

2017/12/9

第7回巨大津波災害に関する合同研究集会

# 応答曲面を用いた津波リスク評価 手法構築に向けた基礎検討

福谷 陽<sup>1</sup>・森口 周二<sup>2</sup>・小谷拓磨<sup>2</sup>・寺田賢二郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 関東学院大学・理工学部理工学科・土木学系

<sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所・災害リスク研究部門・  
地域・都市再生研究部門

# 本研究の背景

ある地点における津波のリスクを評価するためには、**津波浸水深の確率分布を知る必要がある**。確率論的に津波浸水深を評価する手法として、これまで下記等の手法が提案されている。

- モンテカルロ津波計算(土木学会(2002), Løvholt et al. (2012) etc.)
- ロジックツリーモデル (Annaka et al. (2006), 土木学会(2011), Fukutani et al (2015) etc.)  
考え得るパターンをロジックツリー分岐により網羅的に評価
- ランダムフェーズモデル (Goda et al (2015) etc. )  
断層の2次元すべり分布をランダムに生成させて評価  
→多数の津波数値計算が必要
- 極値統計法 (信岡ら (2015) etc.)  
痕跡高などのデータを用いて極値統計分析により評価  
→結果が過去のデータに依存
- 応答曲面法 (小谷・森口・福谷ら (2016))  
**比較的少ない津波数値計算の結果 (沿岸波高)** から応答曲面を生成して評価  
→本研究で検討

# 本研究の背景

- 応答曲面法 (Response Surface Methodology) とは、可能な限り少ない測定データを用いて、最適解を求めるための数学・統計的組み合わせ手法  
(Bas et al. 2007; Myers et al, 2009; )

1) Baş, D. and Boyacı, İ. H., Modeling and optimization I : Usability of response surface methodology. J. Food Eng., 78, 836-845 (2007).

2) Myers, R. H., Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, C. M., "Response surface methodology :Process and product optimization using designed experiments" 3rd Ed., Wiley, (2009).

- 応答曲面モデルは、 $n$ 個の要因 (説明変数) を  $x_i$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ )、応答 (目的変数) を  $y$ 、誤差を  $\varepsilon$  としたとき、以下で表される。

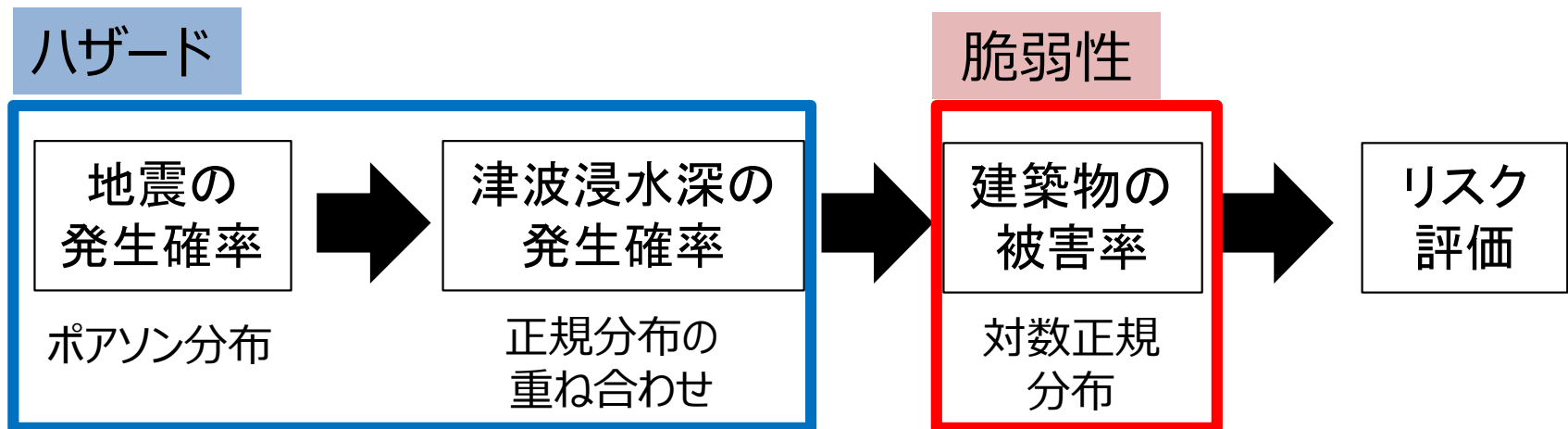
$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \varepsilon$$

- 要因と応答の因果関係を正確にモデル化したものではなく、実用面を考慮して、因果関係を単純な関数で表現する。

# 本研究の目的

本研究では、東京湾や相模湾の周辺に大きな影響を与えると想定される相模トラフ地震を対象として、小谷ら(2016)の研究を拡張し、津波浸水深を目的変数とする応答曲面を構築し、応答曲面からモンテカルロ計算の結果得られる津波浸水深の確率分布を評価する。

