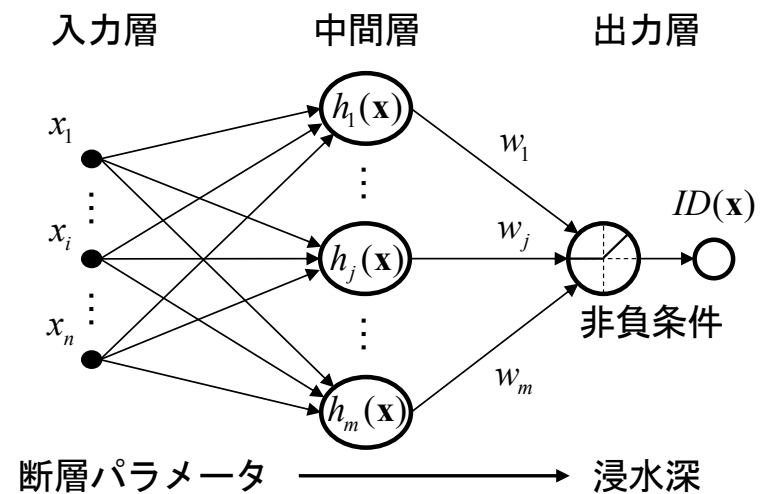
# 提案する確率論的津波ハザード解析

## 提案する確率論的津波ハザード解析の手順 (A. RBFネットワーク)



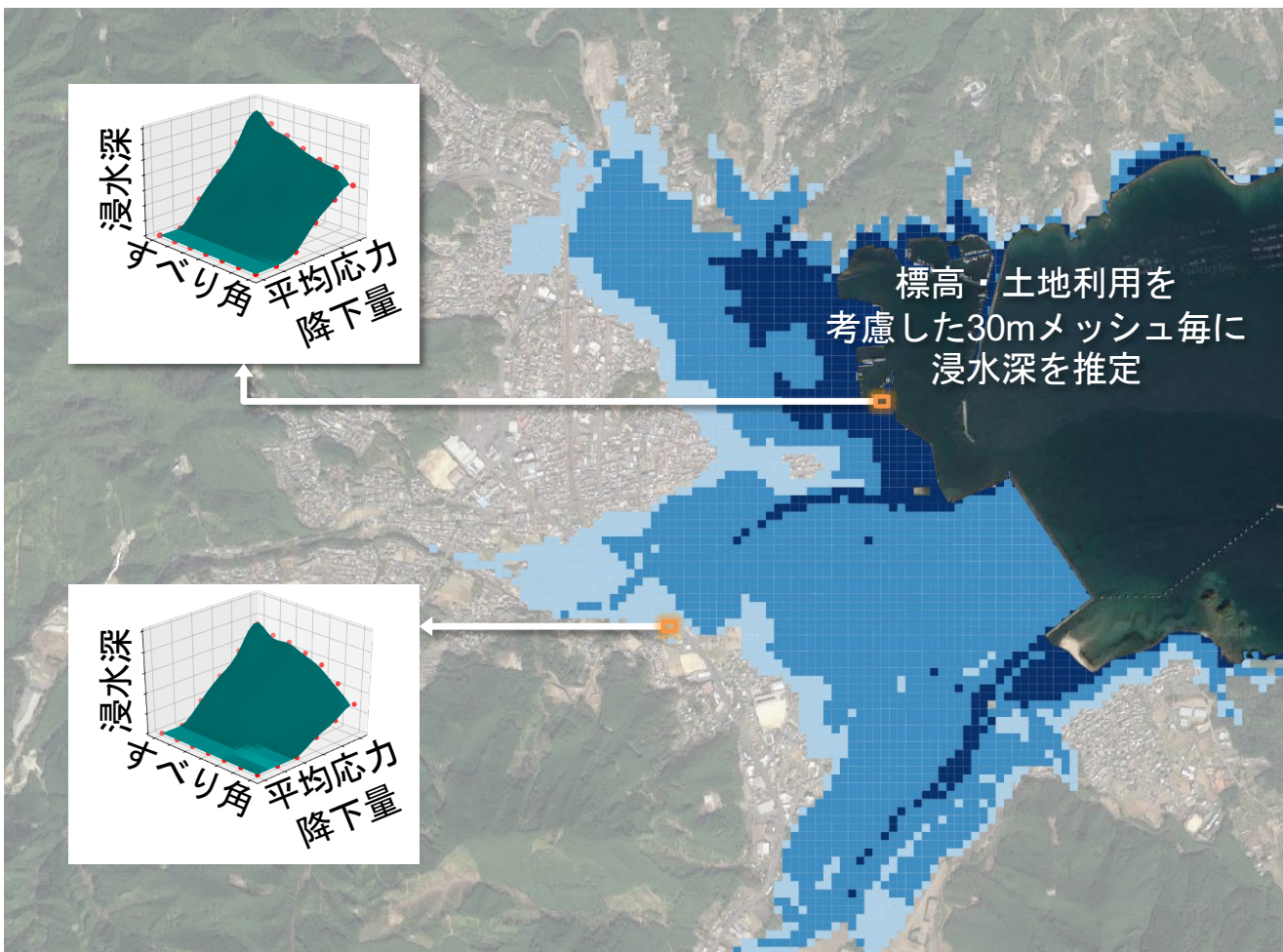
RBFネットワークによる近似モデルを用いた浸水深の空間分布の推定

1. 実験計画法に基づいた比較的少数の津波伝播遡上解析
2. RBFネットワークに基づく浸水深に関する近似モデル → 計算コスト低減



# 提案する確率論的津波ハザード解析

## 提案する確率論的津波ハザード解析の手順 (A. RBFネットワーク)



RBFネットワークによる近似モデルを用いた浸水深の空間分布の推定

1. 実験計画法に基づいた比較的少数の津波伝播遡上解析
2. RBFネットワークに基づく浸水深に関する近似モデル → 計算コスト低減

津波伝播遡上解析      RBFネットワークによる近似モデル

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^2} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^2} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

