

# CRSPモデルを用いた確率的津波ハザード解析

福谷 陽

(fukutani@irides.tohoku.ac.jp)

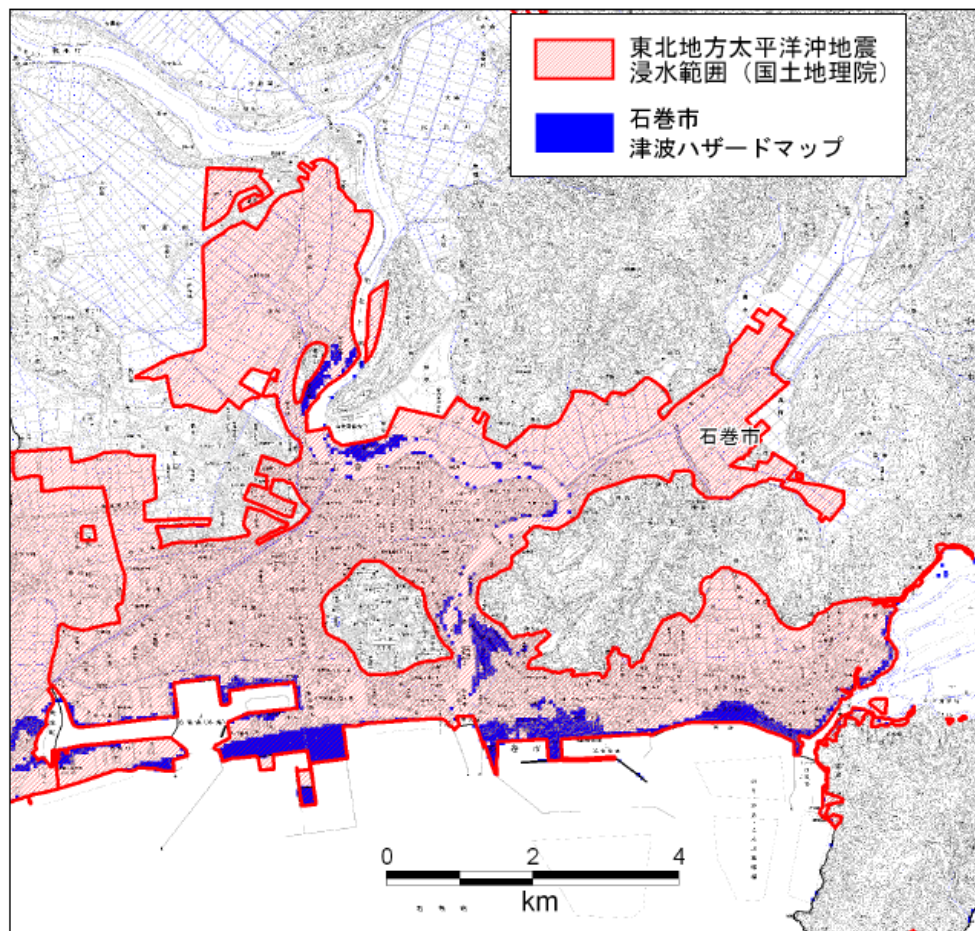
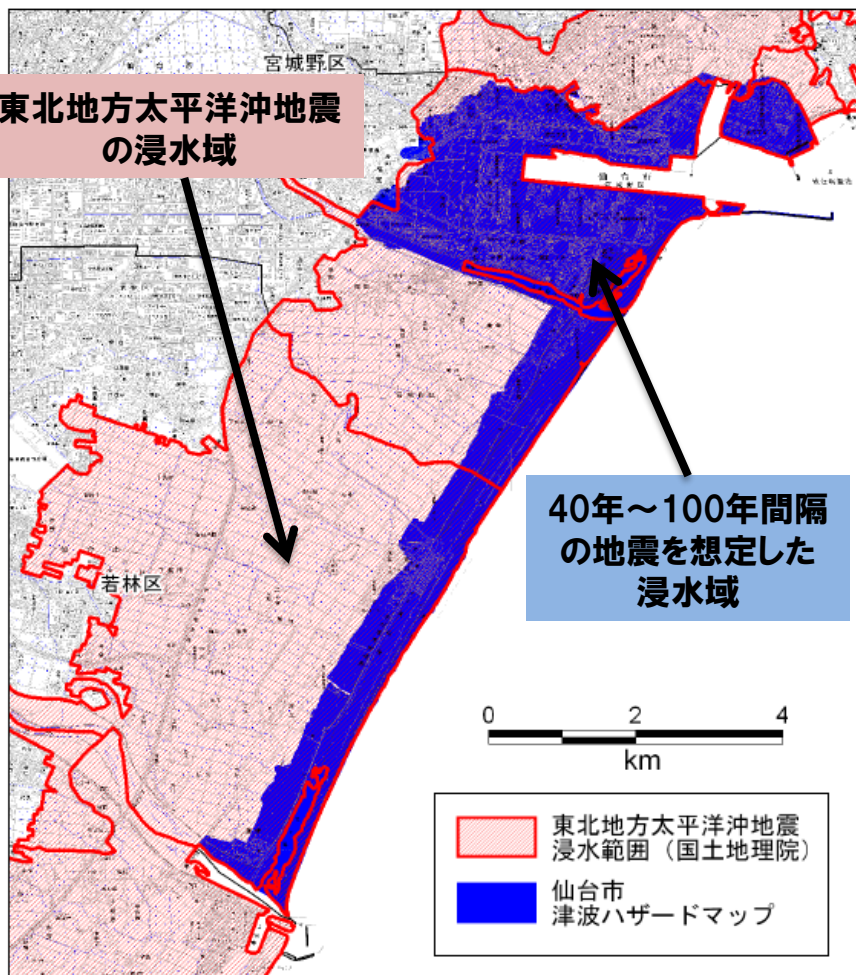
Research Associate

Earthquake-Induced Tsunami Risk Research Field (Tokio marine),

Endowed Research Division,

International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

## Comparison between inundation area in 3.11 tsunami and tsunami hazard map



(出典)・東北地方太平洋沖地震浸水域: 国土地理院資料より作図  
・ハザードマップ: 仙台市「仙台市津波ハザードマップ」、石巻市「石巻市津波ハザードマップ」

Cabinet Office (2011)

ハザードマップはある一つのケースを想定した確定的なマップに過ぎない  
 今後は、不確実性情報を含めた確率的な津波ハザード評価に基づくハザードマップが必要

In order to develop the stochastic tsunami hazard map, first of all, we need to evaluate stochastic tsunami wave height by using tsunami hazard curve.

津波シミュレーションによる沿岸波高

+

津波シミュレーション結果に含まれる不確実性の評価

There are two kinds of uncertainties that are known generally in the engineering field.

(Probability Concepts in Engineering (1975))

### ◆ 認識論的不確実性

- 現実に関する知識が不十分または不完全であるために、  
実現象を完全にモデル化できないことに起因する不確実性。

- 相違するパターンをロジックツリーで評価

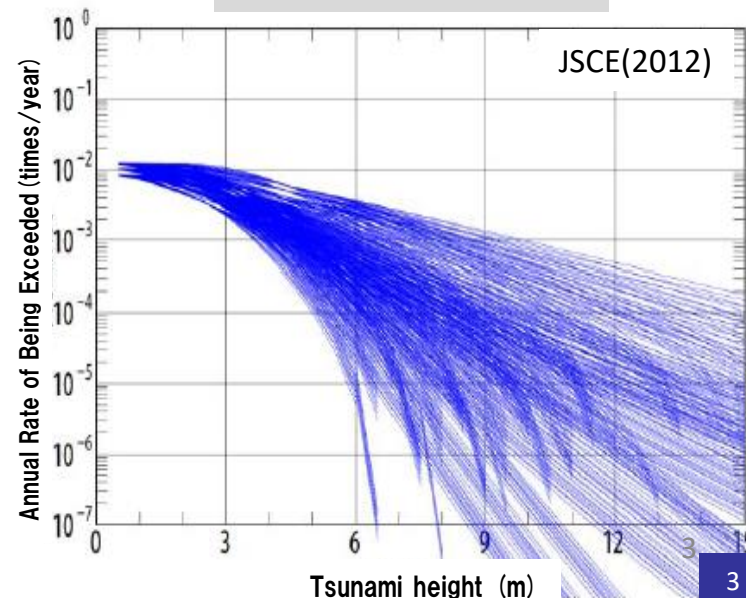
### ◆ 偶然的な不確実性

- シミュレーションと観測データの間で生じる不確実性  
- シミュレーションと観測データの差を直接的に定量化する  
(標準偏差などを計算する)

(Pacific Gas & Electric Company (2010))



Tsunami hazard curve





In this study, we included the lessons learned from the 3.11 Tohoku earthquake into both **Epistemic uncertainty** and **Aleatory uncertainty**