また、得られた津波浸水深の確率分布と、脆弱性を表す確率分布を組み合わせた津波リスク評価手法を構築するための基礎検討を実施することを目的とする。

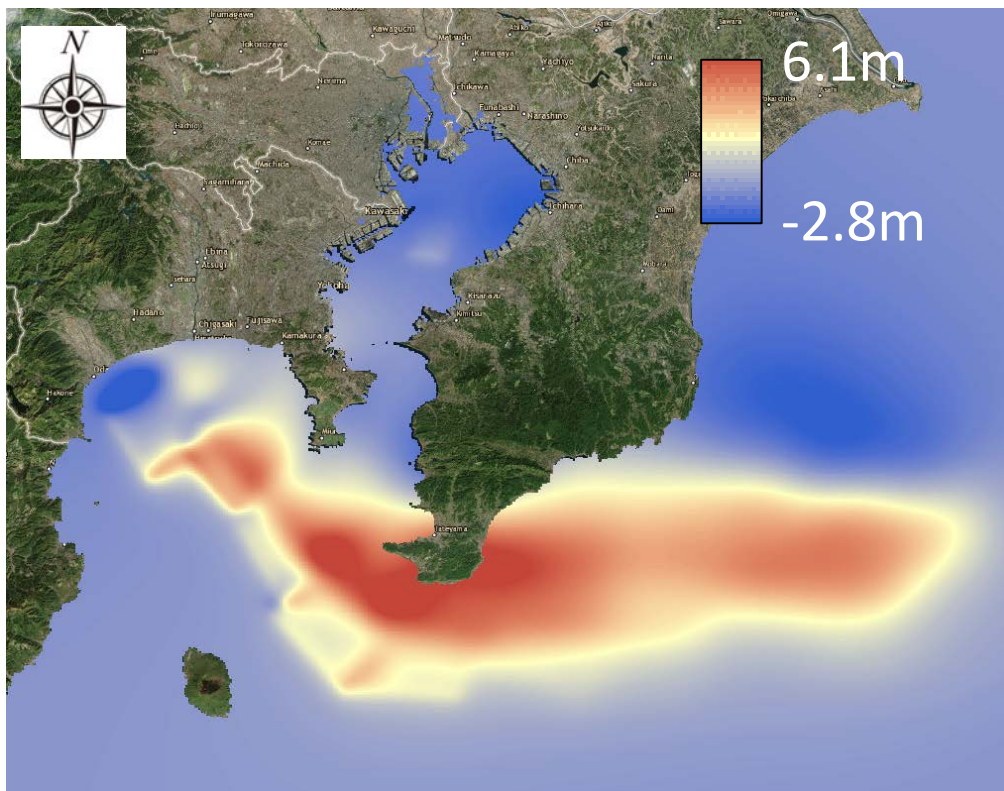




# 津波数値計算

■ 相模トラフ地震の断層パラメータから、断層による地盤変動分布を計算し、それを津波初期水位として、津波数値計算を実施した。

相模トラフ地震津波の初期水位(標準ケース)



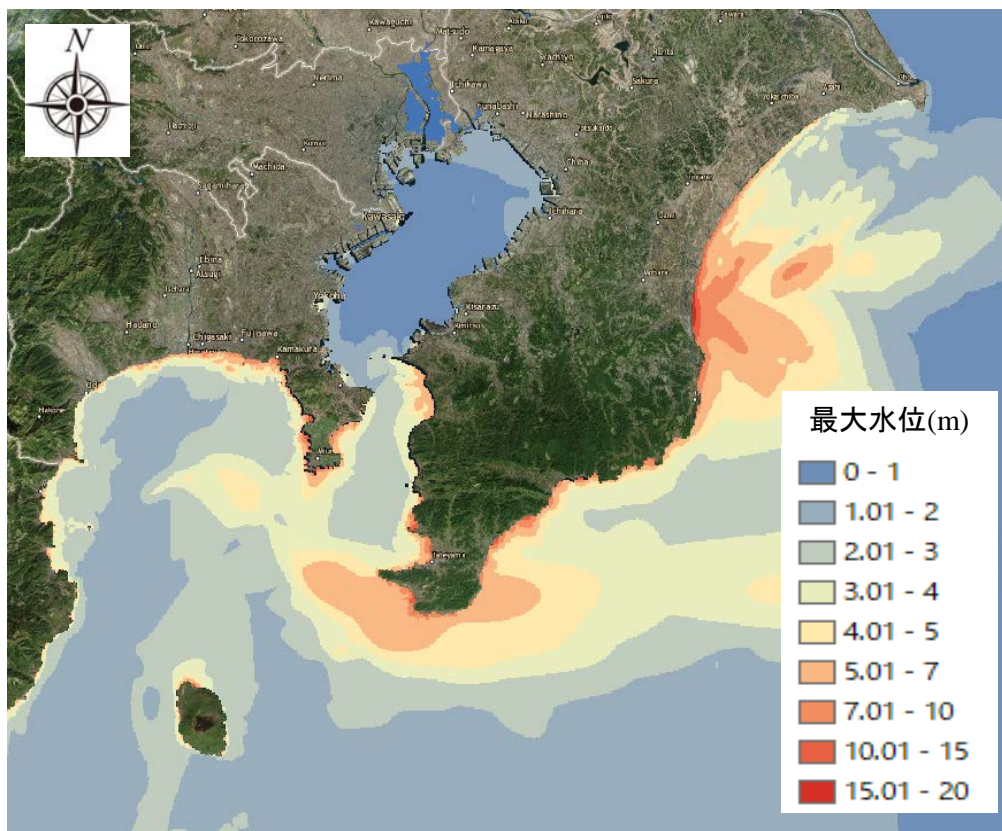
津波数値計算条件

支配方程式	2次元非線形長波方程式 (東北大学TUNAMI model)
数値積分法	スタaggerド・ リープフログ法
初期条件	Okadaの式
境界条件	開放条件
座標系	平面直角座標IX系
潮位	T.P. +0.9 m (神奈川県津波想定設定潮位)
メッシュサイズ ( $\Delta x$ )	270 m $\rightarrow$ 90 m $\rightarrow$ 30 m $\rightarrow$ 10 m
時間刻み( $\Delta t$ )	0.9 s $\rightarrow$ 0.3 s $\rightarrow$ 0.1 s $\rightarrow$ 0.03 s
計算時間	3時間

# 津波数値計算

■ 相模トラフ地震の断層パラメータから、断層による地盤変動分布を計算し、それを津波初期水位として、津波数値計算を実施した。

最大水位分布(標準ケース)