連立偏微分方程式

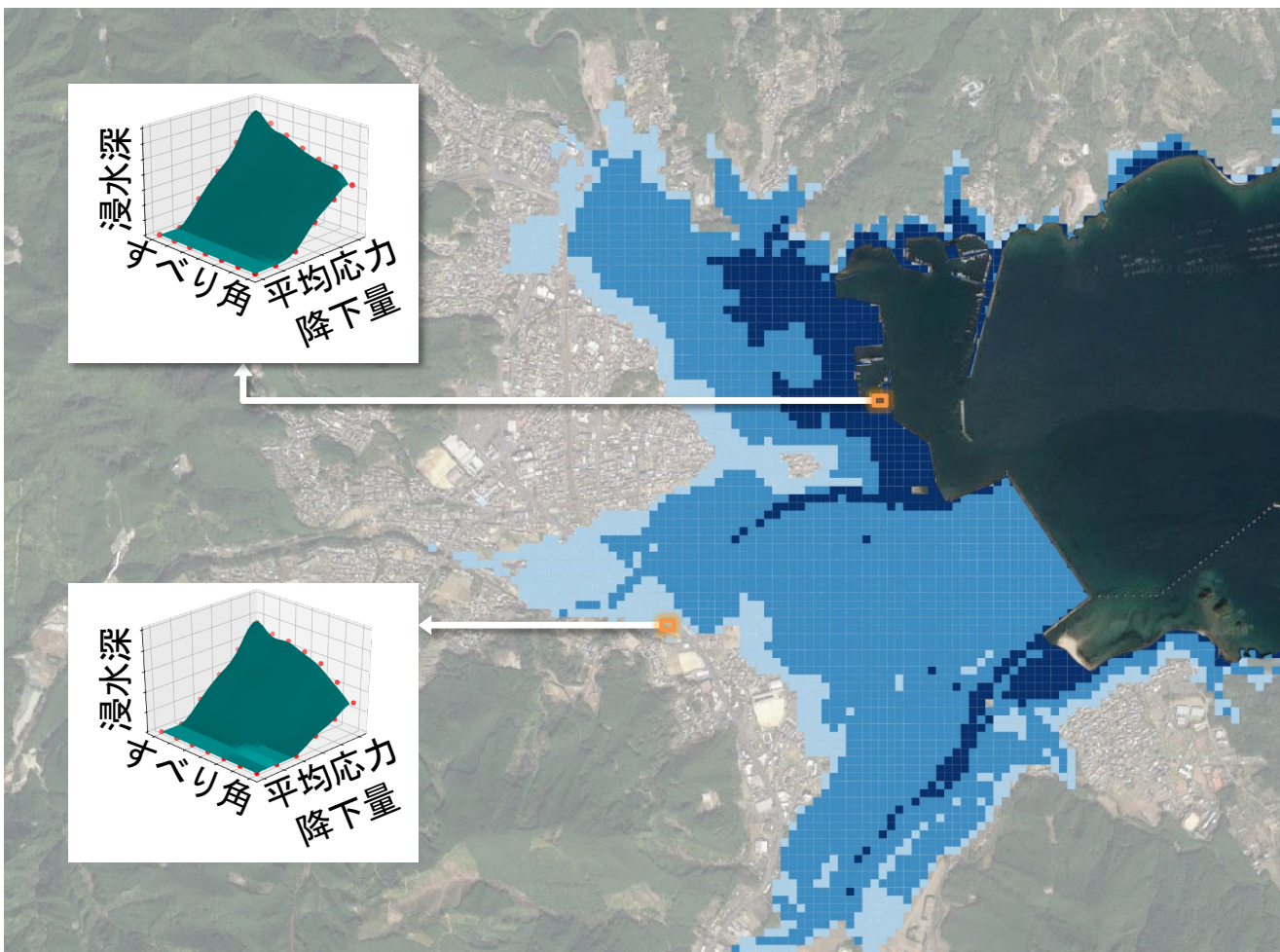


$$\mathbf{w} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{y}$$

逆行列計算

# 提案する確率論的津波ハザード解析

## 提案する確率論的津波ハザード解析の手順 (B. 準モンテカルロ法)



準モンテカルロ法を用いた  
津波ハザード曲線の算定

### 1. 田村・白川(1999)による超一様分布列

一般化Faure列:

$$\begin{cases} z_n^{(1)} = \frac{a_0}{b} + \frac{a_1}{b^2} + \dots + \frac{a_{r-1}}{b^r} + \frac{a_r}{b^{r+1}} \\ z_n^{(i \geq 2)} = \frac{a_0^{(i)}}{b} + \frac{a_1^{(i)}}{b^2} + \dots + \frac{a_{r-1}^{(i)}}{b^r} + \frac{a_r^{(i)}}{b^{r+1}} \end{cases}$$

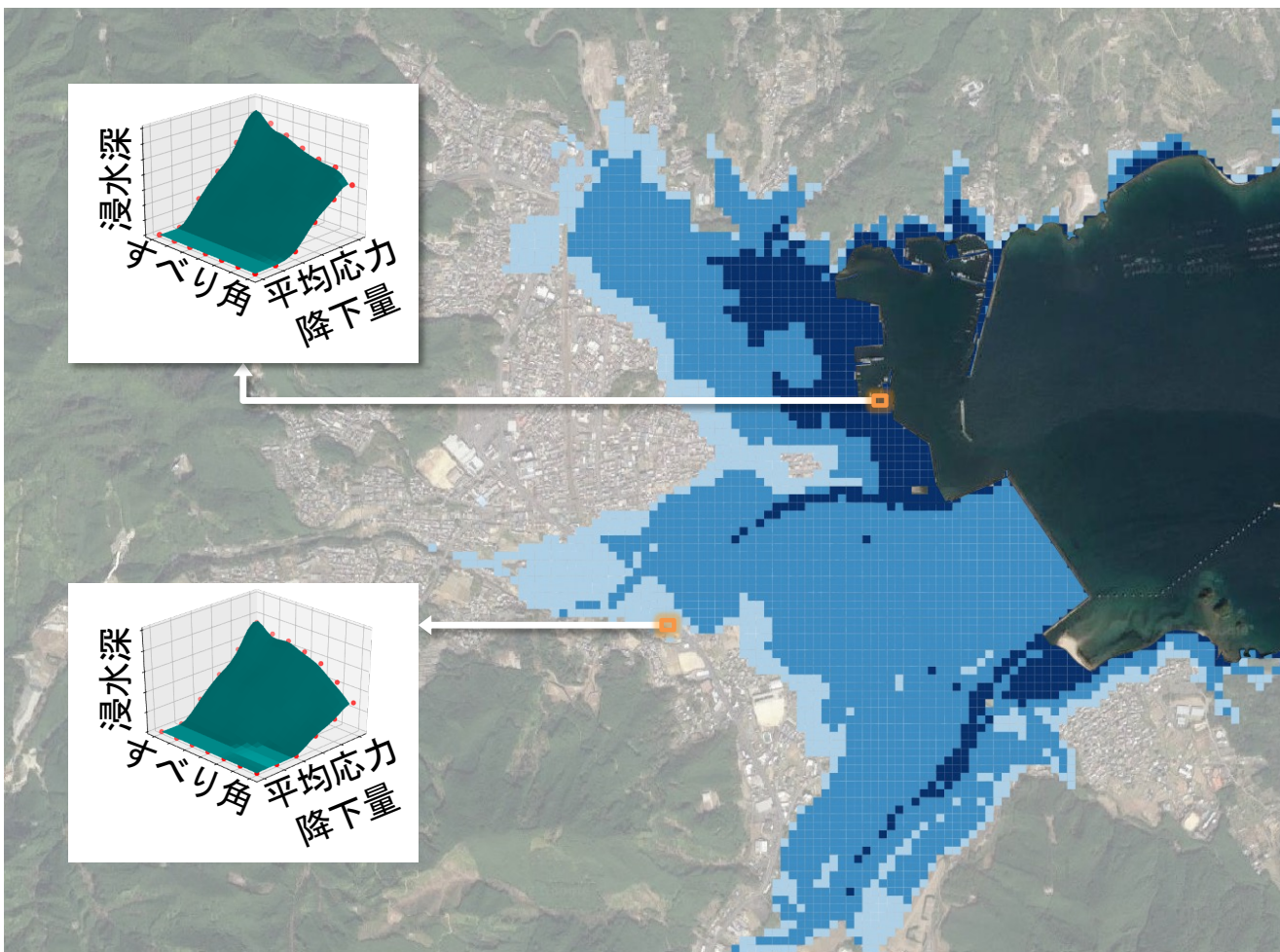
ここに

$$n = a_r b^r + a_{r-1} b^{r-1} + \dots + a_1 b + a_0 \quad p_i = q^i \pmod{b}$$

$$\begin{pmatrix} a_0^{(i)} \\ a_1^{(i)} \\ \vdots \\ a_r^{(i)} \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} {}_0 C_0 & {}_1 C_0 & {}_2 C_0 & \dots \\ & {}_1 C_1 & {}_2 C_1 & \dots \\ & & {}_2 C_2 & \dots \\ & & & \ddots \end{pmatrix}^{i-1} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_r \end{pmatrix} \pmod{b}$$