## ◆ 認識論的不確実性

※ Lessons learned from the 3.11 Tohoku earthquake

※ CRSP model (Liu et al.(2006))を使用することで、これまで発生していないすべり量を持つ多くの断層モデルを評価

## ◆ 偶然的な不確実性

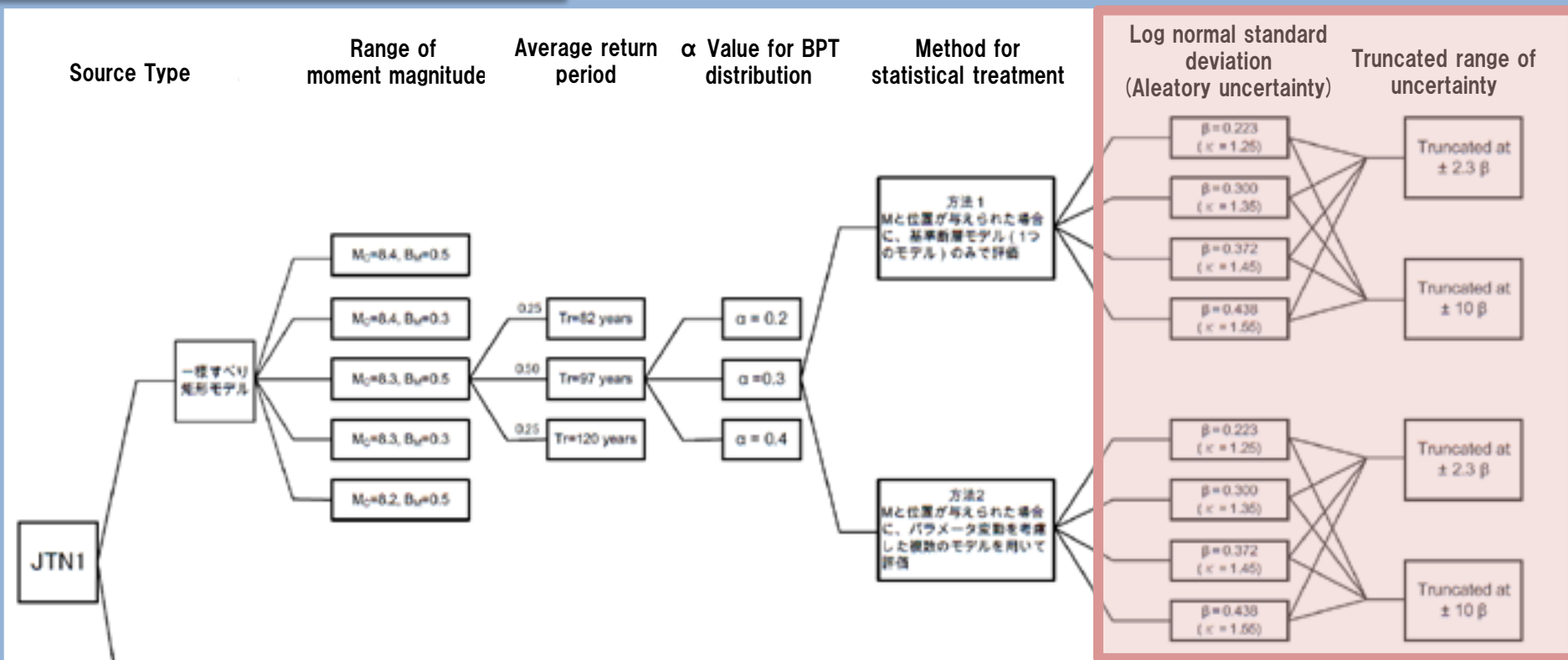
※ 東北地方太平洋沖地震の観測データとシミュレーション結果の差を定量的に評価。具体的には、相田のKを使用(JNES(2012))

※ 断層の動的な破壊効果をもたらす不確実性も評価(Fukutani et al.(in prep))



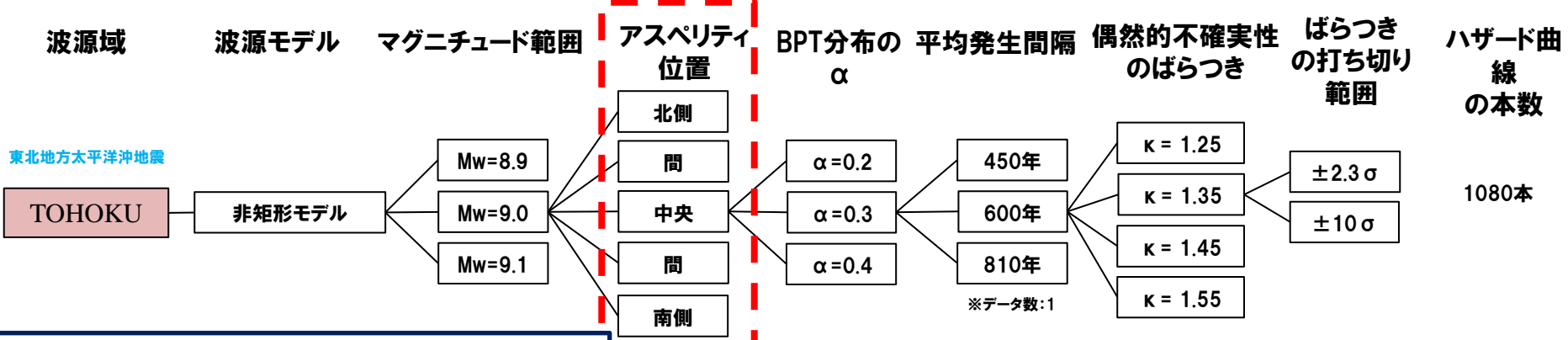
不確実性の種類によって、評価方法が異なる。

## ◆ 認識論的不確実性



Information for aleatory uncertainty is incorporated into the logic tree.

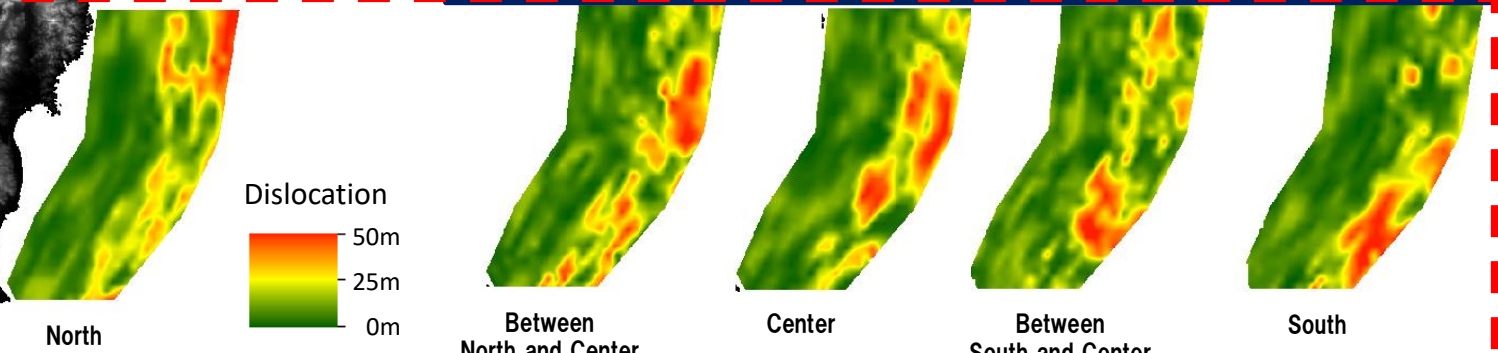
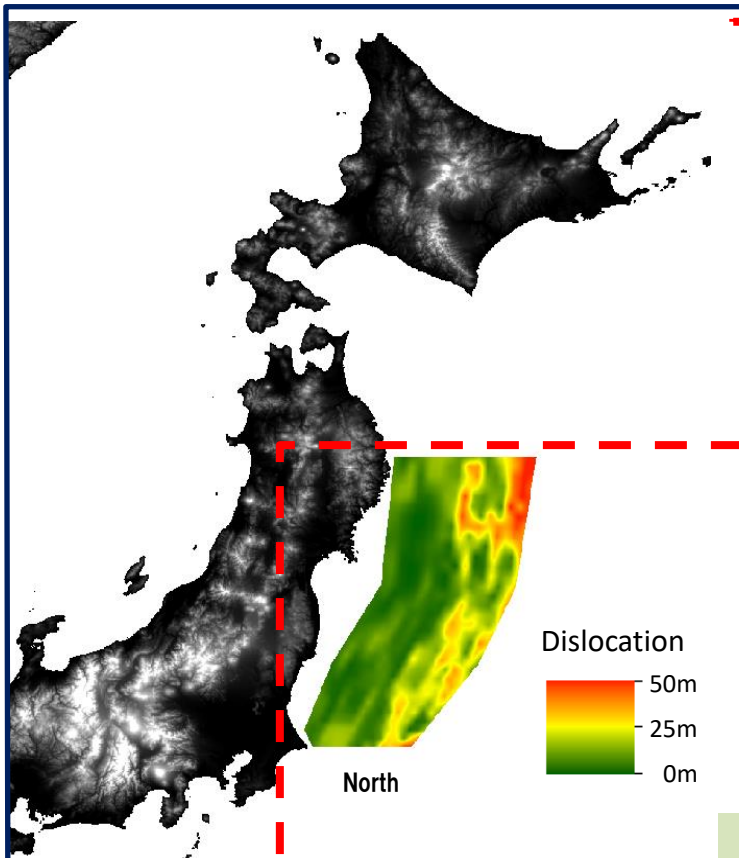
## ◆ 偶然的不確実性