津波数値計算条件

支配方程式	2次元非線形長波方程式 (東北大学TUNAMI model)
数値積分法	スタaggerド・ リープフログ法
初期条件	Okadaの式
境界条件	開放条件
座標系	平面直角座標IX系
潮位	T.P. +0.9 m (神奈川県津波想定設定潮位)
メッシュサイズ ( $\Delta x$ )	270 m $\rightarrow$ 90 m $\rightarrow$ 30 m $\rightarrow$ 10 m
時間刻み( $\Delta t$ )	0.9 s $\rightarrow$ 0.3 s $\rightarrow$ 0.1 s $\rightarrow$ 0.03 s
計算時間	3時間

# 津波数値計算結果

## 【断層端点の深さ】

【すべり量】

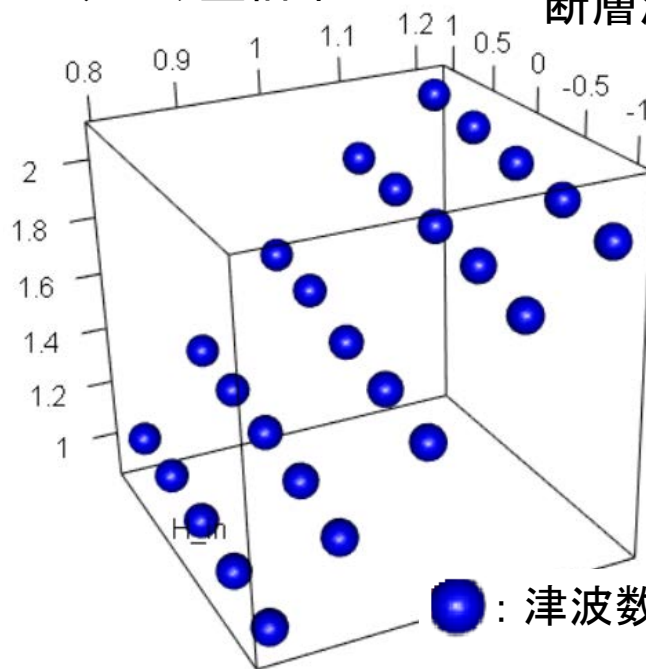
	+1.0 km	+ 0.5 km	0 km	- 0.5 km	- 1.0 km
1.2 倍	2.05 m	2.01 m	1.97 m	1.94 m	1.90 m
1.1 倍	1.87 m	1.85 m	1.81 m	1.78 m	1.73 m
1.0 倍	1.58 m	1.55 m	1.48 m	1.44 m	1.39 m
0.9 倍	1.28 m	1.25 m	1.23 m	1.20 m	1.15 m
0.8 倍	0.99 m	0.99 m	0.97 m	0.94 m	0.91 m



すべり量倍率

断層深さ(km)

津波浸水深(m)



● : 津波数値計算結果

# 応答曲面の構築

■ 応答曲面を以下の形式で定義し、最小二乗法による回帰分析を実施した。

$$H(S,D) = a*S + b*D + c*S*D + d*S*S + e*D*D + f$$

$H(S,D)$ : 津波浸水深,  $S$ : すべり量の倍率,  $D$ : 断層端点の深さ  
 $a, b, c, d, e, f$ : 回帰係数

Case	Slip	Depth	Slip*Depth	Slip*Slip	Depth*Depth	Intercept	Adjusted R^2	R.S.E	AIC
15	6.744	-	0.069	-2.025	-	-3.210	0.997	0.022	-114.07
3	6.744	-	0.069	-2.025	-0.009	-3.205	0.997	0.022	-113.05
6	6.744	0.000	0.068	-2.025	-	-3.210	0.997	0.023	-112.07
16	6.744	0.069	-	-2.025	-	-3.210	0.996	0.023	-111.42
1	6.744	0.000	0.068	-2.025	-0.009	-3.205	0.996	0.023	-111.05
4	6.744	0.069	-	-2.025	-0.009	-3.205	0.996	0.023	-110.30
25	2.632	-	0.069	-	-	-1.163	0.989	0.040	-85.35
19	2.632	0.069	-	-	-	-1.163	0.989	0.041	-84.54
14	2.632	-	0.069	-	-0.009	-1.158	0.989	0.041	-83.63
10	2.632	0.000	0.068	-	-	-1.163	0.989	0.041	-83.35