# 提案する確率論的津波ハザード解析

## 提案する確率論的津波ハザード解析の手順 (B. 準モンテカルロ法)



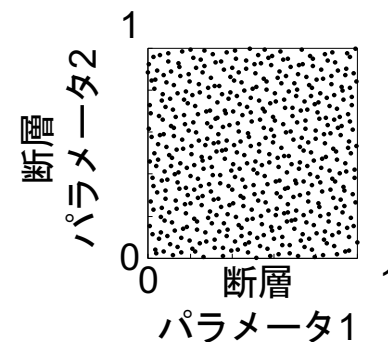
準モンテカルロ法を用いた  
津波ハザード曲線の算定

### 1. 田村・白川(1999)による超一様分布列

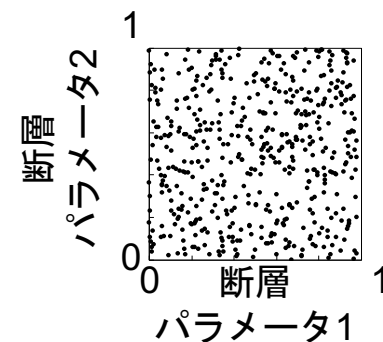
準モンテカルロ法とモンテカルロ法の比較  
(2つの断層パラメータ・500サンプル)

→ 準モンテカルロ法は断層パラメータの  
組み合わせ(入力値)を網羅的に生成可能

準モンテカルロ法に  
用いる一般化Faure列

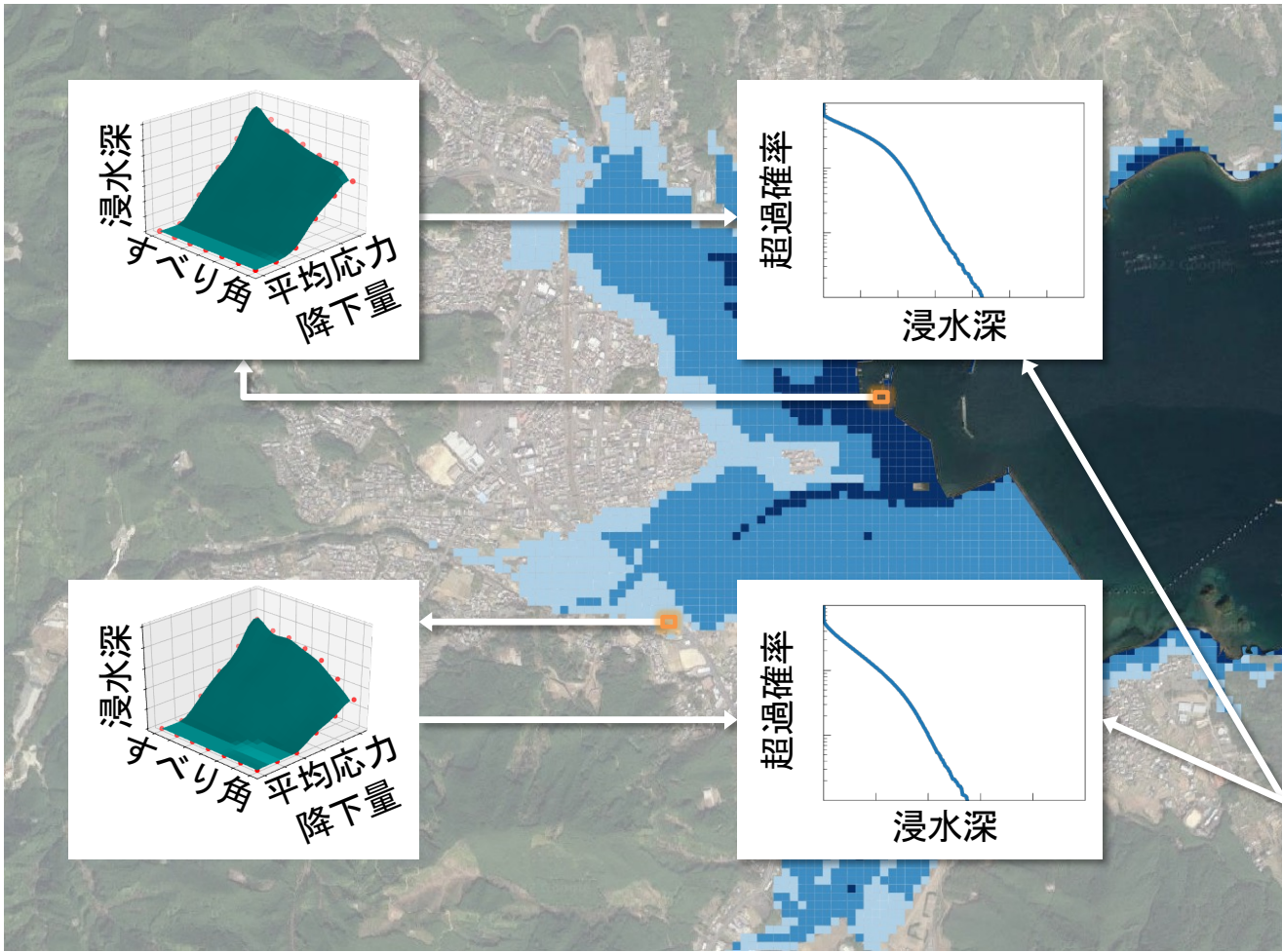


モンテカルロ法に  
用いる疑似乱数



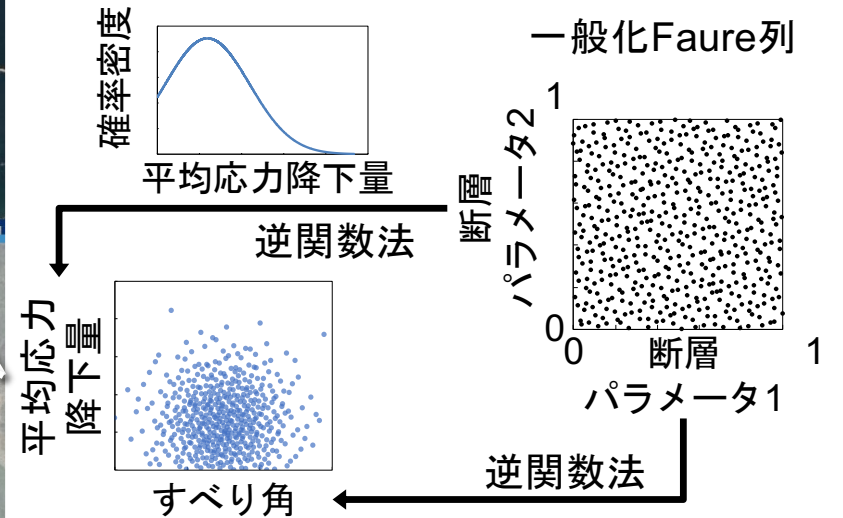
# 提案する確率論的津波ハザード解析

## 提案する確率論的津波ハザード解析の手順 (B. 準モンテカルロ法)



準モンテカルロ法を用いた  
津波ハザード曲線の算定

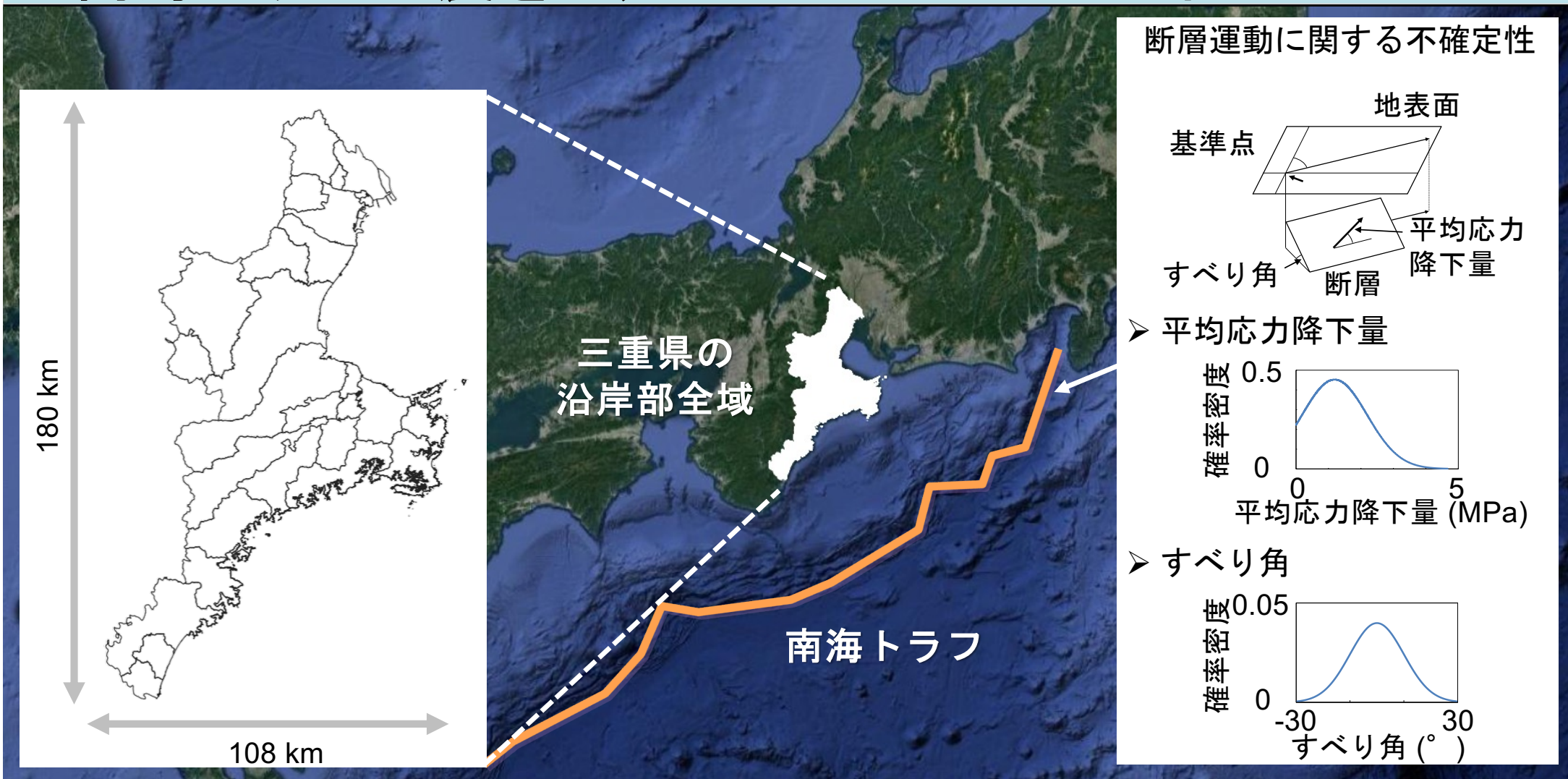
1. 田村・白川(1999)による超一様分布列
2. 断層パラメータの不確定性を考慮した津波ハザード曲線



# 目次

1. 背景・目的
2. RBFネットワークと準モンテカルロ法を用いた確率論的津波ハザード解析手法
3. ケーススタディ：南海トラフ地震を想定した災害廃棄物量のリスク評価への適用
4. まとめ

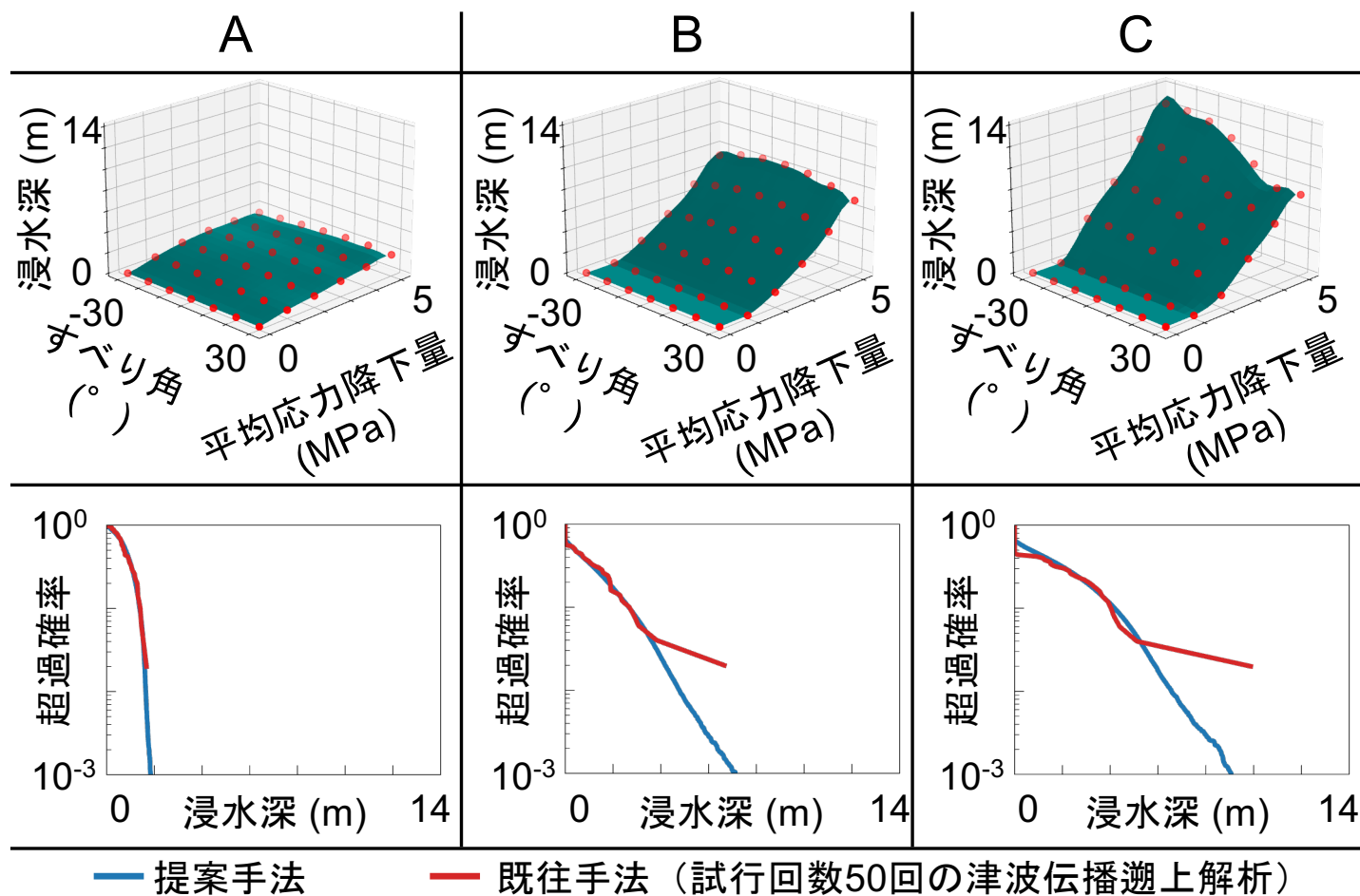
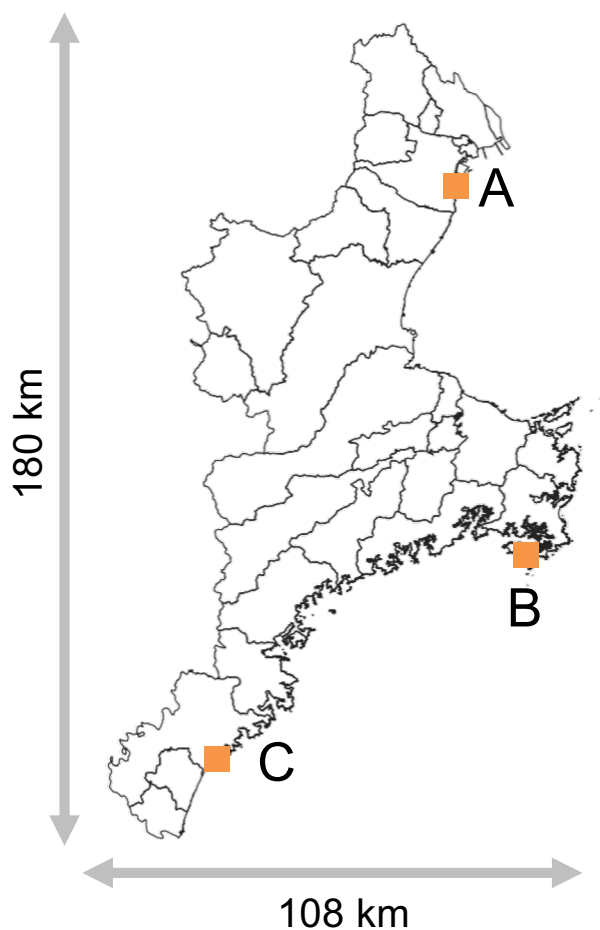
# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ





# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

RBFネットワークによる近似モデルと津波ハザード曲線 → 高精度な算定



# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

津波ハザード曲線の算定に要する計算時間 → 計算コストの省力化が可能

➤ 使用計算機: Intel Xeon(R) Gold 6146 CPU @ 3.20GHz × 24

提案手法

既往手法

計算時間: **18日**

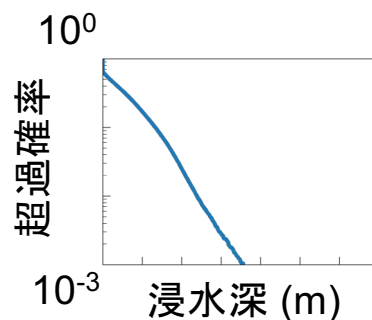
計算時間: **25日**

42回の津波伝播遡上解析

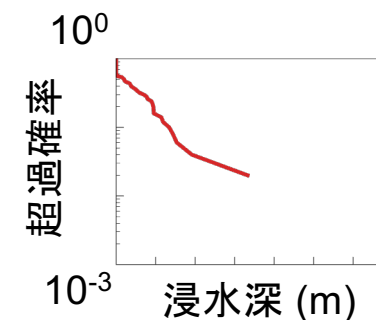
50回の津波伝播遡上解析

提案手法

↓  
低頻度な領域( $10^{-3}$ )  
を含む津波ハザード曲線

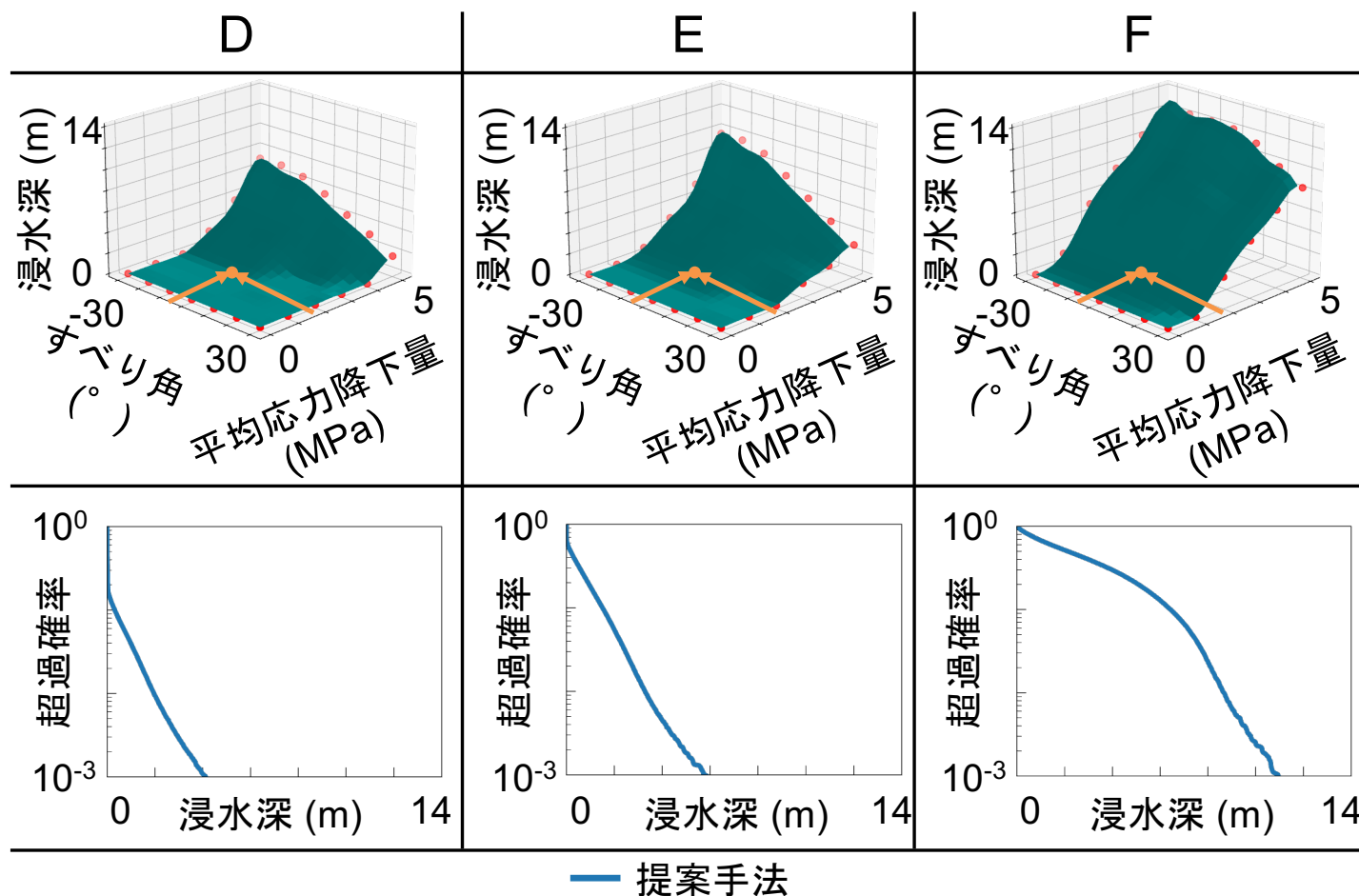
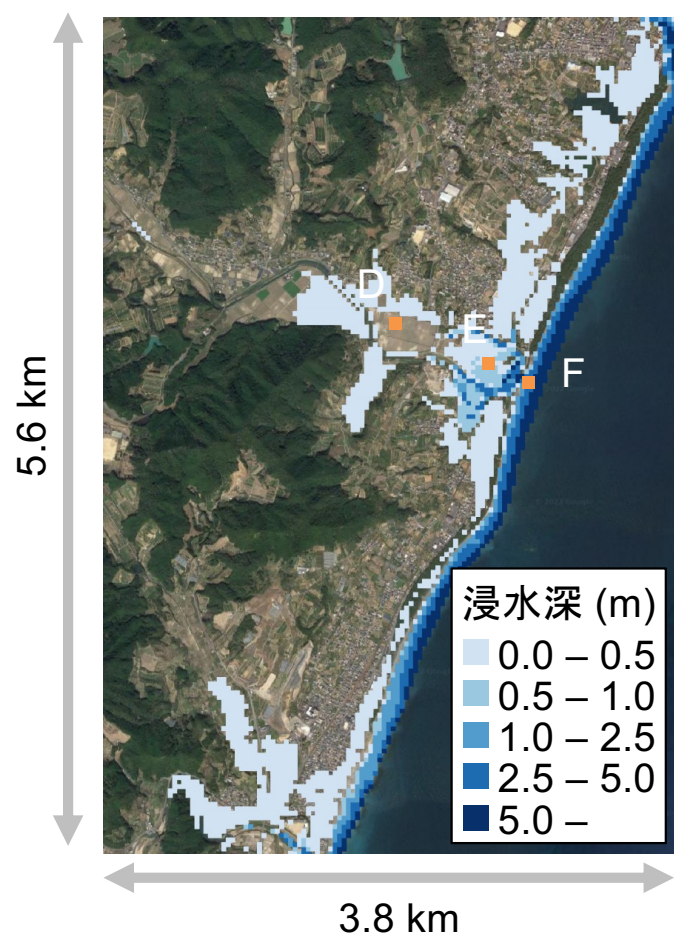


↓  
津波ハザード曲線



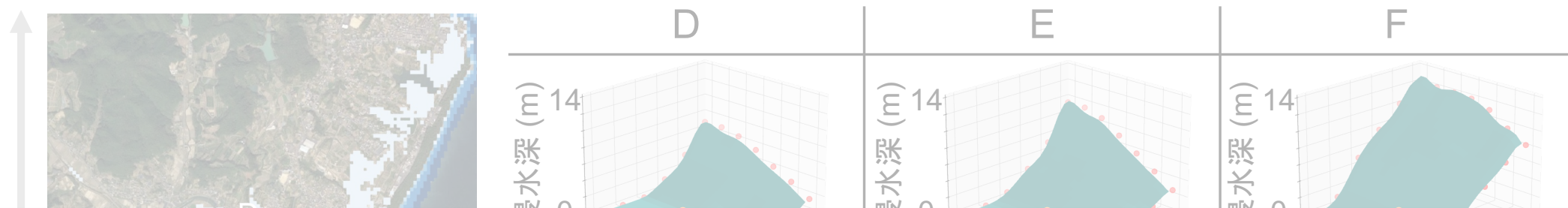
# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

三重県沿岸部における浸水深の空間分布 → 精緻にかつ高速に算定可能

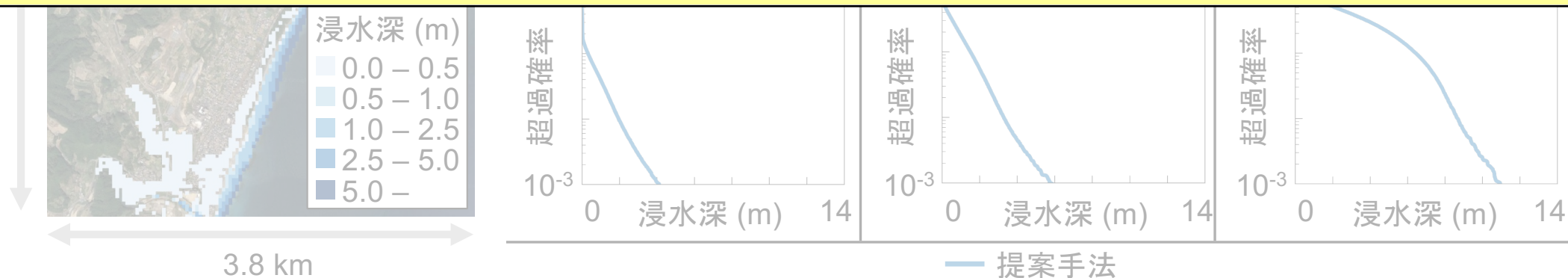


# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

三重県沿岸部における浸水深の空間分布 → 精緻にかつ高速に算定可能



RBFネットワークおよび準モンテカルロ法を用いた確率論的津波ハザード解析では，三重県沿岸部全域を対象に浸水深の空間変動マップを精緻にかつ高速に算定可能



# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

## 災害廃棄物量のリスク評価への適用

### ➤ 災害廃棄物量のリスク算定式

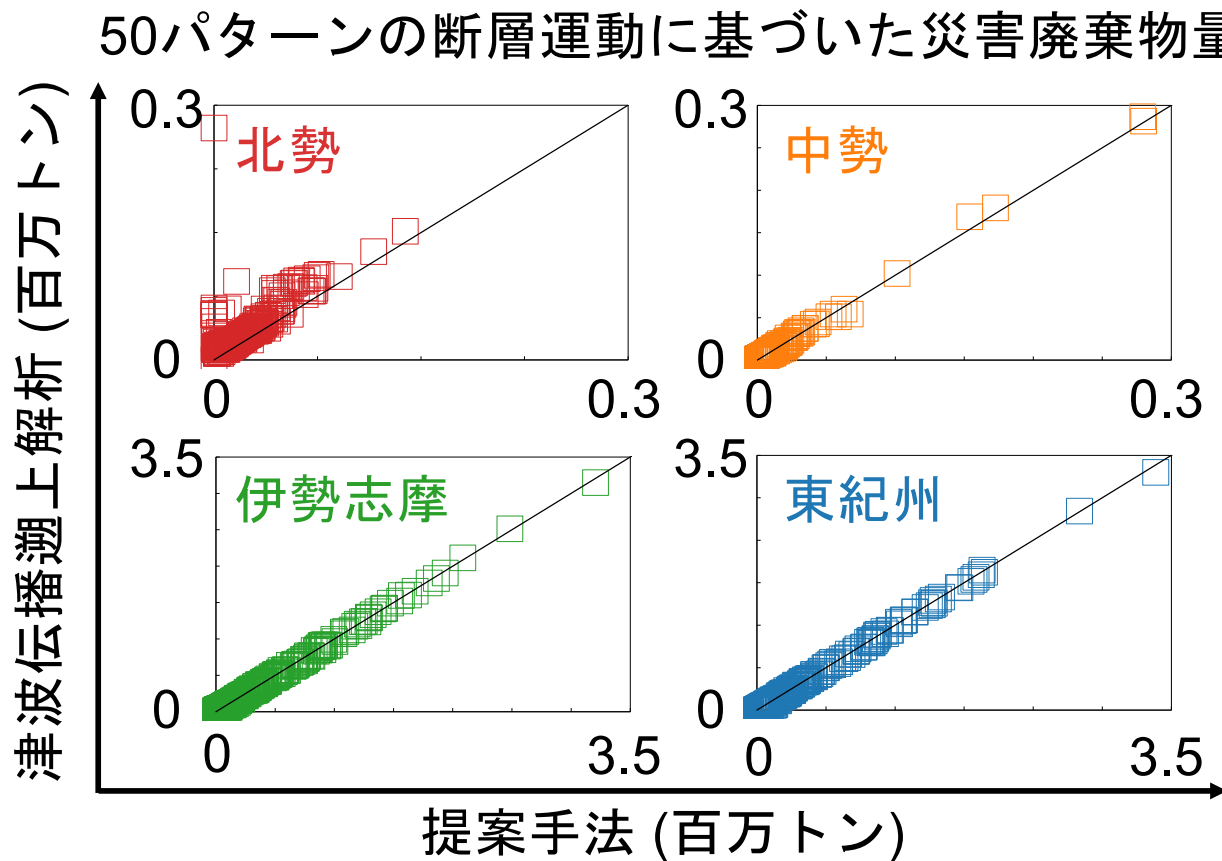
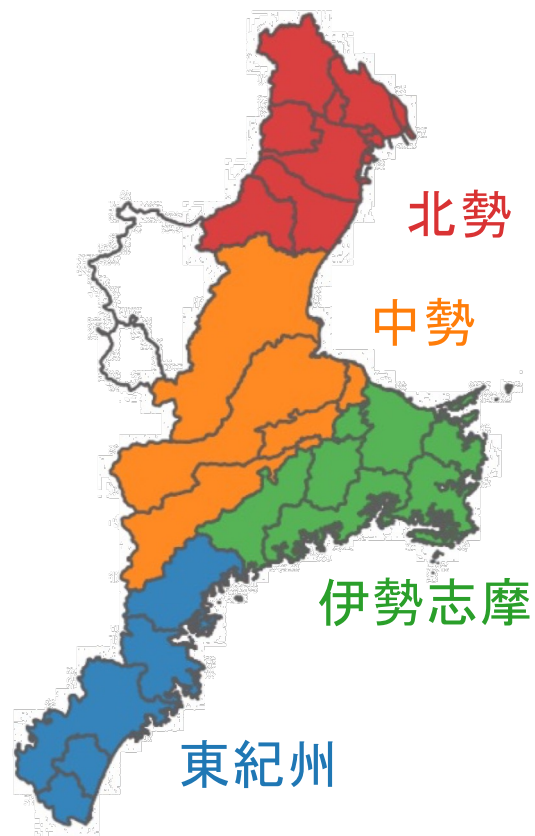
$$Q_A = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_A} C_{ds_i} \cdot \int P_{f_j}(DS_j = ds_i | H_j = h_j) \cdot \left| \frac{dG_{H_j}}{dh_j} \right| dh_j$$