- ◆ すべり量を変化させてマグニチュード範囲を変える(3ケース)
- ◆ アスペリティの位置を変える(5ケース)
- ◆ 発生間隔モデルのばらつき度合いを変える(9ケース)
- ◆ 偶然的不確実性の度合いを変える(4ケース)
- ◆ 偶然的不確実性の打ち切り範囲を変える(2ケース)



3 × 5 × 9 × 4 × 2 = 1080 ケースのハザードカーブが描ける



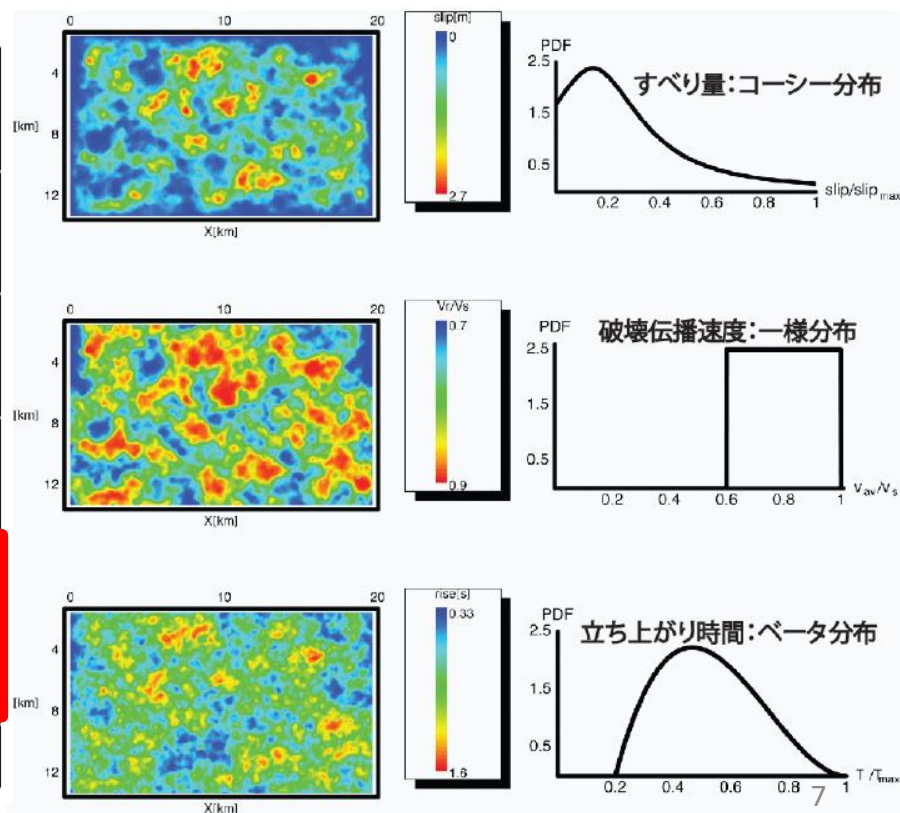
Distribution of dislocation generated from CRSP model

## CRSP (Correlated Random Source Parameter Method) Model とは

- ◆ 近年提案されている運動学的な断層モデル (Liu et al. (2006)) の一種
- ◆ すべり量と破壊伝播速度、すべり量とライズタイムの面的な相関を考慮できる
- ◆ 過去のすべり量分布を統計処理することにより得られた確率密度関数を基にして予測
- ◆ 断層面上で滑らかに変化したすべり量分布が得られる

表 4.1 アスペリティモデルと CRSP モデルの基本的な違い

	アスペリティ モデル	CRSP モデル
地震モーメント	必要	必要
すべり不均質性の取扱い	アスペリティ+背景領域	平均空間分布特性が $k^2$ に従う (ただし $k$ は波数)
すべり量	アスペリティと背景領域に各々設定	コーシー分布に従う (基本的にランダム)
応力降下量	アスペリティと背景領域に各々設定	断層面全体の平均量として設定
アスペリティの個数	経験則	設定必要なし
アスペリティの位置	累積変異量の大きい場所、あるいは想定	設定必要なし
破壊速度	一定	断層面上で変化 (Uniform 分布)



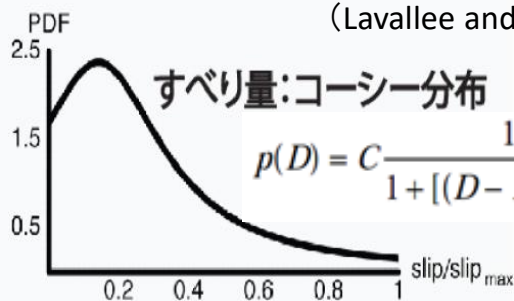
断層の幅・長さ(面積)(NIED(2013))

モーメントマグニチュードMwを決定(Uzu(2001))

平均すべり量を決定  
海溝型巨大地震については東北地方太平洋沖地震のデータから、深部と浅部のすべり量の比は**約3倍**(Ishii(2013))

CRSPModelで使用されるTruncated-Cauchy 分布

(Lavallee and Archuleta(2003,2005))



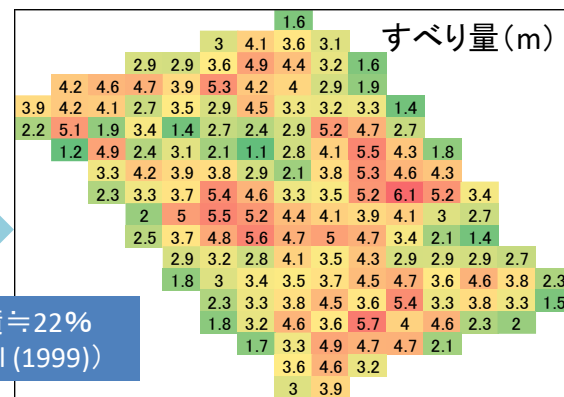
$$p(D) = C \frac{1}{1 + [(D - D_0)/\kappa]^2}, \quad 0 \leq D \leq D_{max}$$

2次元ガウス分布(ランダム分布)

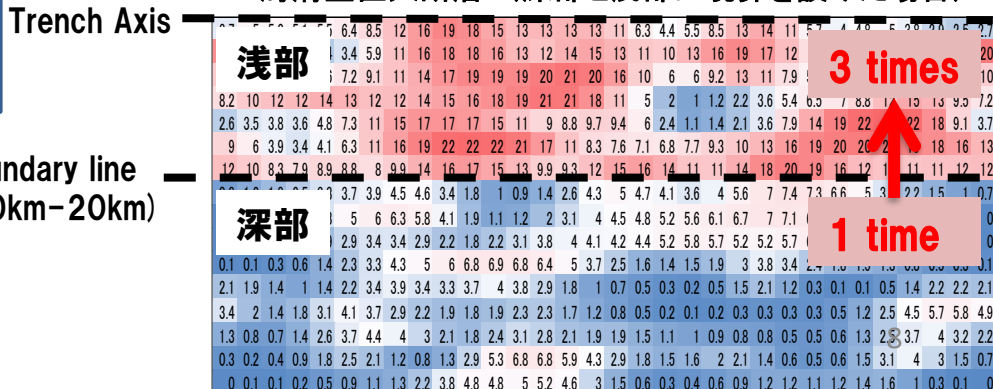
2次元波数空間でフィルタを乗じる

$$F(k_x, k_y) = \left\{ 1 + [(k_x C_L)^2 + (k_y C_W)^2] \right\}^{-\nu/2} \quad (\text{Mai and Beroza(2002)})$$