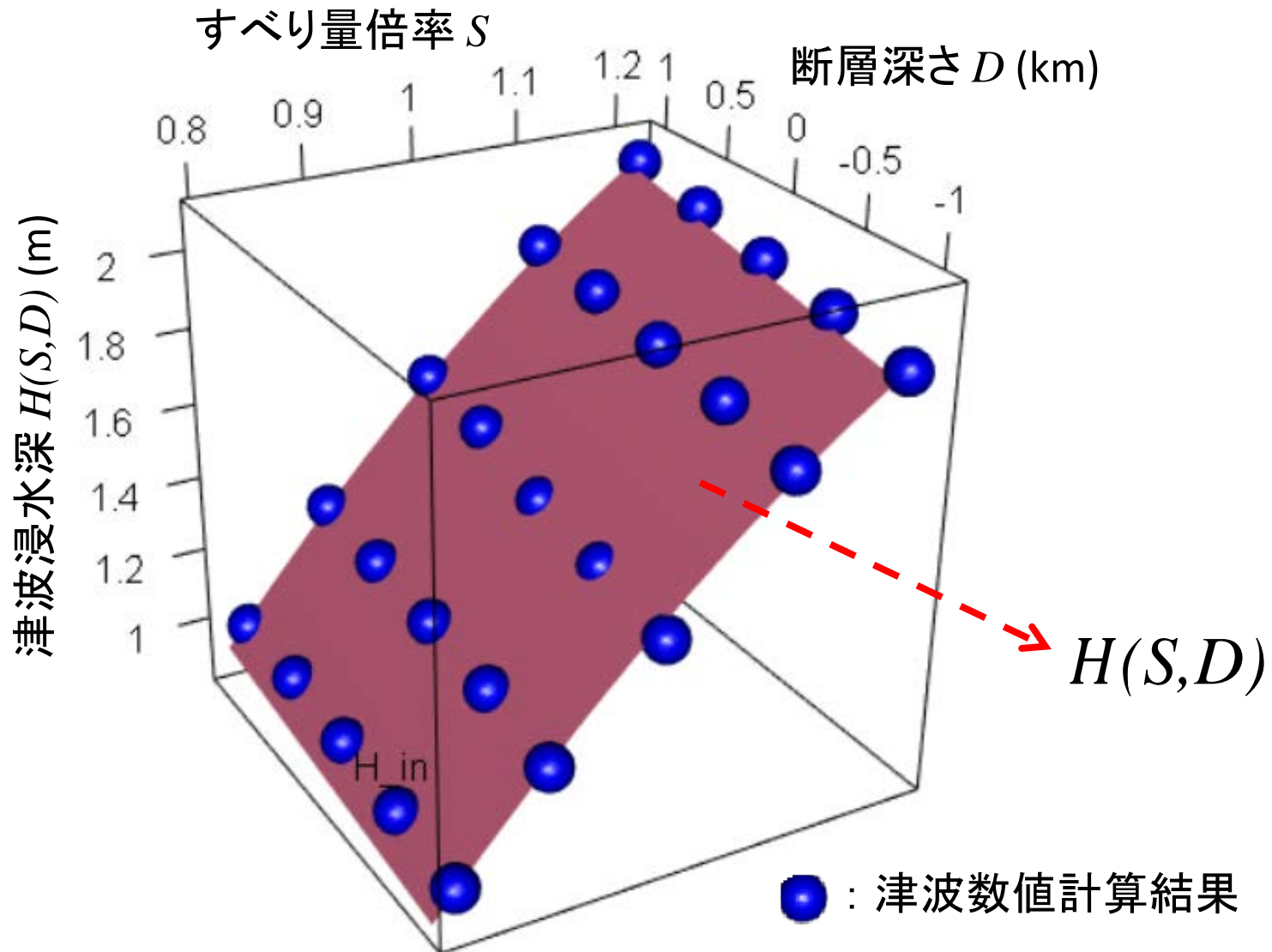


AICが小さく、かつ、決定係数が大きく、かつ、Residual Standard Error  
が小さい**Case15の応答曲面**を採用

$$H(S,D) = 6.744*S + 0.069*S*D - 2.025*S*S - 3.210$$

# 応答曲面の構築

$$H(S,D) = 6.744*S + 0.069*S*D - 2.025*S*S - 3.210$$



# 各変数のばらつきとモンテカルロ計算

- 採用した応答曲面を基に、各変数のばらつきを考慮したモンテカルロ計算を行う。

$$H(S,D) = 6.744*S + 0.069*S*D - 2.025*S*S - 3.210$$

変数	平均	標準偏差	分布形状	ばらつきの根拠
すべり量S [倍率]	1.00	0.10	正規分布	原子力土木委員会津波評価部会によれば、 <u>断層面積の同じ既往地震を考慮すると±0.1程度</u> であることが示唆。このときすべり量の変動幅は70～140%程度となる。
断層深さD [km]	0.12 (対数平均)	0.65 (対数標準偏差)	対数正規分布	気象庁一元化処理震源リストに記載された <u>断層深さの観測誤差</u> のデータを基に作成。

# 断層深さの観測誤差

- 本解析では、気象庁一元化処理震源リストに記載されている、2016年10月～2017年10月の1年間分の全震源データの観測誤差（DepErr）の平均と標準偏差を計算した。

## 気象庁一元化処理 震源リスト

ここで公開されている震源情報は、国立大学、防災科研等の地震観測データを気象庁が収集し一元的に処理して得られた結果です。あくまでも暫定的な再検測結果であり、その後も再々検測等により情報が更新されることもありますので、正式には気象庁、または(財)気象業務支援センターにお問い合わせ下さい。