災害廃棄物量のリスク = 被災建築物から生じる廃棄物量 × 建築物の津波脆弱性（フラジリティ曲線） × 提案手法による津波ハザード

# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

## 災害廃棄物量のリスク評価への適用

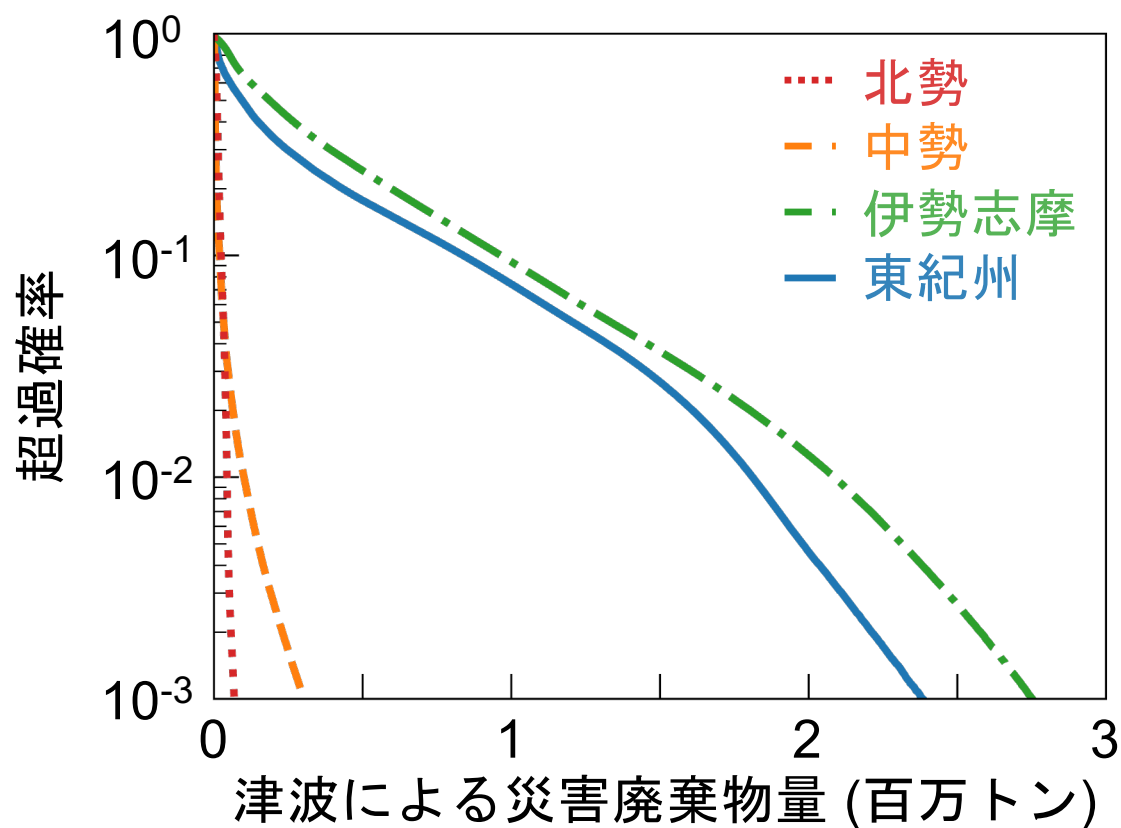
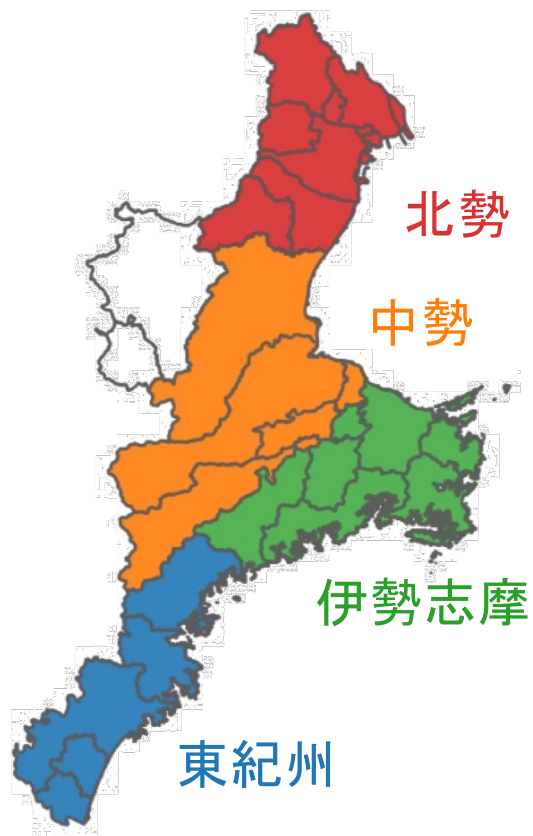
- 提案手法および津波伝播遡上解析によるリスク評価結果の比較 → 高精度な推定  
50パターンの断層運動に基づいた災害廃棄物量



# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

## 災害廃棄物量のリスク評価への適用

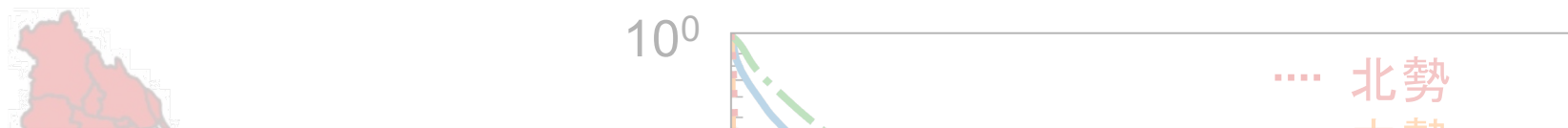
- 災害廃棄物量とその発生確率の関係（災害廃棄物量のリスクカーブ）



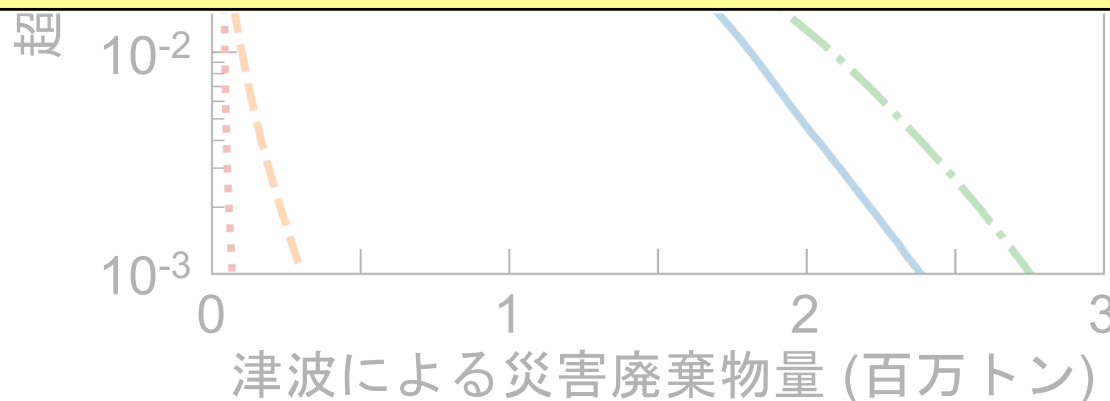
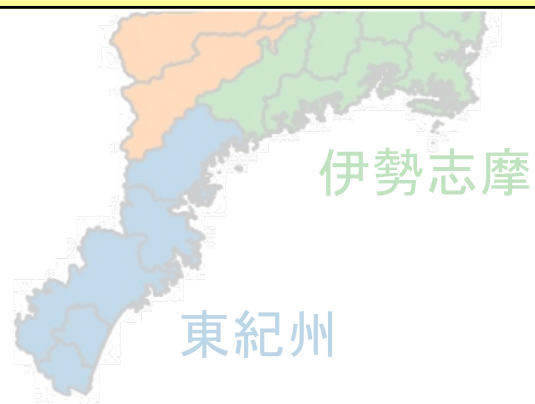
# 南海トラフ地震を想定したケーススタディ

## 災害廃棄物量のリスク評価への適用

- 災害廃棄物量とその発生確率の関係（災害廃棄物量のリスクカーブ）



提案する確率論的津波ハザード解析を適用することで、  
様々な断層シナリオや断層運動の不確定性を考慮して、  
三重県沿岸部での津波災害廃棄物量のリスク評価が可能となる





# まとめ

## 【結論】

1. 津波伝播遡上解析に要する計算コスト削減のため、RBFネットワークと準モンテカルロ法を用いた確率論的津波ハザード解析を提案
2. 提案手法を用いた確率論的津波ハザード解析では、三重県沿岸部全域を対象に浸水深の空間変動マップを精緻にかつ高速に算定可能
3. 提案する確率論的津波ハザード解析を適用することで、様々な断層シナリオや断層運動の不確定性を考慮して、三重県沿岸部での災害廃棄物量のリスク評価が可能

## 【謝辞】

- 越村俊一教授      東北大学災害科学国際研究所
- 石橋寛樹助教      日本大学工学部土木工学科
- 小島貴之様      日本工営株式会社