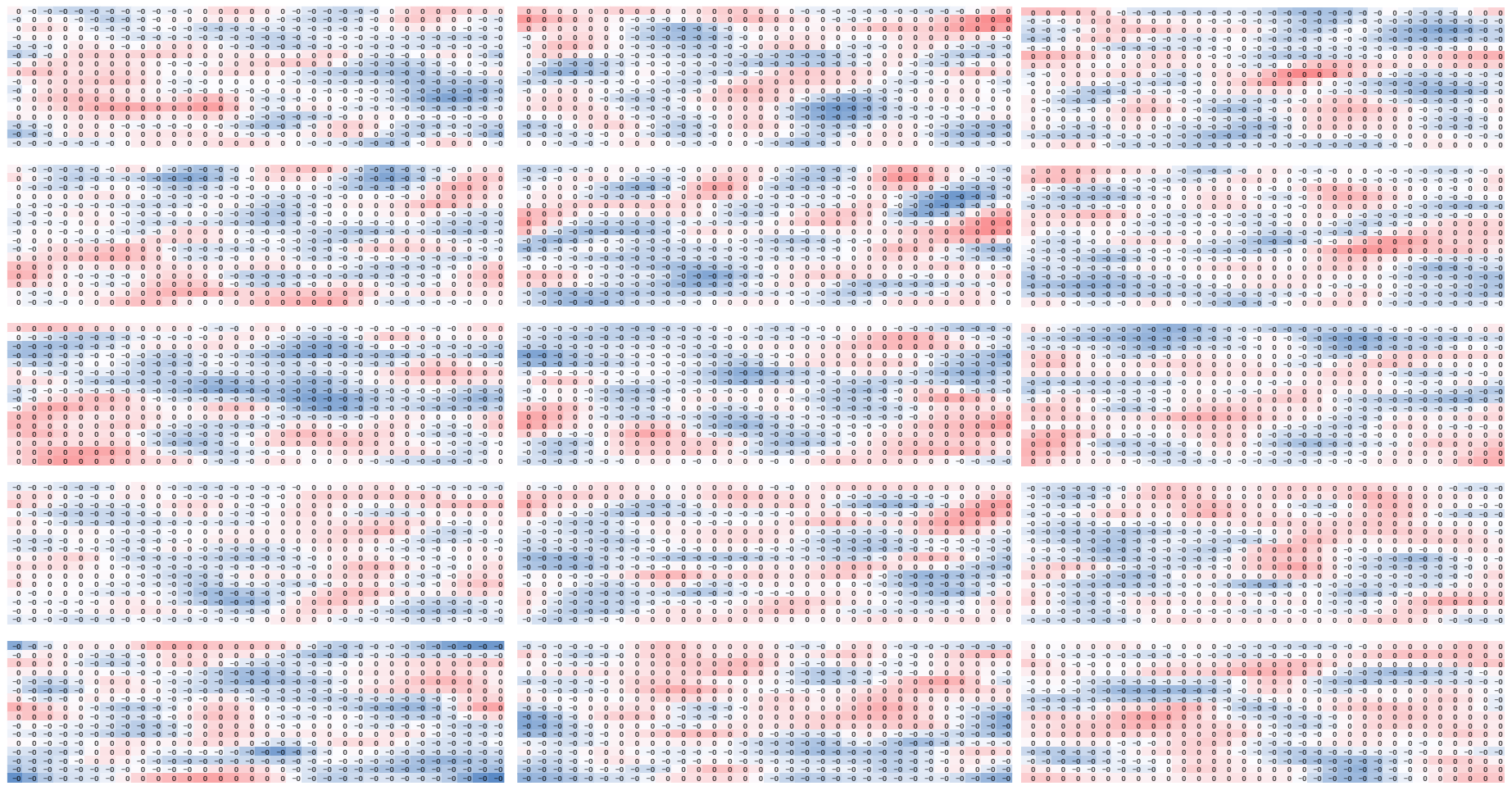
フィルタを乗じた2次元ガウス分布を得る



海溝型巨大断層 (深部と浅部に境界を設けた場合)



## ランダムに15ケースのすべり量分布を生成

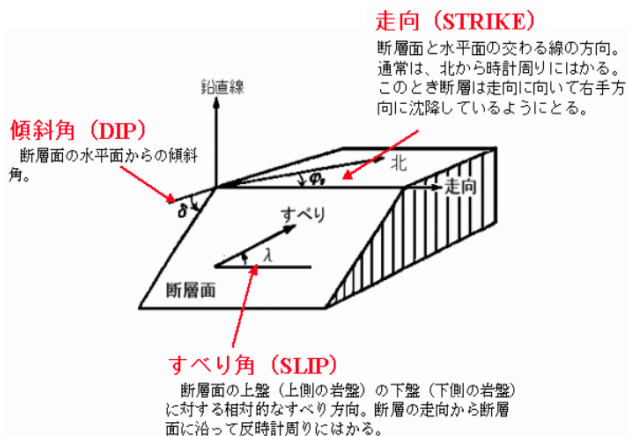


これまで発生していないすべり量分布をランダムに発生させることができる



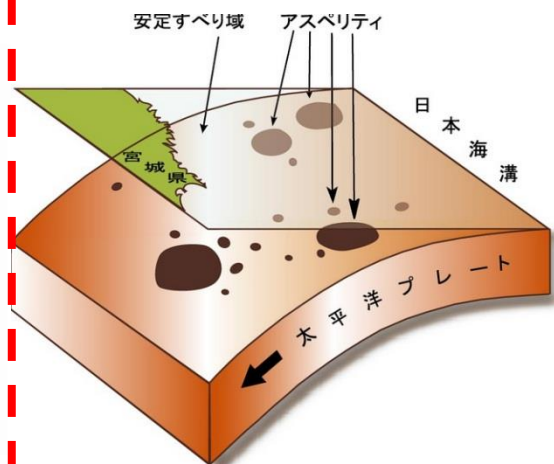
津波数値計算

## 巨視的パラメータ



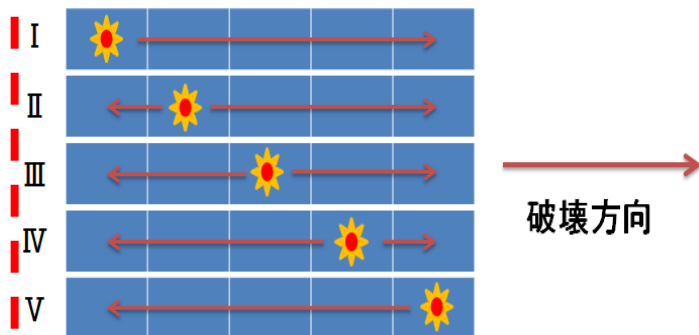
(気象庁)