震源リストの検索範囲は、2002/06/03 ～ 2017/10/31 です。

2017年 ▼ 10月 ▼ 31日 ▼ から 1日間 ▼

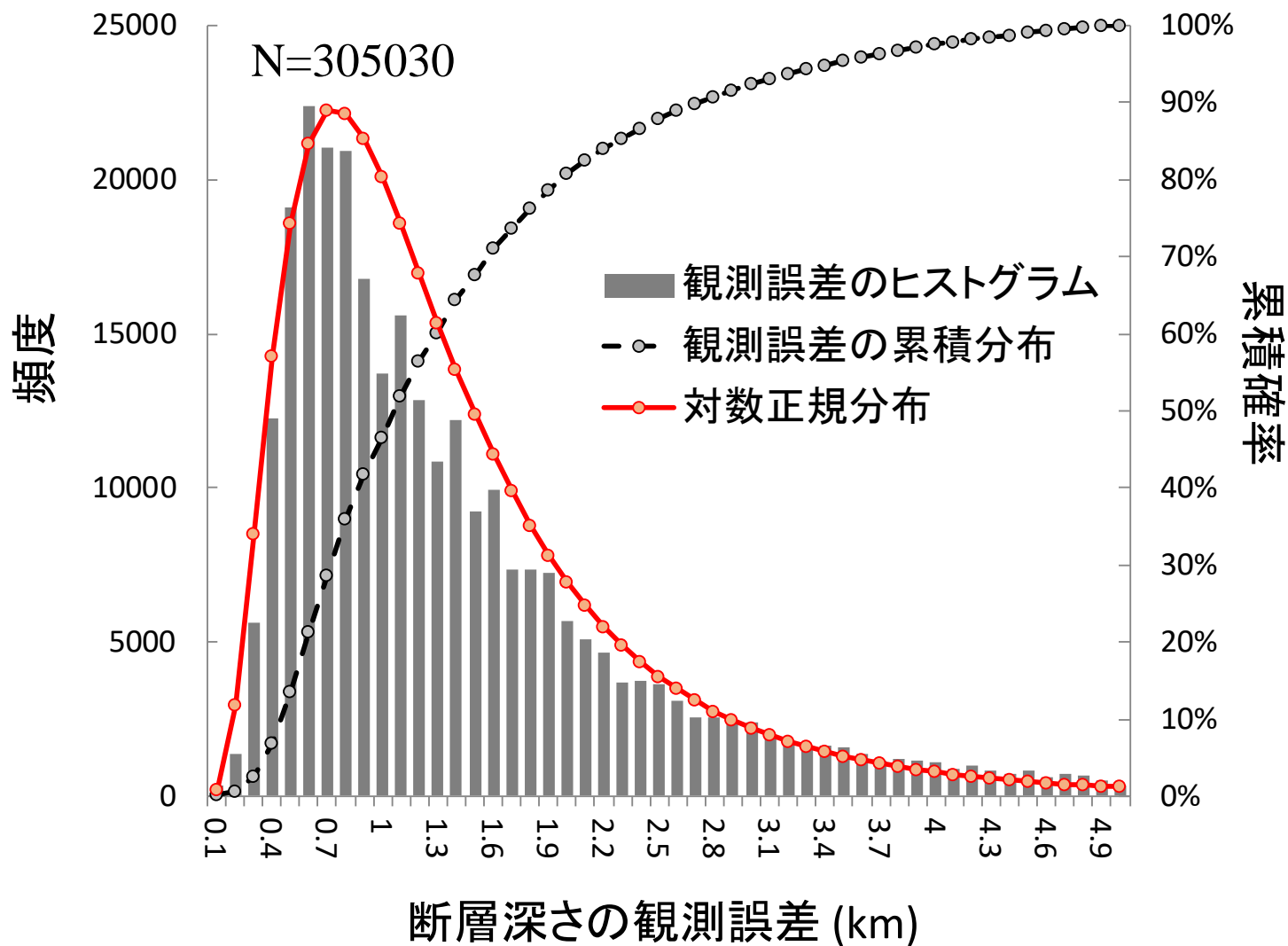
[震源リスト早見表はこちら](#)

### ■ 2017/10/31

-----Origin Time-----	OTerr---	Lat---	LatErr---	Long--	LonErr---	Dep--	DepErr--	Mag-----	-----Region-----
2017-10-31 00:01:57.79	0.12	39.115	0.28	142.376	0.65	34.0	1.2	1.8V	E OFF IWATE PREF
2017-10-31 00:04:17.08	0.03	35.343	0.10	133.311	0.10	12.1	0.5	1.2V	WESTERN TOTTORI PREF
2017-10-31 00:05:11.55	0.04	36.777	0.10	140.573	0.20	8.1	0.5	1.7V	NORTHERN IBARAKI PREF
2017-10-31 00:05:47.89	0.05	31.974	0.11	130.424	0.19	8.2	0.5	-0.4v	NW KAGOSHIMA PREF
2017-10-31 00:06:26.04	0.04	36.779	0.08	140.566	0.15	7.3	0.4	-0.5v	NORTHERN IBARAKI PREF
2017-10-31 00:06:33.16	0.26	34.472	0.26	136.412	0.33	33.4	1.4	-0.1V	SHIMA PENINSULA REGION
2017-10-31 00:06:36.67	0.25	34.487	0.20	136.406	0.32	38.0	1.3	0.0V	SHIMA PENINSULA REGION
2017-10-31 00:07:10.71	0.30	34.477	0.31	136.373	0.32	36.0	1.7	0.0V	SHIMA PENINSULA REGION
2017-10-31 00:07:18.03	0.19	34.475	0.19	136.406	0.21	34.6	1.0	0.0V	SHIMA PENINSULA REGION
2017-10-31 00:07:28.25	0.03	36.778	0.07	140.567	0.13	7.3	0.3	0.2V	NORTHERN IBARAKI PREF
2017-10-31 00:07:52.75	0.05	32.819	0.18	130.607	0.26	2.6	0.7	-0.1v	NW KUMAMOTO PREF
2017-10-31 00:08:25.31	0.19	35.645	0.72	139.378	1.06	136.4	1.4	1.2V	TOKYO PREF

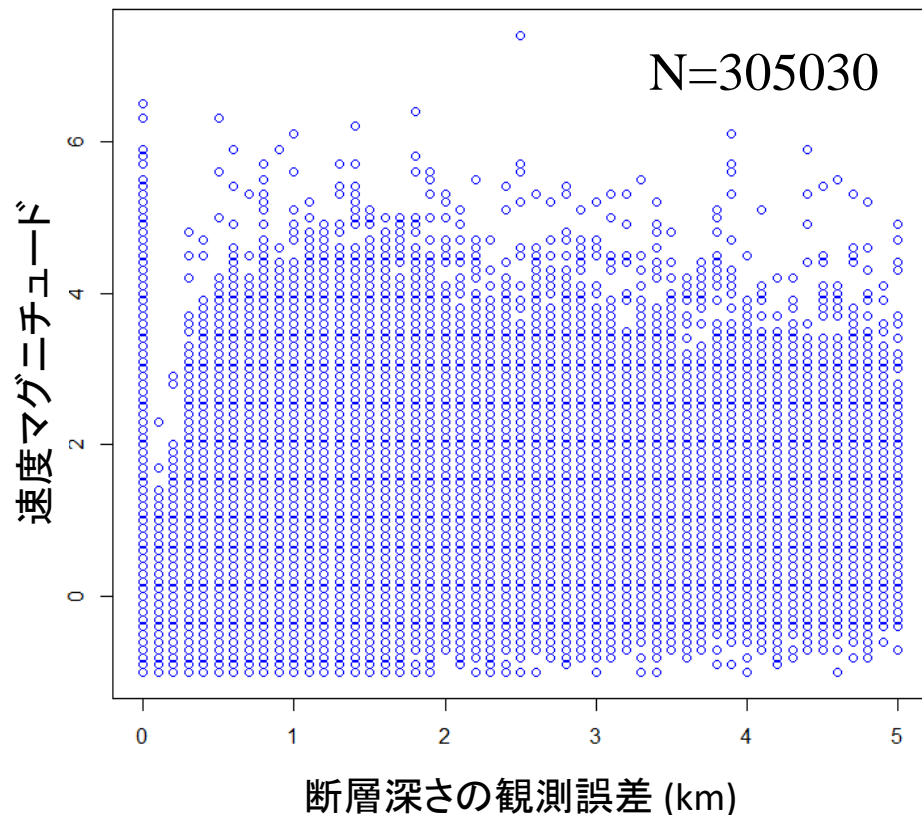
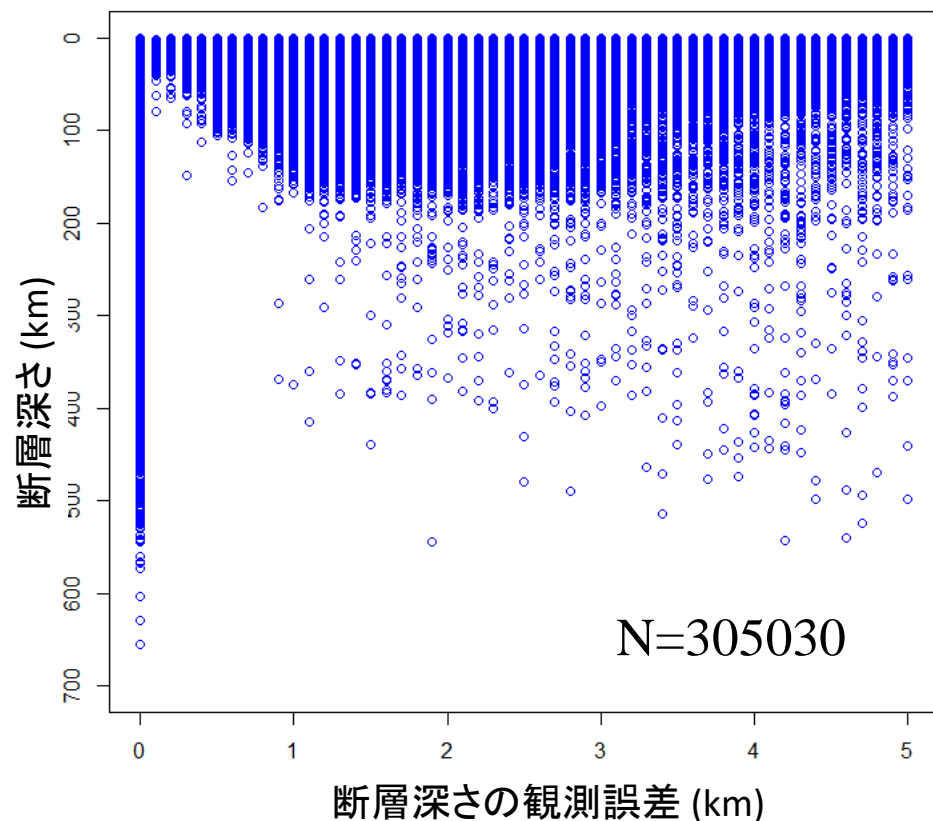
# 断層深さの観測誤差の頻度分布

- 断層深さの観測誤差は、対数平均0.12, 対数標準偏差0.65の対数正規分布に良く一致している。



# 断層深さ・規模と観測誤差の関係

- 断層深さの観測誤差と、断層深さ（左図）および速度マグニチュード（右図）との関係を確認した。



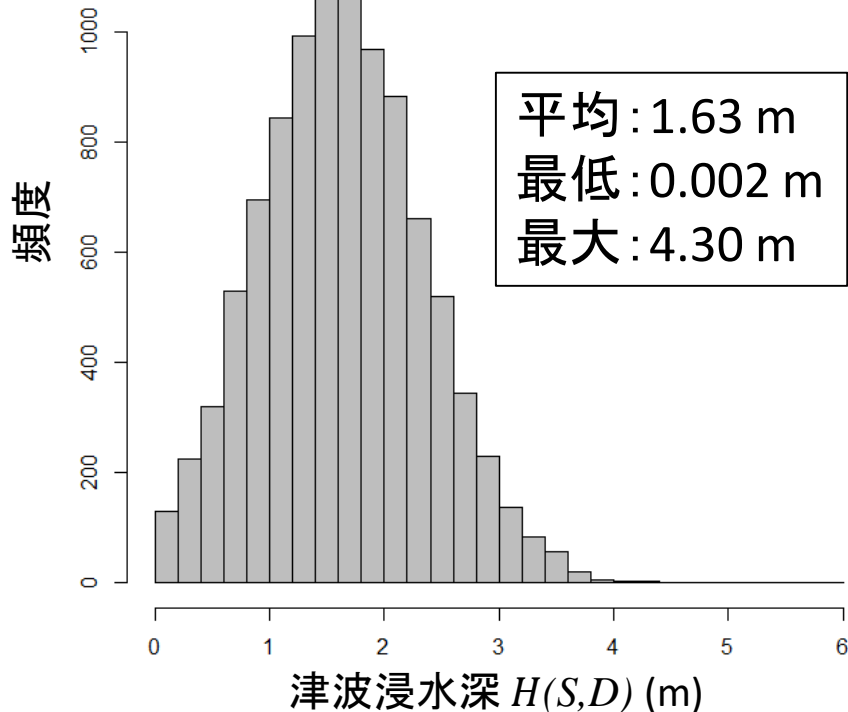
→ 断層深さの観測誤差と、断層深さや速度マグニチュードとの関係は認められない。

# リスク評価

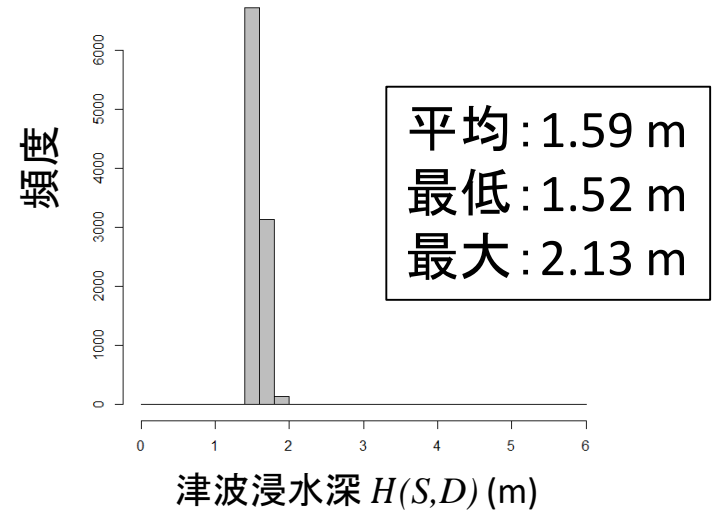
応答曲面を用いて、約10000回分の津波浸水深を発生させる。

## 津波浸水深の頻度分布

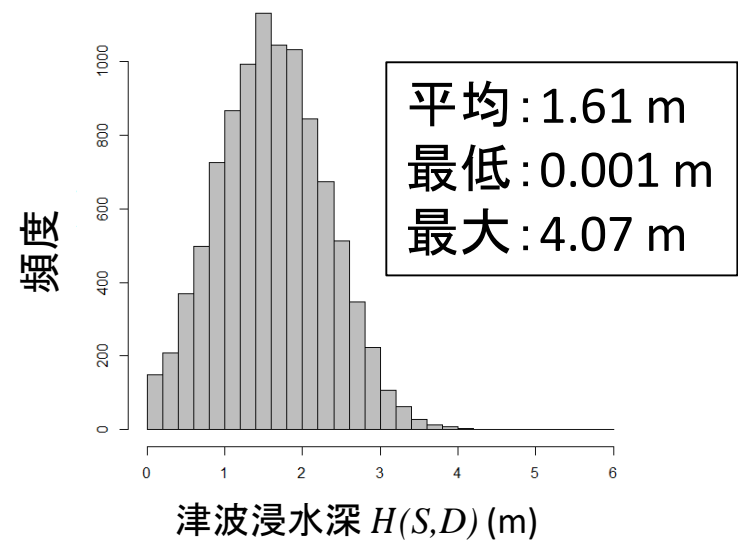
$$H(S,D) = 6.744*S + 0.069*S*D - 2.025*S*S - 3.210$$



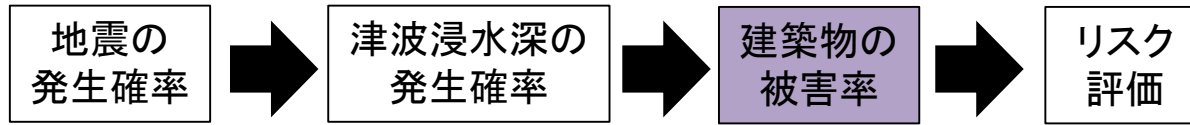
1) すべり量のばらつき0の場合



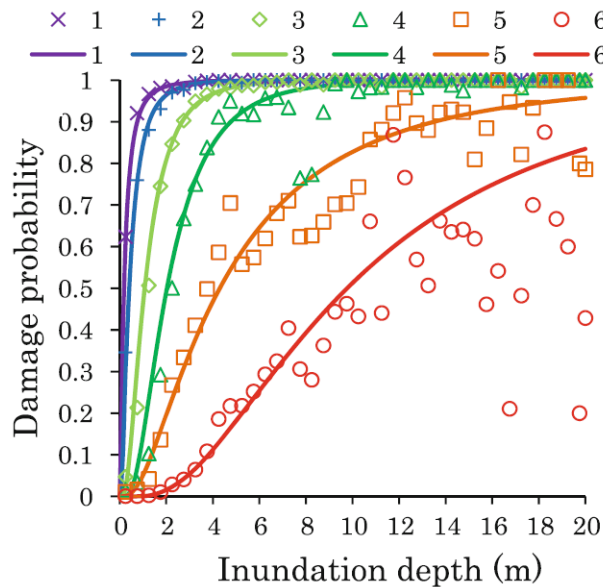
2) 断層深さのばらつき0の場合



# リスク評価



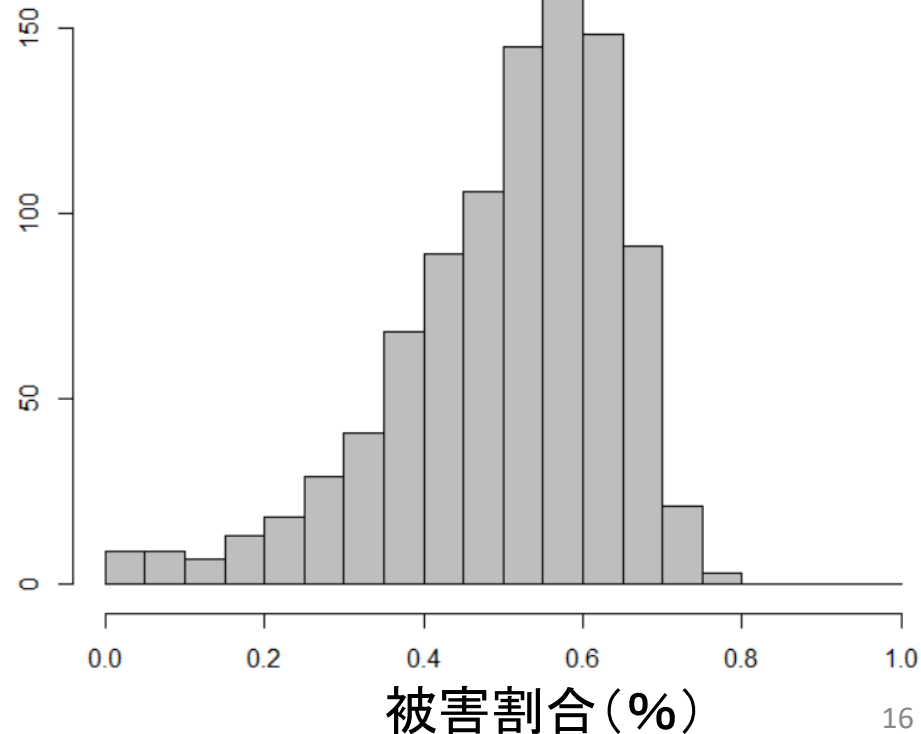
10000回分の津波浸水深に対して、例として、鉄骨造建物の被害関数を当て、鉄骨造建物の被害割合を計算する。



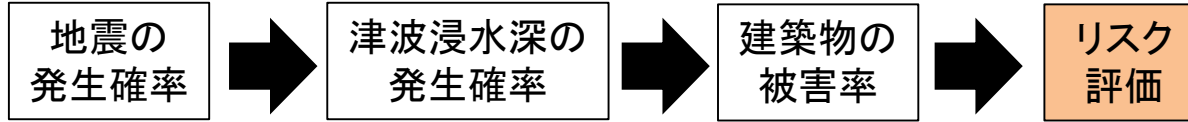
頻度

Damage Level	Damage ratio
1 = Minor damage	0.1
2 = Moderate damage	0.3
3 = Major damage	0.5
4 = Complete damage	0.7
5 = Collapse	0.9
6 = Washed away	1.0

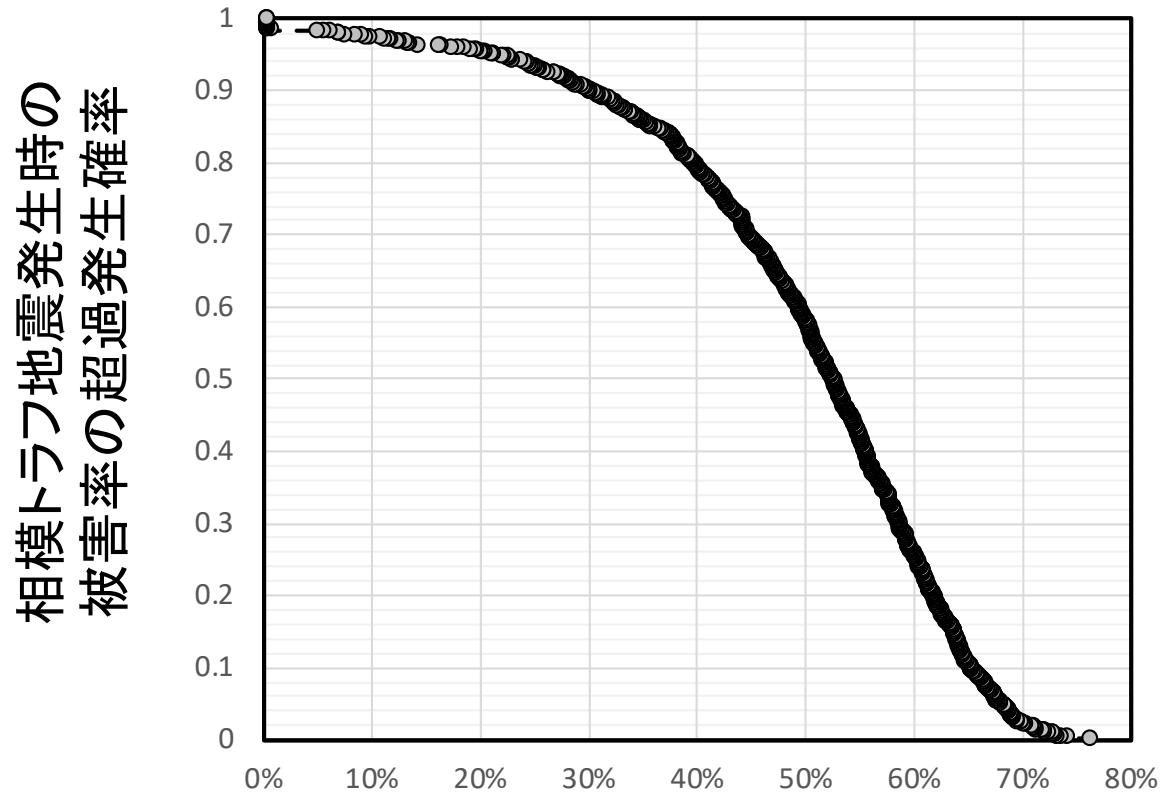
被害確率の頻度分布



# リスク評価



## 超過発生確率 vs 被害率の評価



5パーセント点  
18.1%

50パーセント点  
22.4%

95パーセント点  
27.2%

建物被害率

# まとめ

- 応答曲面法を用いた津波リスク評価の手法を提示した。
- 比較的少ない津波の数値計算結果から、超過発生頻度vs建築物の被害確率で表されるリスクカーブを構築し、建築物の津波リスクが評価できることを示した。
- 本報告では、単一の地震を対象にした基礎的な検討を行ったが、今後、複数の地震領域・地震規模を考慮した確率論解析を実施する。

(本研究は、「東北大学災害科学国際研究所 リソースを活用した共同研究助成」の支援を得て実施しています。ここに記して謝意を表します。)