## 微視的パラメータ



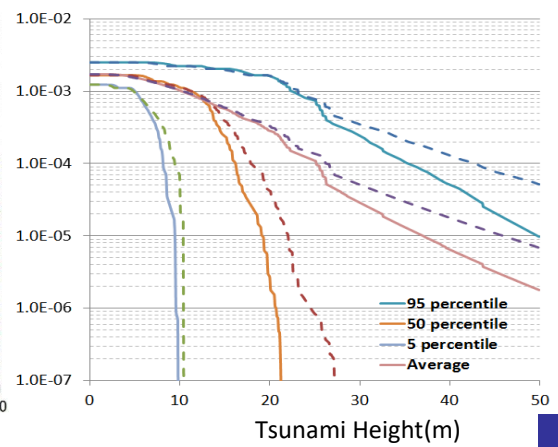
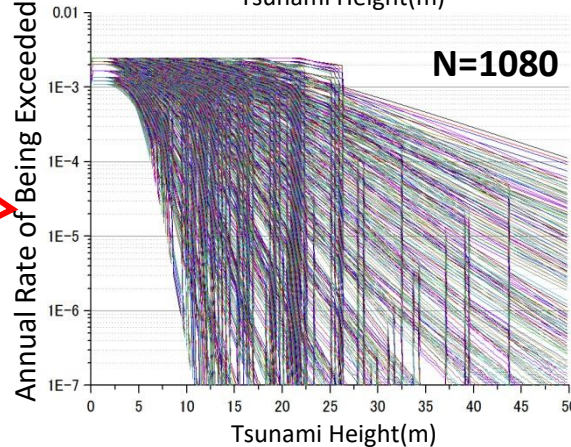
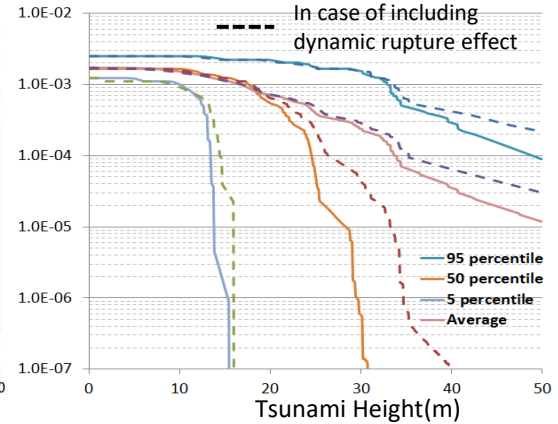
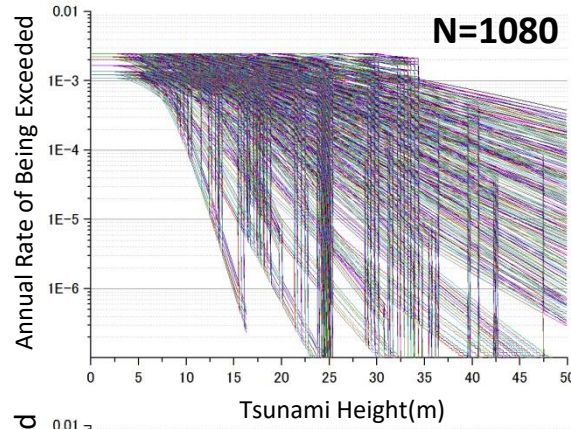
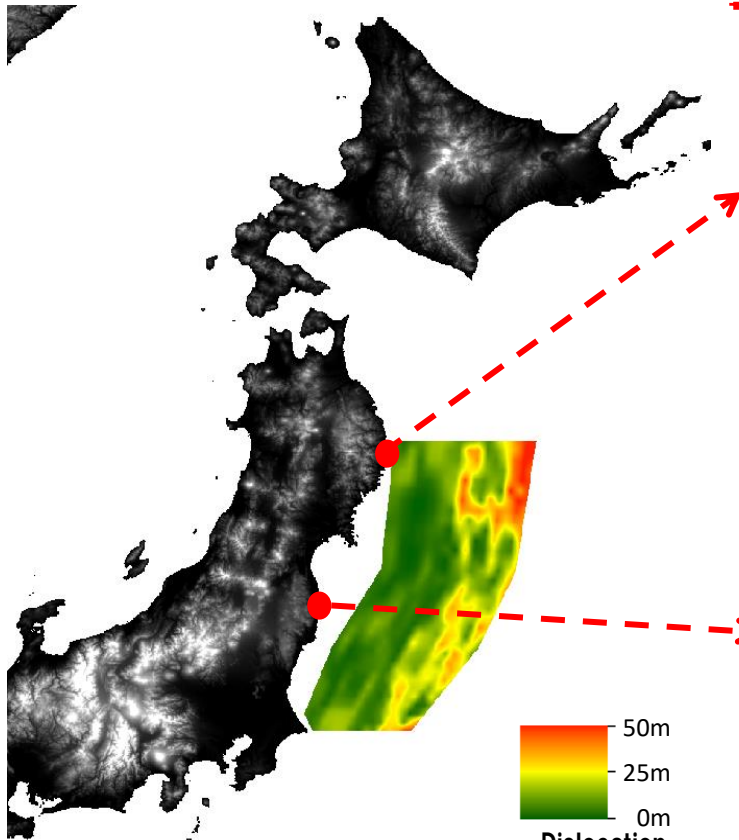
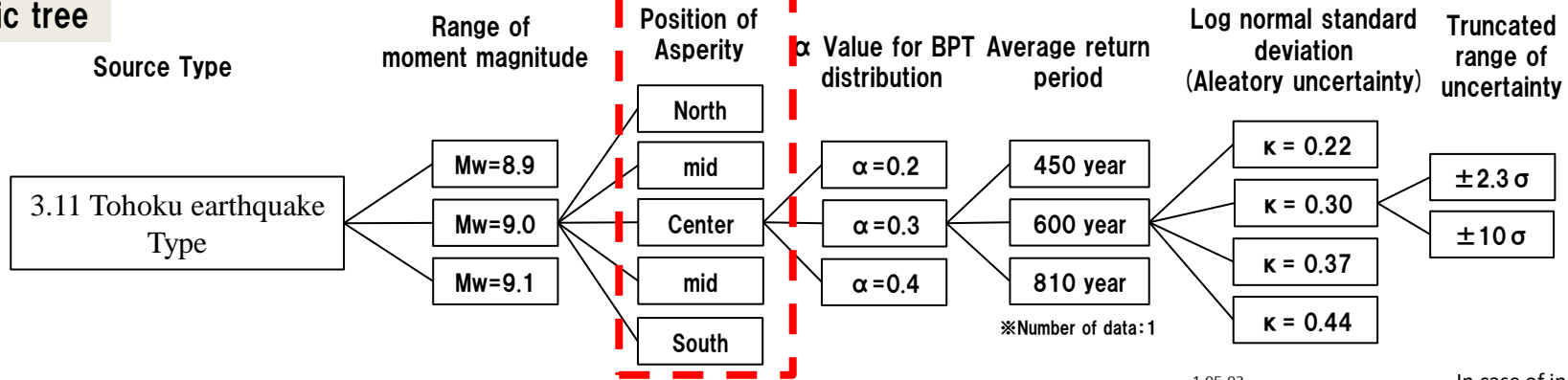
(東北大学地震噴火予知研究観測センター)

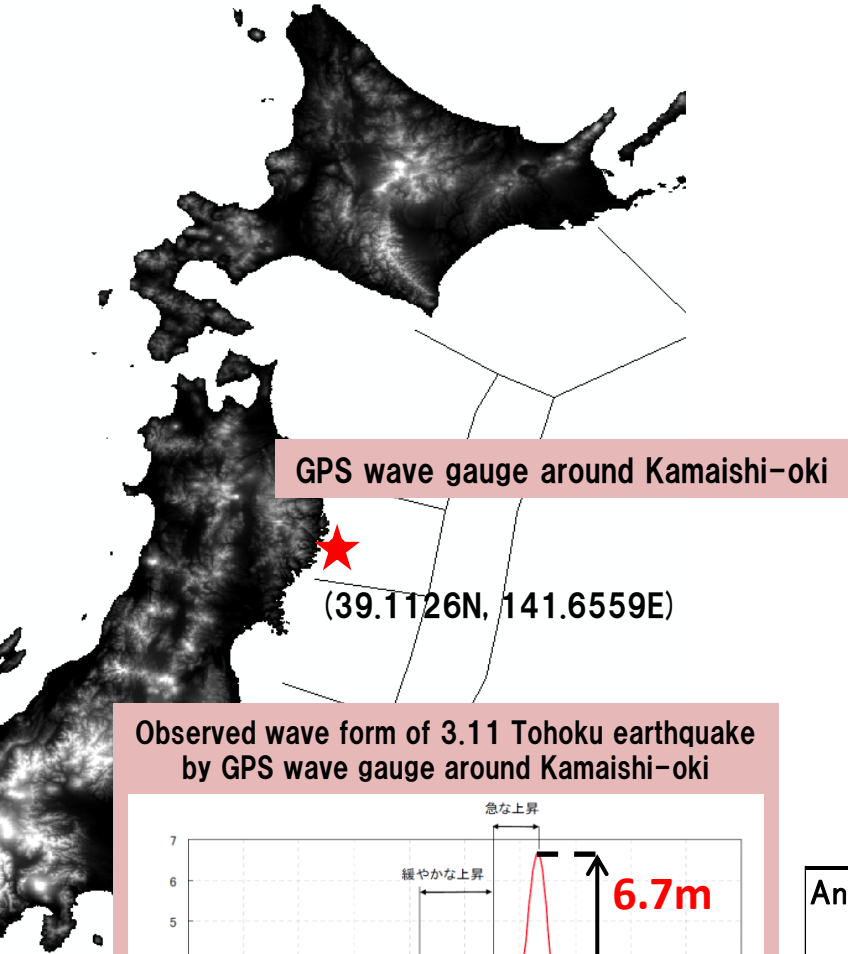
## その他のパラメータ



断層パラメータ	巨視的パラメータ	端点の緯度	防災科学技術研究所(NIED)が公表する確率論的地震動予測地図の評価手法(2013)で使用されている断層パラメータを使用
		端点の経度	
		長さ	
		幅	
		深さ	
		傾斜角	
		走行	
	すべり角		
	微視的パラメータ	すべり量	CRSPモデル(Liu et al. (2006))で確率的にすべり量分布を生成する。海溝型巨大断層については、Ishii (2013)の知見でモデル化
		アスぺリティの位置	
アスぺリティの個数			
アスぺリティの大きさ			
その他	アスぺリティのすべり量	偶然的不確定性として処理(津波シミュレーション時には考慮しない) <sup>10)</sup>	
	破壊開始点		
		破壊伝播速度	

## Logic tree





Observed wave form of 3.11 Tohoku earthquake by GPS wave gauge around Kamaishi-oki

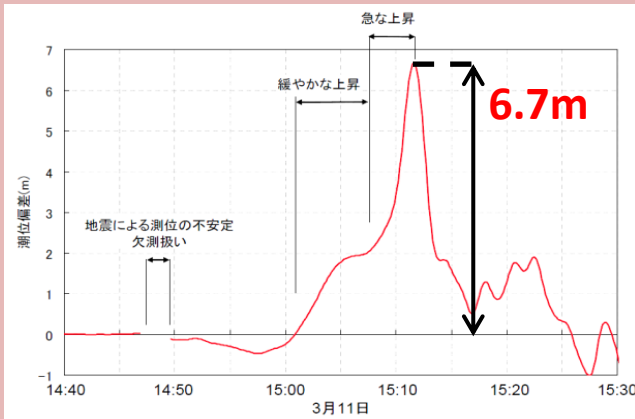
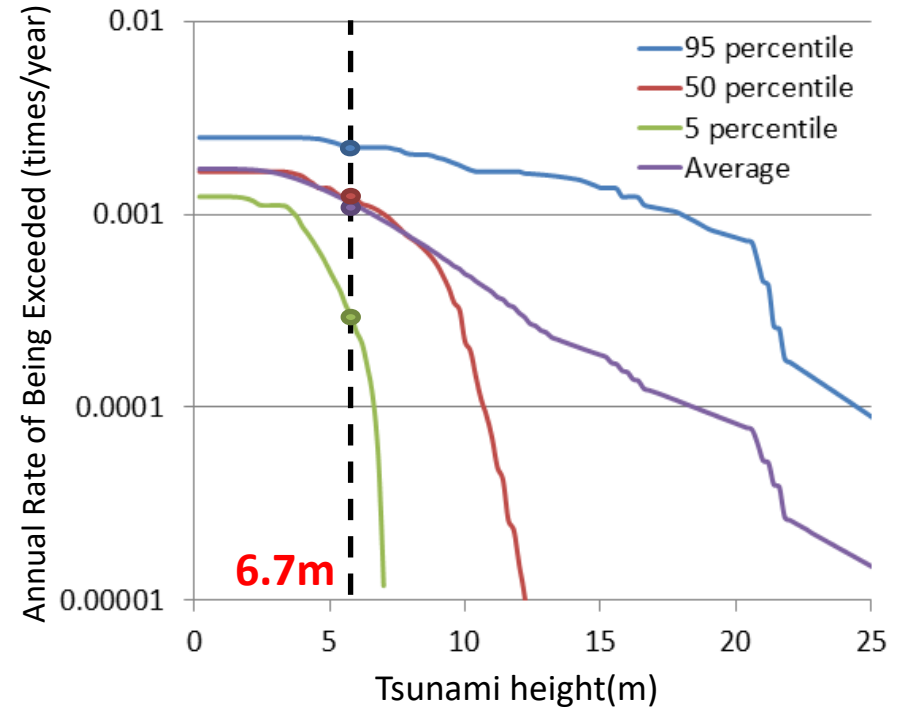


図-2 岩手南部沖GPS波浪計が捉えた津波の第1波

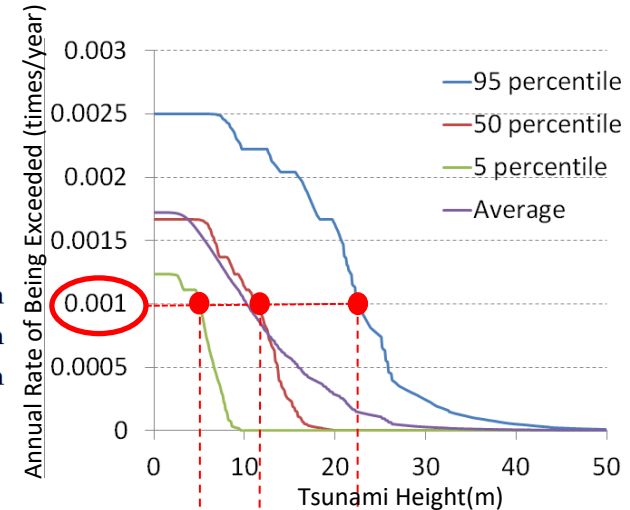
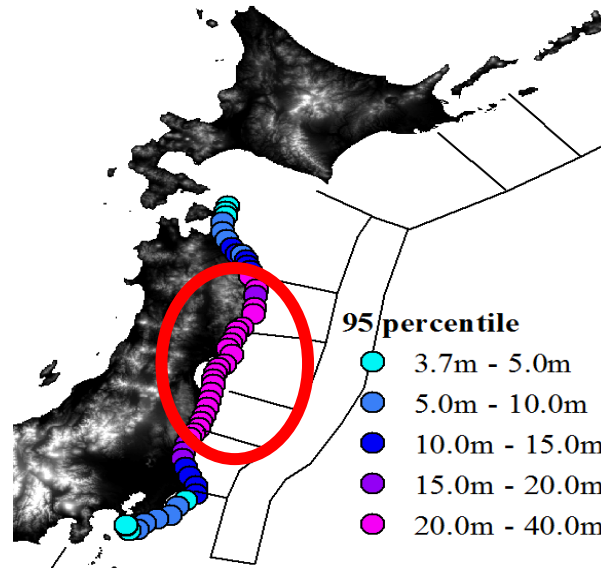
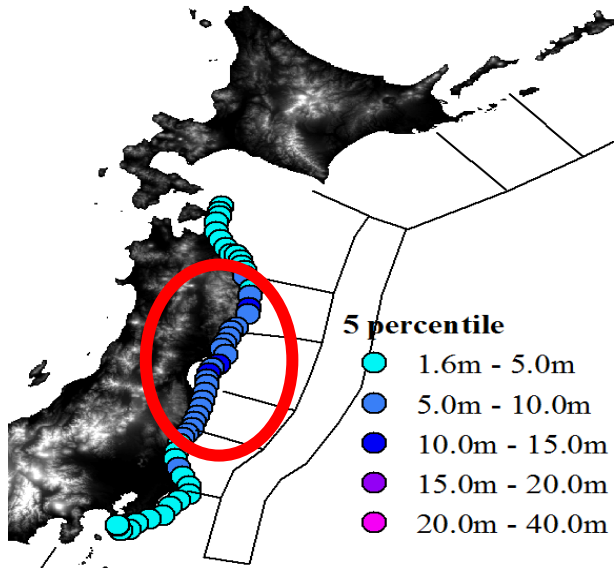
### Hazard curve at GPS wave gauge



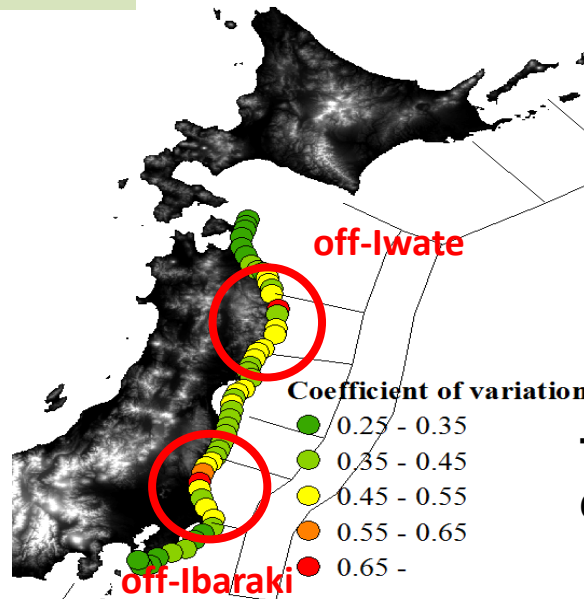
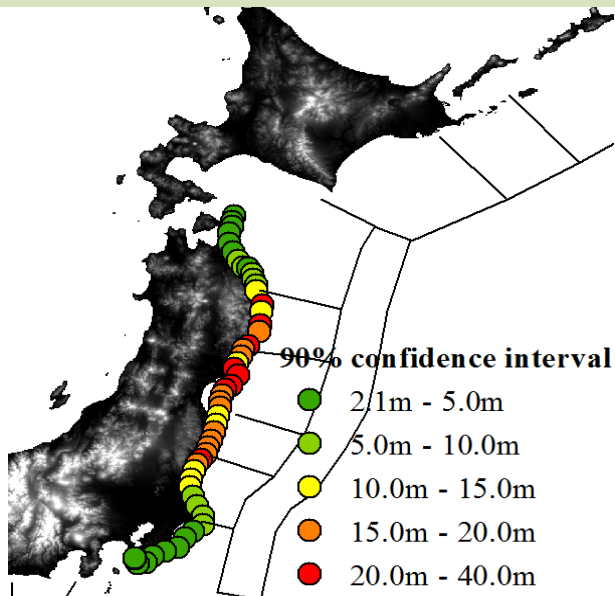
	5 percentile	Average	50 percentile	95 percentile
Annual Exceedance Probability (Times/Year)	0.0000834	0.000979	0.001064	0.002222
Return Period (Year)	12000	1022	940	450

Tsunami height **6.7m** corresponds to range of return period from **450 year** to **12000 year** (5 percentile~95 percentile).

## Wave height (1000 years return period) on 50 m off-shore point



## 90% confidence interval and Coefficient of variation



90% confidence interval

Coefficient of variation  
= Standard deviation / Average

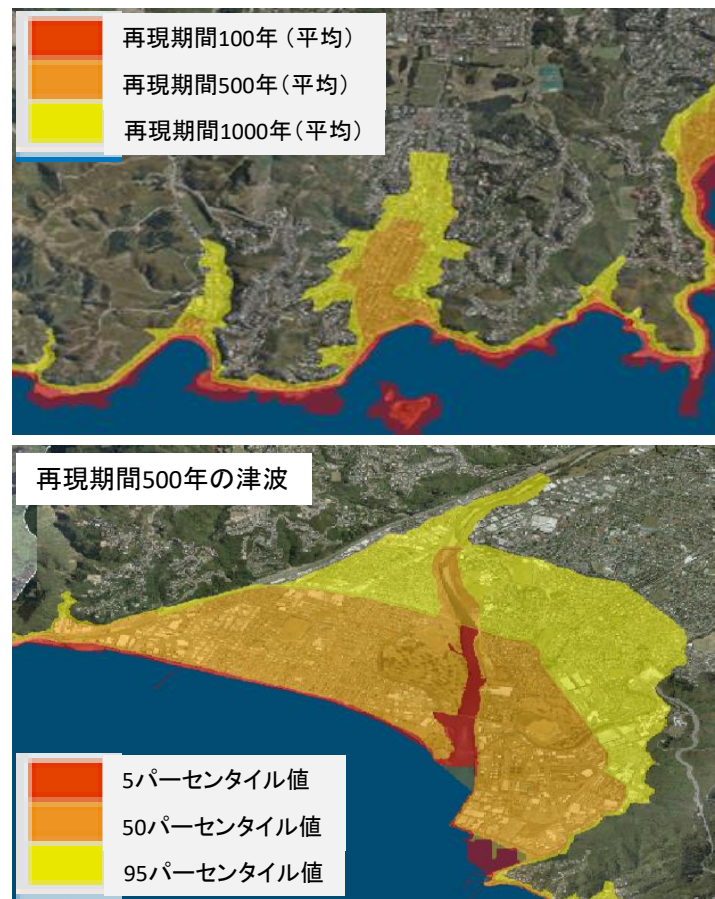
To visualize uncertainty concretely  
can be **useful for risk communication**

## Conclusion

- ◆東北地方太平洋沖地震の教訓を生かした確率的津波沿岸波高評価を行った。
  - －CRSPモデルによるすべり分布の生成、観測データとシミュレーションの誤差評価、動的破壊効果による不確実性評価
  - －東北地方太平洋沖地震の観測データは、450年～12000年の再現期間を示した
  
- ◆認識論的不確実性の地域性を図示した。
  - －地域によって不確実性(変動係数)の幅が異なる
  - －リスクコミュニケーションのツールとして使用できる

## Future work

- ◆潮位変化による不確実性の評価
  - －天文潮
  - －気象潮
  - －地球温暖化による海面上昇
  
- ◆津波の遡上評価
  - －確率的津波ハザードマップ  
(たとえば、100年、500年、1000年、  
5%tile値、50%tile値、95%tile値)
  
- ◆ハザードカーブとフラジリティカーブを結合させた  
定量的リスク評価と不確実性評価



確率的に表現した津波ハザードマップの例

*End.*

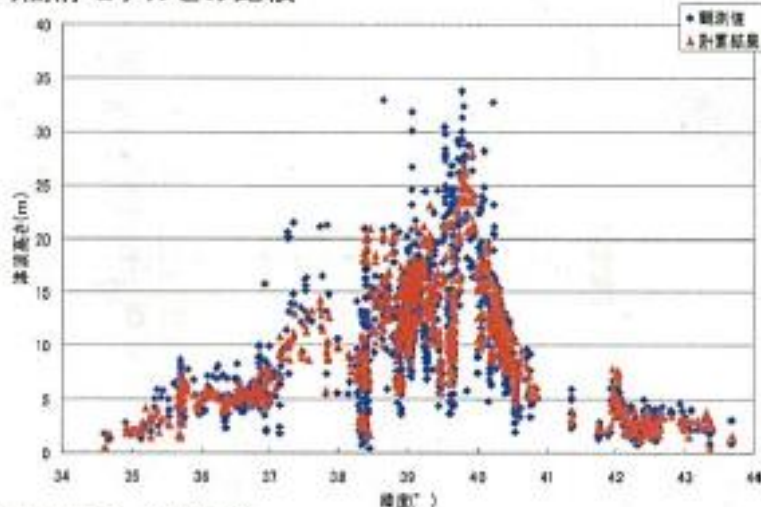
Thank you for your attention

# 津波予測計算の不確かさの評価の例

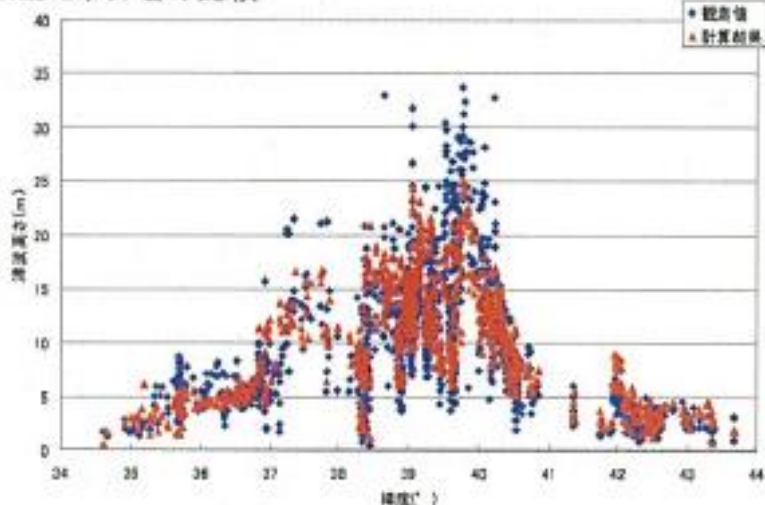
(3.11東北地方太平洋沖地震を想定、最小50m格子での評価)

津波痕跡高と沿岸での計算値を比較する

内閣府モデルとの比較



JNESモデルとの比較



$$K_i = (\text{地点}i\text{の痕跡高}) / (\text{地点}i\text{の計算値})$$

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i$$

$$\log \kappa = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - (\log K)^2 \right]^{1/2}$$

### ◆ $\sigma$ 計算誤差の検討結果

	K	K	対数標準偏差
内閣府モデル	0.98	1.34	0.13
JNESモデル	0.97	1.36	0.13



この例では、 $\sigma$ 計算誤差は0.13程度

## 4.2 津波ハザード評価における津波水位のばらつき $\beta$ の取扱い

### 津波を伴う地震活動のモデル化

波源域

地震規模  
(Mw)

地震発生モデル  
(BPT等)

波源モデル  
(すべり分布等)

発生頻度 $\nu$

### 津波伝播のモデル化

津波数値  
解析の方法

地形  
モデル

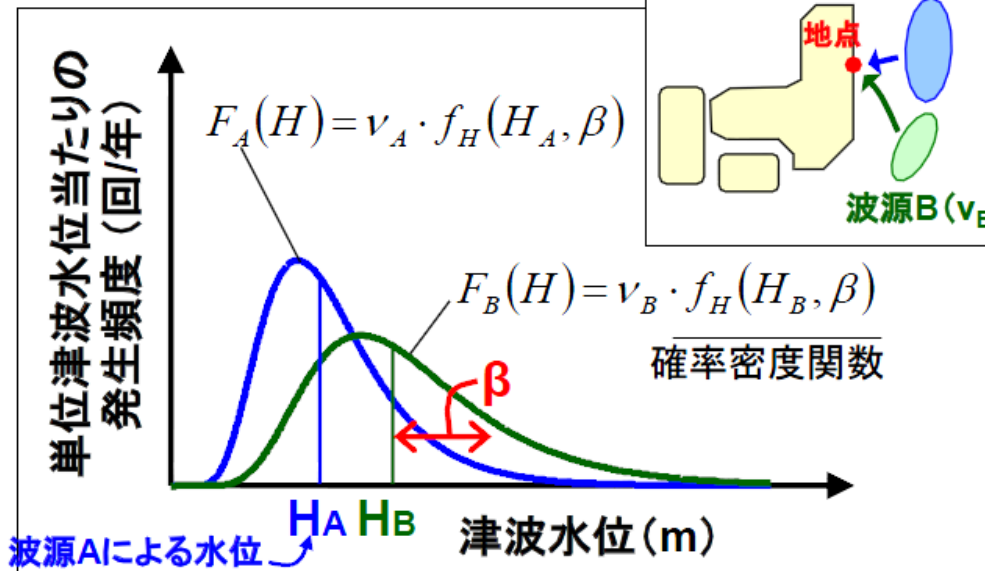
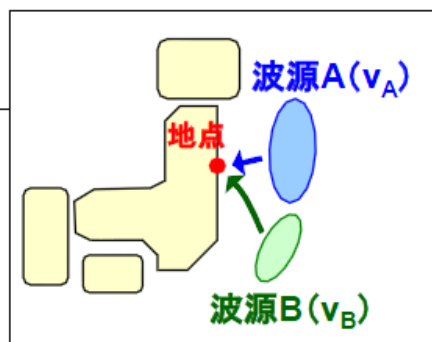
津波水位の  
ばらつき

確率分布の  
打ち切り上限値

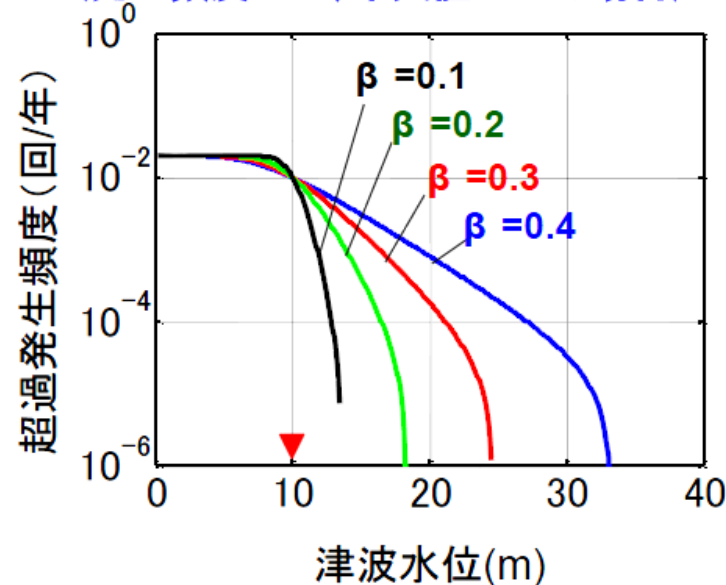
津波水位 $H$

対数標準偏差 $\beta$

確率分布(対数正規分布)を仮定  
(中央値 $H$ 、対数標準偏差 $\beta$ )



ハザード曲線の試算例  
(発生頻度0.02、中央値10mの場合)

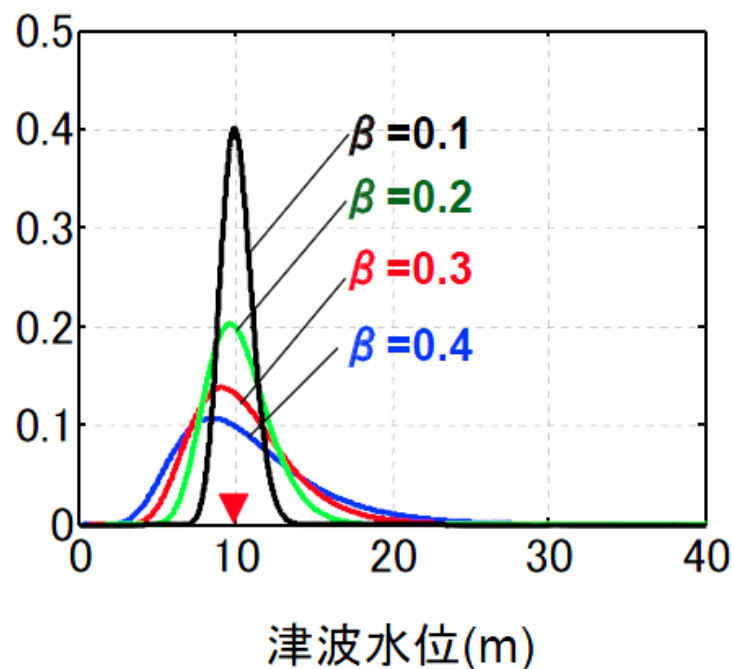


・ $\beta$ は、確率分布の対数標準偏差として用いられ、ハザード曲線に大きく影響する重要なパラメータである。

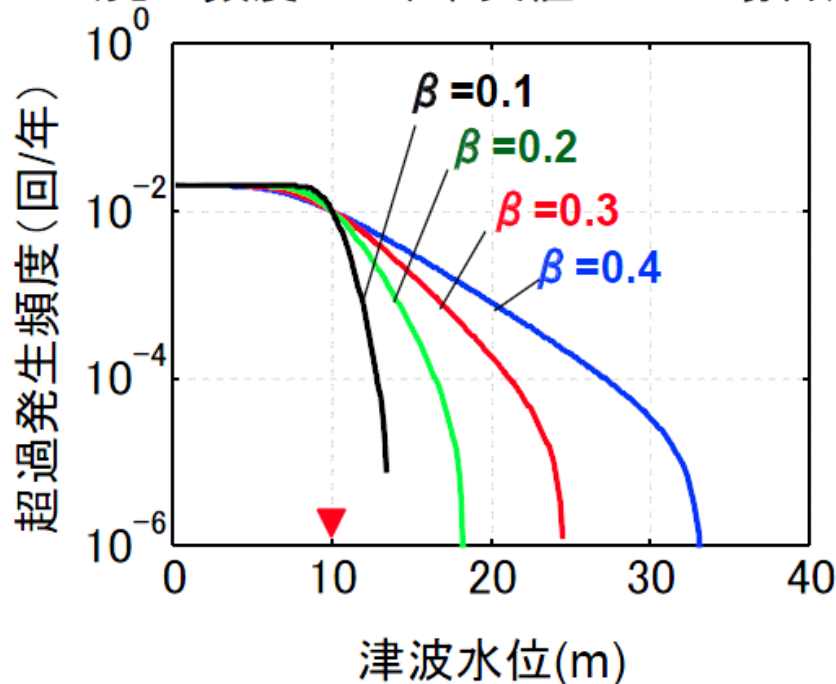
## 2.3 (3) 津波水位のばらつき $\beta$ の効果

津波水位のばらつき  $\beta$  の大きさは、ハザード曲線にどの程度の影響を及ぼすのか。

確率密度関数  
(対数正規分布)



ハザード曲線  
(発生頻度0.02、中央値10mの場合)



津波水位のばらつき  $\beta$  は、ハザード曲線に大きな影響を及ぼす重要なパラメータである。

## 4.3 津波水位のばらつき $\beta$ に関するこれまでの知見の整理

### $\beta$ と相田の指標の関係

$$\ln K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln K_i, \quad K_i = \frac{\text{痕跡高 } R_i}{\text{計算値 } H_i}$$

$$\ln \kappa = \left[ \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\ln K_i)^2 - n(\ln K)^2 \right\} \right]^{1/2} = \beta$$

津波水位(中央値) =  $f$  (波源モデル × 伝播モデル × 遡上モデル)

対数標準偏差  $\beta_{\text{合計}} = \sqrt{\beta_{\text{波源}}^2 + \beta_{\text{伝播}}^2 + \beta_{\text{遡上}}^2}$

	1) 波源モデル	2) 伝播モデル	3) 遡上モデル	4) 痕跡高	津波水位のばらつき $\beta$ ( ): $\kappa$
土木学会 2011.9	・一様すべりモデル	・海底地形	・地形格子 100~200m ・遡上なしの全反射	・痕跡点の位置 情報の精度: 小	日本海溝: 0.34~0.37 (1.40~1.45) 南海トラフ: 0.30~0.47 (1.35~1.60)
	・不均質モデル	・海底地形	・地形格子 50m ・遡上なしの全反射	・痕跡点の位置 情報の精度: 小	日本海溝: 0.31~0.37 (1.37~1.45) 南海トラフ: 0.28~0.39 (1.32~1.48)
原子力サイトの 3.11津波 の再現	・JNES詳細波源 モデル(不均質モデル)	・海底地形	・地形格子 5.6m ・遡上あり ・建屋あり	・痕跡点の位置 情報の精度: 高	福島第一: 0.12 (1.13) 福島第二: 0.11 (1.12) 女川: 0.02 (1.02) 東海第二: 0.05 (1.05)  <b>⇒4サイト: 0.11 (1.11)</b>

モデル化の精度向上

・3.11津波の知見や解析技術の進展は、津波予測手法の予測精度の向上につながった。

・津波ハザード評価の高度化のためには、上記の予測精度の向上が適切に反映される必要がある。

## 4.5 津波評価と地震動評価における各ばらつき $\beta$ の比較分析

	津波評価	地震動評価	
		断層モデル	距離減衰式
概念図	<p>陸上地形モデル、サイト近傍海底地形モデル、遠地海底地形モデル、津波初期水位(=海底地殻変動)、津波伝播解析、地殻変動解析、津波水位変動、波源モデル</p>	<p>地震動分布のイメージ、断層モデル、地盤基盤、上部地盤、地盤速度、地震動伝播のイメージ、断層面近傍断層、海溝型地震等、基本地震動の評価、解放基準での地震動(=S+P+Q)、深部地盤サイト特性G、伝播経路特性P、震源特性S</p>	<p>観測記録、最大加速度or最大速度、距離</p>
波源・震源特性(S)	<ul style="list-style-type: none"> <li>巨視的:位置,長さ,幅,走向,傾斜角</li> <li>微視的:すべり量,すべり角,すべり分布,破壊開始点,破壊伝播速度</li> <li>弾性体理論(海底地殻変動)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>巨視的:位置,長さ,幅,走向,傾斜角</li> <li>微視的:アスペリティ分布,破壊開始点,破壊伝播速度,高周波数遮断特性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マグニチュードM</li> <li>地震発生様式(地殻内、プレート境界区別)</li> </ul>
伝播特性(P)	<ul style="list-style-type: none"> <li>海底地形(等深線・水深)</li> <li>粗度係数</li> <li>線形及び非線形長波理論</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤減衰Q値,距離</li> <li>地盤速度構造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>震源~サイト間の距離</li> <li>(震源:我国周辺の複数震源サイト:我国の複数観測サイト)</li> </ul>
遡上・地盤増幅特性(R)	<ul style="list-style-type: none"> <li>陸上地形(等高線・標高)</li> <li>粗度係数</li> <li>遡上モデル(小谷ら他)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>経験的:表層地盤増幅特性(観測に基づく)</li> <li>理論的:表層地盤速度構造,密度,層厚,地盤減衰Q値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤速度による補正</li> </ul>
$\beta$	0.2~0.3程度	0.35~0.45程度(JNES検討に基づく)	0.55程度 ←

参考文献:Noda, et al.(2002) :Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites,