

# 原子力発電所の津波評価技術2016 第5章 確率論的津波評価手法

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事  
栗田哲史(東電設計)

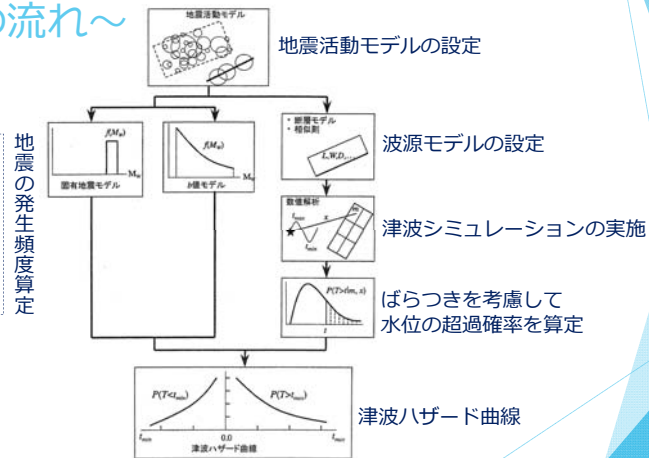
## 確率論的津波評価手法とは (本編 2.5)

▶ 対象とする原子力発電所に対して、一定の影響が考えられる津波の発生要因を複数選定し、必要な不確定性を考慮して津波水位に関する発生確率を算出する。

利用法の例

- ▶ 炉心損傷頻度等の津波リスクを算出する津波PRA(Probabilistic Risk Assessment)の入力として用いる。
- ▶ 決定論で設定した津波水位の発生確率を確認する。

## 確率論的津波ハザード解析とは ～解析の流れ～



津波ハザード解析の流れ

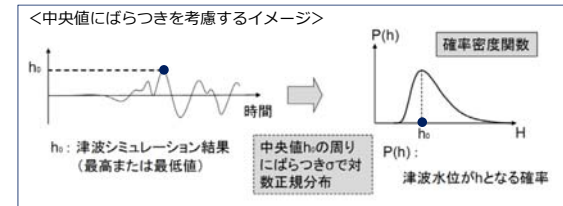
【固有地震モデル】  
特定の震源の地震活動が、同規模、同間隔で繰り返す。

【b値モデル】  
ある広がりを持つ領域内で発生する地震の規模と頻度が、ある関係式（b値で特徴付け）であらわされる。

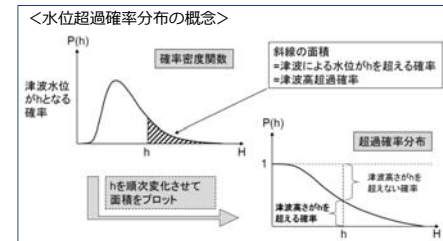
地震の発生頻度算定

## 確率論的津波ハザード解析とは ～超過確率の算定～

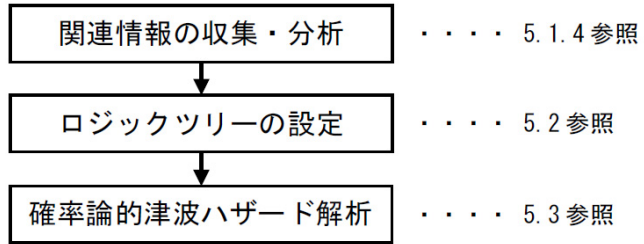
①津波シミュレーション結果の最高（最低）水位にばらつきを考慮



②水位の超過確率算定



## 確率論的津波ハザード評価手法の流れ (本編 5.1.1)



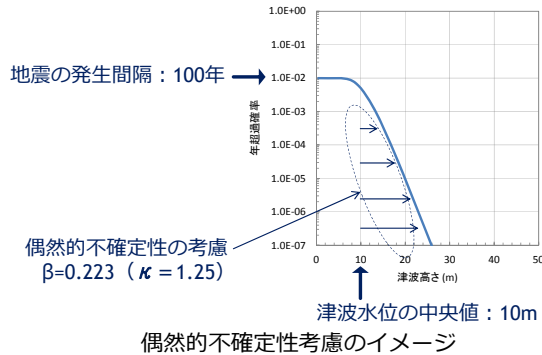
確率論的津波ハザード評価の基本的な流れ

## 関連情報の収集・分析 (本編 5.1.4)

- ▶ 津波を発生させる地震発生様式（活断層、過去の地震など）に関する情報収集
- ▶ 認識論的不確定性をロジックツリーの分岐として表すために、専門家から情報収集することも有効
- ▶ 最新知見などが公開された場合には適切に反映させる必要がある

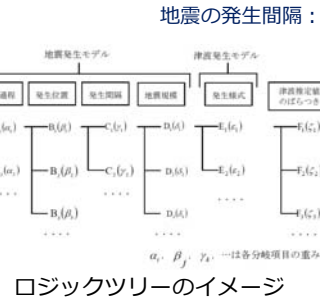
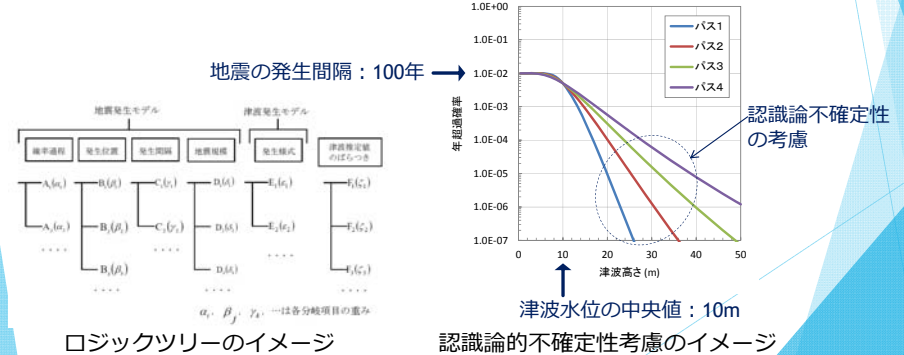
## 2種類の不確定性(本編 5.1.2)

- ▶ (1) 偶然的な不確定性 (aleatory uncertainty)
  - ▶ 物理現象固有のランダム性に起因する不確定性
  - ▶ 予測不可能
  - ▶ 1本の津波ハザード曲線の中で考慮



## 2種類の不確定性(本編 5.1.2)

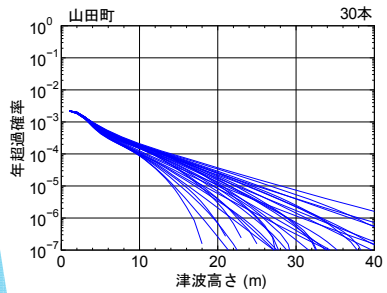
- ▶ (2) 認識論的不確定性 (epistemic uncertainty)
  - ▶ 知識や認識不足に起因する不確定性
  - ▶ 研究が進捗すれば確定させることができるが現状では予測不可能なもの
  - ▶ ロジックツリーの分岐として考慮し、複数の津波ハザード曲線で表現



ロジックツリーのイメージ

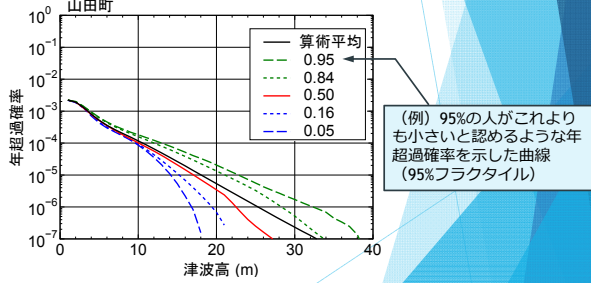
## 2種類の不確定性(本編 5.1.2) ～認識論的不確定性の評価事例～

ある津波高さを超える1年あたりの確率



ロジックツリーの全パスのハザード曲線

ある津波高さを超えないとみなす専門家の  
のコンセンサスの割合



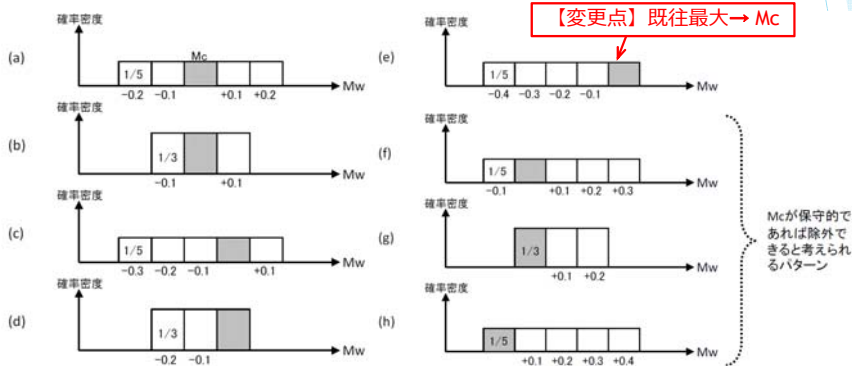
フラクタイルハザード曲線と  
算術平均ハザード曲線

(例) 95%の人がこれより  
も小さいと認めるような年  
超過確率を示した曲線  
(95%フラクタイル)

## モデル化の基本的考え方 (本編 5.2)

- ▶ 震源を特定できる地震のモデル化 (5.2.1) ◀ **Gutenberg-Richter(G-R)式によるモデル化の考え方を追加**
- ▶ 背景的地震のモデル化 (5.2.2)
- ▶ 津波高さ分布の評価(5.2.3)
- ▶ ロジックツリーの分岐の分類および重みの設定方法(5.2.4)

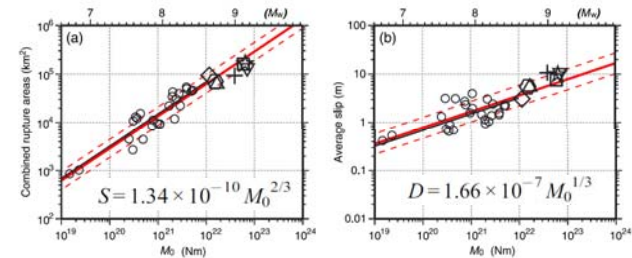
## マグニチュード分布(本編 5.2.1 (2)) ～マグニチュードの分布幅～



Mcが保守的であれば除外できると考えられるパターン

マグニチュードの分布幅に対する中央マグニチュード (Mc) の位置の可能性

## マグニチュード分布(本編 5.2.1 (2)) ～応力降下量による設定～



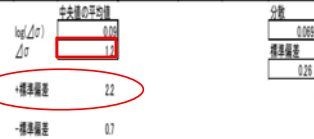
プレート間地震のパラメタ関係 (Murotani et al., 2013)

- 《円形クラックモデルを適用》
- ・応力降下量の平均値 :  $\Delta\sigma=1.57\text{MPa}$
  - ・ばらつきを考慮 (平均±標準偏差) :  $\Delta\sigma=0.82\sim 3.00\text{MPa}$  (=Mw:±0.2)
  - (平均±0.5標準偏差) :  $\Delta\sigma=1.14\sim 2.17\text{MPa}$  (=Mw:±0.1)

## マグニチュード分布(本編 5.2.1 (2)) ～応力降下量による設定～

Earthquake	Reference	data	M0 (N·m)	Mw	S (km <sup>2</sup> )	$\sigma$ (MPa)	$\ln(10/\sigma)$	地震別中央値	地震別平均MPa	地震別分散	標準	
2003 Takachiho	Tanaka et al. (2004)	Tu, G	1.00E+21	8.1	9900	2.6	-0.41	0.41	2.60	0.00	0.000	0.008
1946 Nankai	Satake (1993)	Tu, G	3.90E+21	8.3	54000	0.7	-0.15			0.01		
	Kato and Ando (1997)	Tu, G	4.00E+21	8.3	54000	0.8	-0.10			0.00		
	Tanaka and Satake (2001a)	Tu	5.30E+21	8.4	52650	1.1	0.04	-0.05	0.89	0.01	0.006	0.018
	Saba et al. (2002)	Tu	4.90E+21	8.4	52650	1	0.00			0.00		
1944 Tonankai	Satake (1993)	Tu, G	2.00E+21	8.1	49800	0.5	-0.30			0.01		
	Kato and Ando (1997)	Tu, G	2.80E+21	8.2	43200	0.8	-0.10	-0.22	0.60	0.02	0.004	0.085
	Tanaka and Satake (2001b)	Tu	2.00E+21	8.1	42525	0.6	-0.22			0.00		
東北地方太平洋沖地震	内閣府	Tsunami+GPS	4.21E+22	9.0	1.20E+05	2.5	0.39	0.39	2.47	0.00	0.000	0.093
2010年千代田地震	Lombo et al. (2011)	GPS+Tsunami+SHR	1.55E+22	8.8	130000	0.8	-0.08	-0.08	0.83	0.00	0.000	0.029
2004年スマトラ地震	Lombo et al. (2010)	GPS+Tsunami+衛星	6.63E+22	9.15	315000	0.9	-0.03	0.07	1.17	0.01	0.009	0.000
	Fuji and Satake	Tsunami+衛星	6.00E+22	9.12	220000	1.5	0.19			0.01		

・海溝型地震の平均応力降下量  
・中央防災会議での海溝型地震の津波検討で用いていた



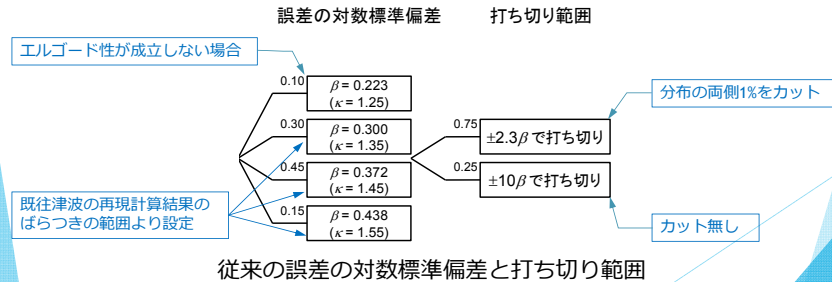
応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) = 3MPaを適用

津波観測データを用いた解析による平均応力降下量の整理 (内閣府, 2012)

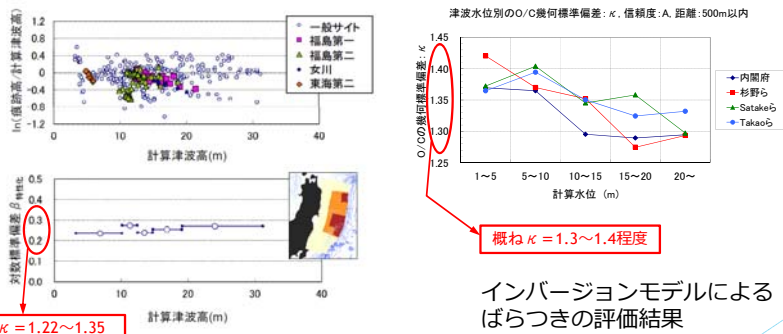
## 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))

【基本的な考え方】

- 津波水位の不確定性是对数正規分布あるいは打ち切りのある対数正規分布で表現
  - ・パラメータ：対数標準偏差 ( $\beta$ )、打ち切り範囲
  - ・対数標準偏差は相田(1977)の幾何標準偏差 ( $\kappa$ ) より次式で算定  $\ln(\kappa) = \beta$



## 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(1)～



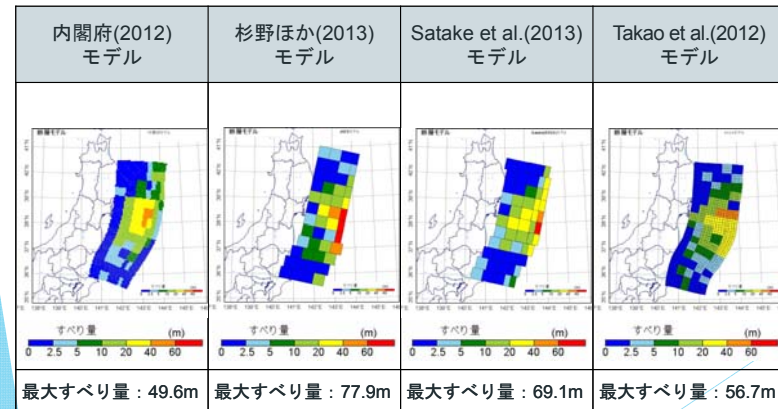
インバージョンモデルによる  
ばらつきの評価結果  
(栗田ほか, 2013)

注) 特性化波源モデル×地形モデルの最小格子サイズ 5.5m

特性化波源モデルによるばらつき評価検討  
結果 (杉野ほか, 2014)

## 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(2)～

分析に使用した波源モデル



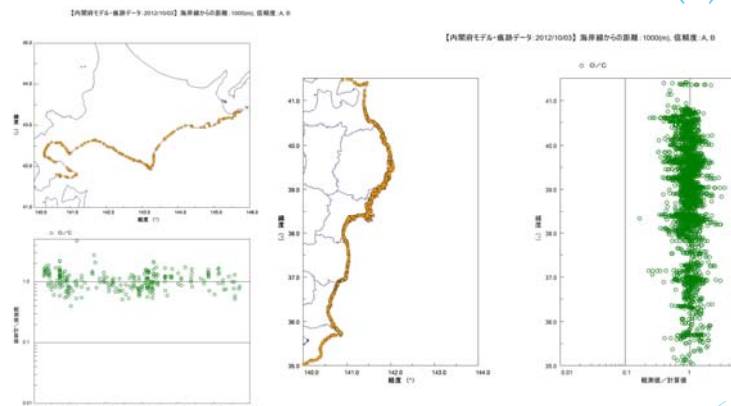
誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(3)~

解析領域内の痕跡データの信頼度別内訳

信頼度	痕跡点数
A (信頼度大)	3,207
B (信頼度中)	763
C (信頼度小)	100
D (信頼度極小)	16
X	1
NA	118
—	1
合計	4,206

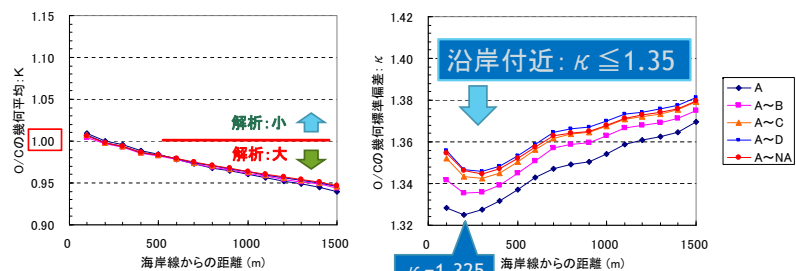
注) 痕跡高: 1m以上, 遡上距離: 1.5km以内に限定

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(4)~



O/Cの分布図 - 内閣府(2012)モデル -

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(5)~



(a) O/Cの幾何平均値(K)

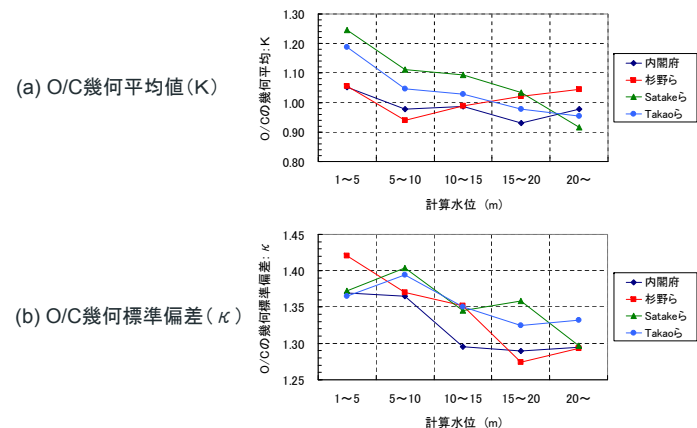
《広域の再現計算では0.95 < K < 1.05が目安》

(b) O/Cの幾何標準偏差(κ)

《広域の再現計算ではκ < 1.45が目安》

海岸線からの遡上距離別(累積)の集計結果  
 - 内閣府(2012)モデル -

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(6)~

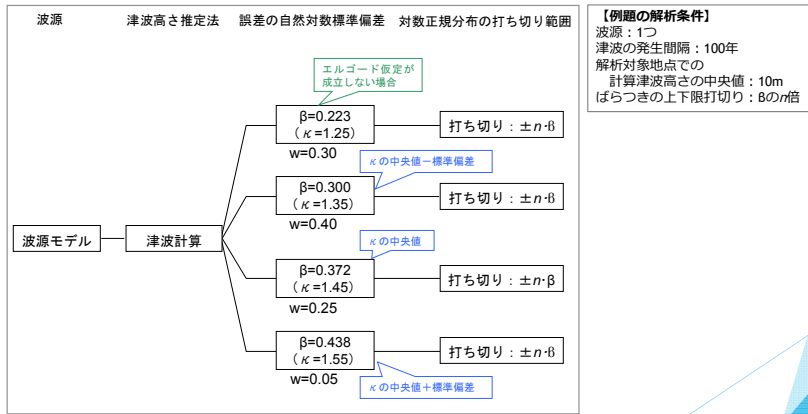


(a) O/C幾何平均値(K)

(b) O/C幾何標準偏差(κ)

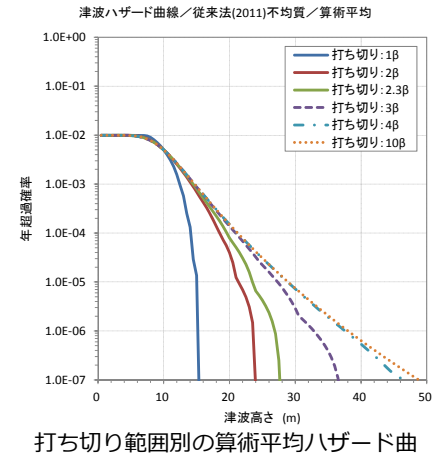
計算水位の大きさに応じたばらつきに関する検討結果

### 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(7)～

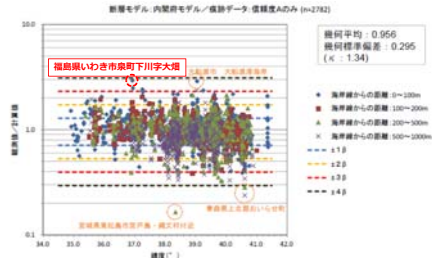
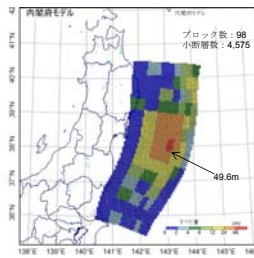


※ ロジックツリーの重みはアンケート調査結果に基づく重みのうち不均質すべりモデルの場合  
従来法：確率的津波ハザード解析の方法(2011)のロジックツリー

### 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(8)～



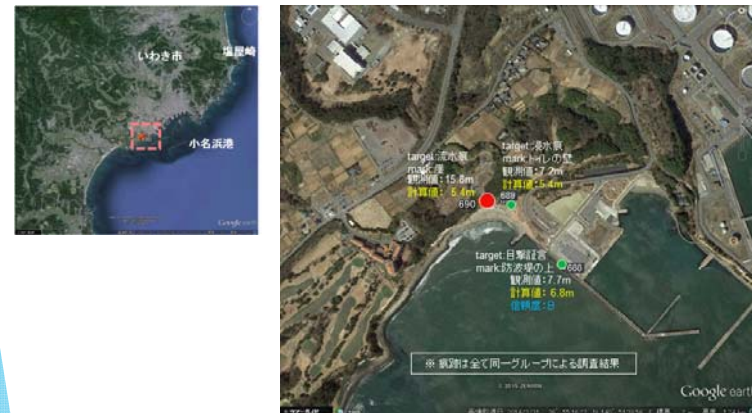
### 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(9)～



東北地方太平洋沖地震の再現計算  
結果の観測値/計算値の分布

内閣府のインバージョンモデル

### 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(10)～



福島県いわき市泉町下川字大畑の痕跡地点 (信頼度: A, No.690)

## ロジックツリーの分岐の重み設定方法 (本編 5.2.4)

重みは将来の正しさの可能性に対する現時点での判断を示すものであり、自然科学的な意味での正しさとは直接関係しないと考えられる。

### 【重みの設定方法】

- アンケートに基づく方法
  - ・ 現時点での専門家集団の見解の分布
- アンケートに基づかない場合の重み配分の方法
  - ・ 例えば、下表のように設定する

重みの配分 (2分岐の場合)	前提条件
0.5 : 0.5	現時点の見解で重み付けを判断するのが困難な場合
0.3 : 0.7	関連情報に基づけば片方の重みが高いと考えられる場合
0.1 : 0.9	関連情報に基づけば分岐を設ける必要が無いと考えられるが、分岐として成立する可能性を考慮する場合

25

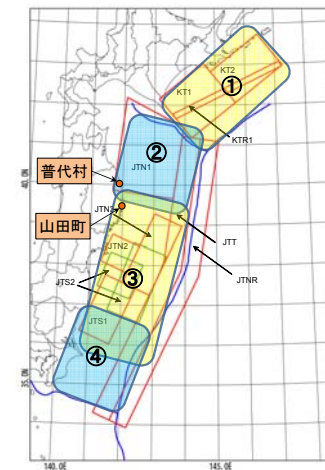
## 確率論的ハザード解析の手順 (本編 5.3)

- ▶ 計算手順(5.3.1)
  - ① 地震の発生確率の計算
  - ② 津波高さ分布の計算
  - ③ 潮位分布の考慮
  - ④ 津波水位ハザード曲線の作成
  - ⑤ フラクタイルハザード曲線の作成
- ▶ 地震の発生確率の算定(5.3.2)
- ▶ 地震発生モデル・津波伝播モデルの設定(5.3.3)
- ▶ 津波高さ分布の計算(5.3.4)
- ▶ 潮位分布の考慮(5.3.5)
- ▶ フラクタイル曲線の作成(5.3.6)

26

## 確率論的津波評価の適用事例 (付属編 第7章) ～千島海溝から日本海溝沿いの海域～

## 評価地点および検討対象とする波源域

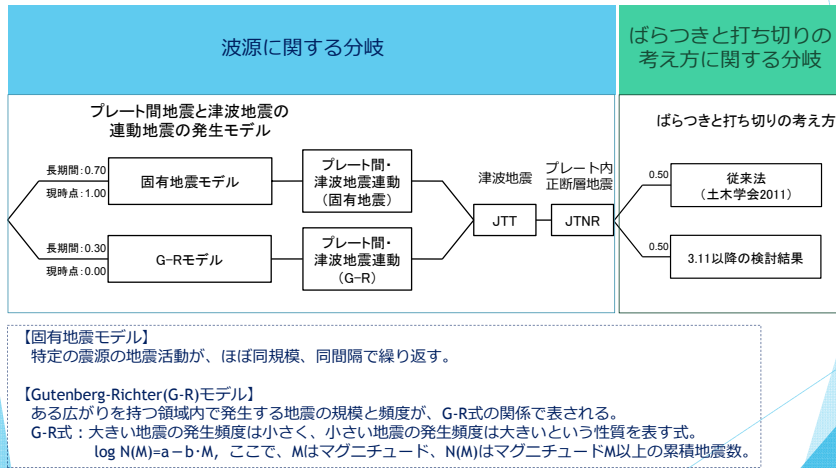


- プレート間地震と津波地震の運動地震
- ・ ① 十勝沖～根室沖
  - ・ ② 三陸沖北部
  - ・ ③ 三陸沖中部～茨城県沖  
(東北地方太平洋沖型)
  - ・ ④ 茨城県沖～房総沖
- 津波地震
- ・ JTT
- 海洋プレート内の正断層地震
- ・ JTNR

27

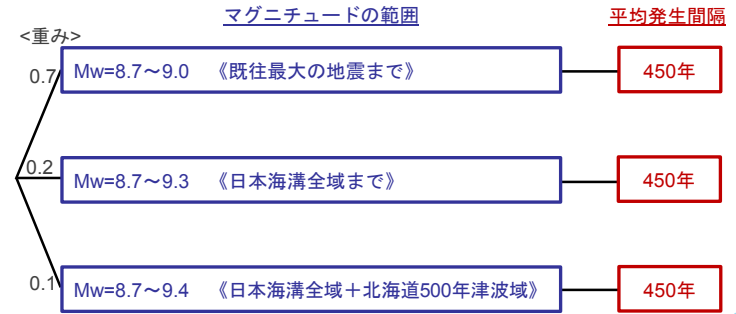
28

# ロジックツリーの構築



全体のロジックツリー

# Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震のロジックツリー～



千島海溝～日本海溝のM9級巨大地震発生ロジックツリー

# Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～GRモデルのマグニチュード範囲～

各領域のMw ( $\Delta\sigma=3\text{MPa}$ として、領域面積から算定)



領域番号	Mw
①	8.8
②	8.7
③	9.0
④	8.7

最小マグニチュードをMw=8.7とする。

マグニチュードの範囲

マグニチュードの範囲	領域
Mw=8.7~9.0	既往最大の地震まで (③)
Mw=8.7~9.3	日本海溝全域まで (②+③)
Mw=8.7~9.4	日本海溝全域+北海道500年津波域 (①+②+③)

断層モデル: 0.1刻みの各Mwに対応する特性化震源モデルを用い、大滑り域を移動させる。

日本海溝の巨大地震発生領域

# Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(1)～

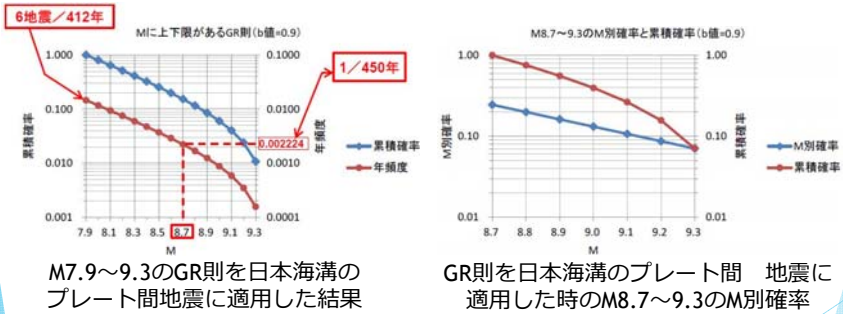
1600年～2011年までの412年間に日本海溝で発生したM7.9以上のプレート間地震(津波地震を除く)

No.	地震発生領域	地震発生日月	地震規模 (M)
1	三陸沖北部	1677年4月13日	7.3,4~8.0*
2	三陸沖北部	1763年1月29日	7.9*
3	三陸沖北部	1856年8月23日	7.8~8.0*
4	三陸沖北部	1968年5月16日	8.3 (Mw)
5	三陸沖南部海溝寄り	1793年2月17日	7.9
6	東北地方太平洋沖型	2011年3月11日	9.0 (Mw)

\* 宇佐美(1996)にある記述。津波等の記録から1968+勝沖と似ておりこれらのMとなる可能性を指摘している。  
出典: 地震調査研究推進本部: 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版), 平成23年11月25日。



## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(2)～



※ b値は日本周辺の平均としてb=0.9としている (地震調査研究推進本部)

33

## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(3)～

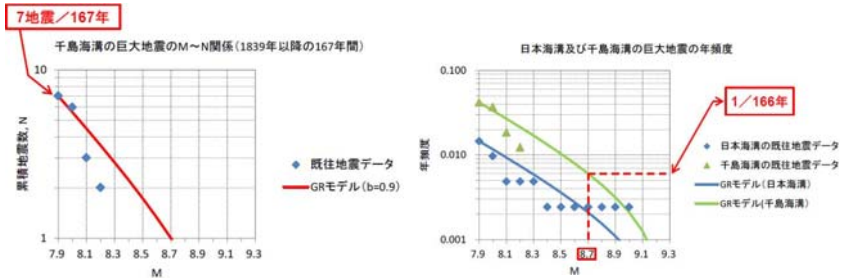
1839年～2005年までの167年間に千島海溝で発生したM7.9以上のプレート間地震

No.	地震発生領域	地震発生日月日	地震規模 (M)
1	十勝沖	1843年4月25日	8.0
2	十勝沖	1952年3月4日	8.2
3	十勝沖	2003年9月26日	8.0
4	根室沖	1894年3月22日	7.9
5	色丹島沖	1969年8月12日	8.2 (Mw)
6	択捉島沖	1918年9月8日	8.0
7	択捉島沖	1963年10月13日	8.1

出典：地震調査研究推進本部：千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第二版），平成16年12月20日。

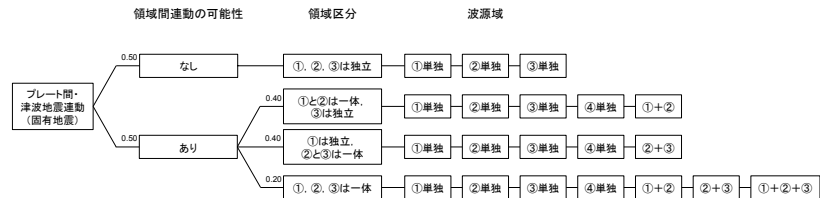
34

## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(4)～



35

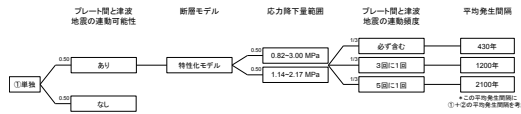
## 固有地震モデル ～連動に関するロジックツリー～



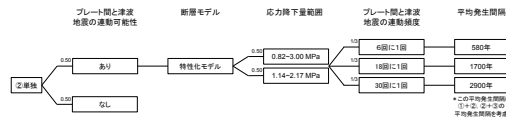
固有地震モデルのロジックツリー (領域間の連動に関する分岐)

36

# 固有地震モデル ～単独地震のロジックツリー(1)～



①単独（十勝沖～根室沖）のロジックツリー

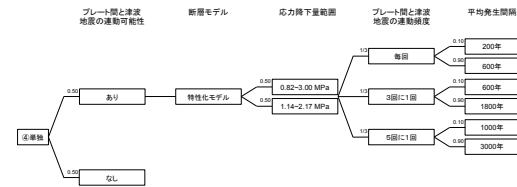


②単独（三陸沖北部）のロジックツリー

# 固有地震モデル ～単独地震のロジックツリー(2)～

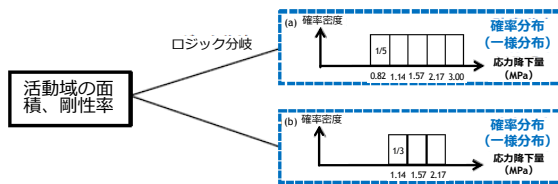


③単独（三陸沖中部～茨城県沖）のロジックツリー



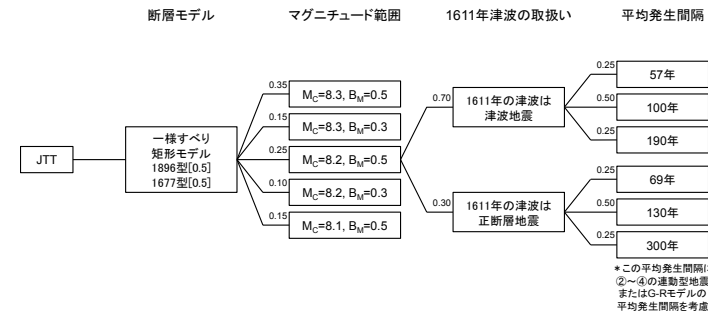
④単独（茨城県沖～房総沖）のロジックツリー

# 固有地震モデル ～応力降下量のロジック分岐～



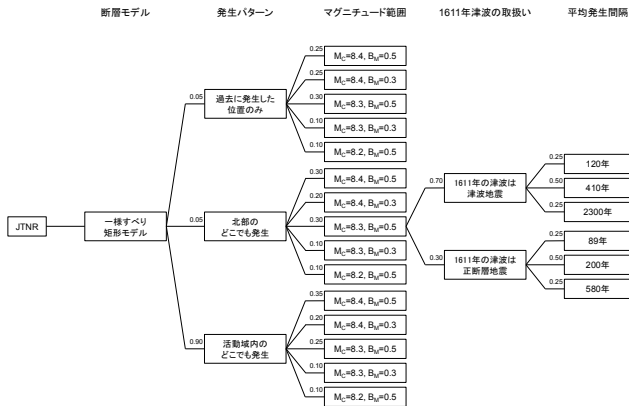
Murotani et al. (2013)による応力降下量の1×標準偏差の範囲：  
 $1.57/1.91=0.82 \sim 1.57 \times 1.91=3.00$   
 ← Mw±0.2の範囲にほぼ相当  
 Murotani et al. (2013)による応力降下量の0.5×標準偏差の範囲：  
 $1.57/1.91^{0.5}=1.14 \sim 1.57 \times 1.91^{0.5}=2.17$   
 ← Mw±0.1の範囲にほぼ相当

# 固有地震モデル ～その他の地震のロジックツリー(1)～



JTT（津波地震）のロジックツリー

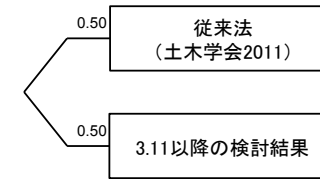
# 固有地震モデル ～その他の地震のロジックツリー(2)～



JTRN (海洋プレート内の正断層地震) のロジックツリー

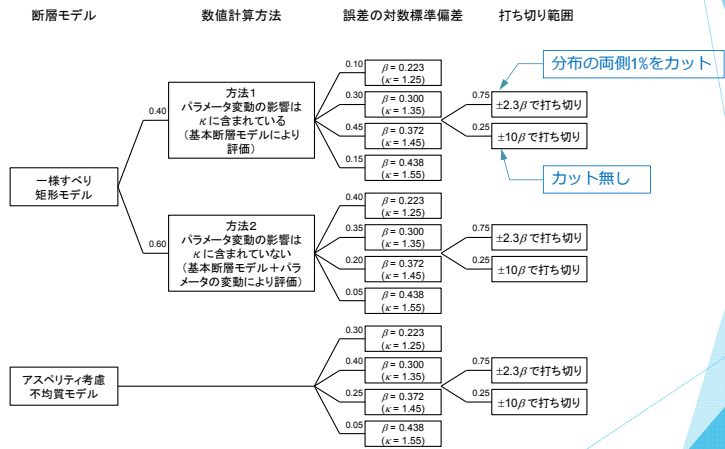
# ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐(1)

## ばらつきと打ち切りの考え方



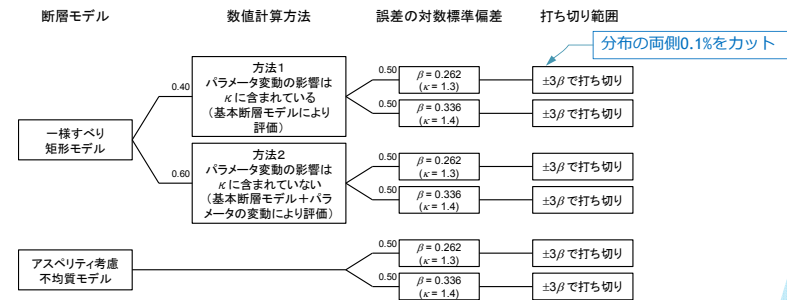
ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐

# ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐(2)



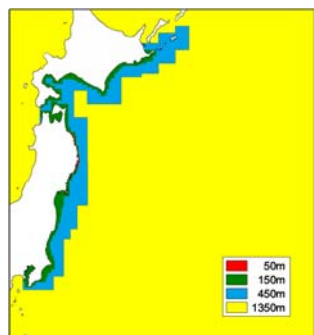
従来法 (土木学会2011)

# ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐(3)



3.11以降の検討結果

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～計算条件(1)～



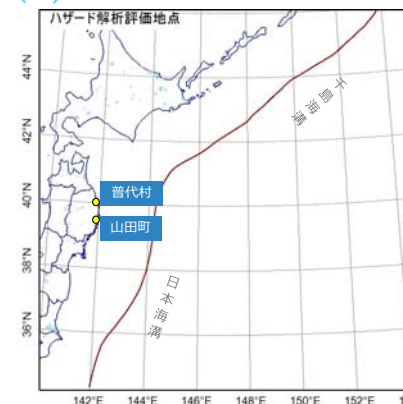
計算格子

### 計算条件

項目	内容
解析領域	北海道から千葉までの太平洋
計算格子サイズ	沖合1350 m→450 m→150 m→沿岸域50 m
基礎方程式	非線形長波理論
海底の初期変位量	Mansinha and Smylie(1971)の方法 (特性化モデルでは水平変位による造波を考慮)
境界条件	沖側：自由透過，陸側：完全反射
越流条件	防波堤：本間公式
水平渦動粘性係数	考慮せず
摩擦係数	マンングの粗度係数 海域：0.03 m <sup>1/3</sup> ・s
潮位条件	T.P. ±0.0 m
計算時間間隔	0.5秒
再現時間	地震発生後240分間（4時間）
ライズタイム	30秒

45

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～計算条件(2)～



確率論的ハザード解析の評価地点

46

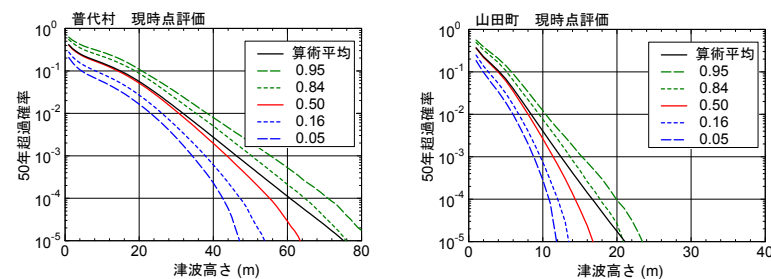
## 確率論的津波ハザード解析結果 ～計算条件(3)～

### 地震発生確率の算定方法

波源域	発生確率の算定方法
①単独	ポアソン過程
②単独	ポアソン過程
③単独	更新過程（BPT分布） 最新発生時期：2011/3/11
④単独	ポアソン過程
①+②	ポアソン過程
②+③	ポアソン過程
①+②+③	ポアソン過程
JTT	ポアソン過程
JTNR	ポアソン過程

47

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～現時点評価～

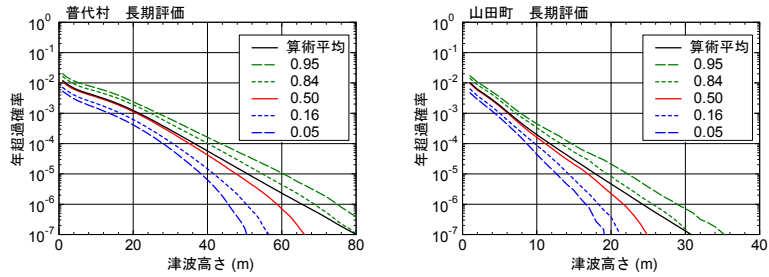


現時点評価の算術平均およびフラクティル曲線（縦軸：50年超過確率）  
（2016年1月1日起点）

<現時点評価とは、評価時点の地震発生頻度に基づく超過頻度を用いる方法（更新過程に基づく方法）。>

48

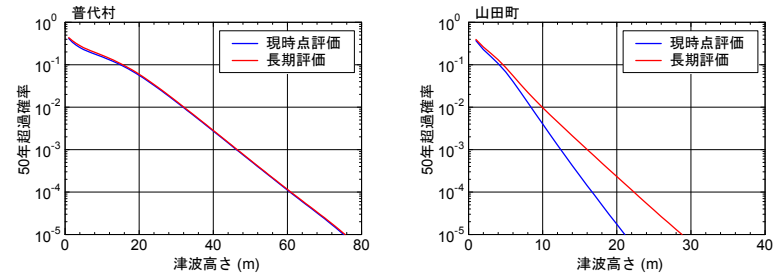
## 確率論的津波ハザード解析結果 ～長期評価～



長期評価の算術平均およびフラクティル曲線（縦軸：年超過確率）

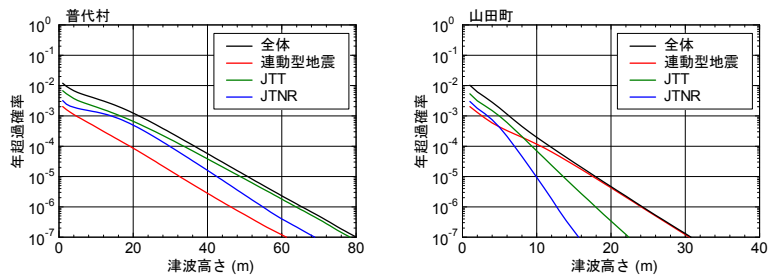
<長期評価とは、ポアソン過程による平均的な地震発生頻度に基づく年超過頻度を用いる方法。>

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～現時点評価と長期評価の比較～



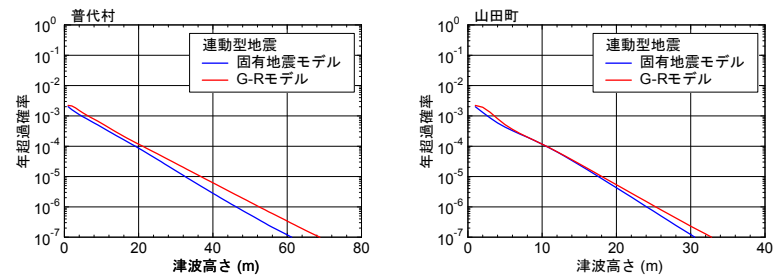
現時点評価と長期評価の算術平均の比較（縦軸：50年超過確率）

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～ロジック分岐の影響評価(1)～



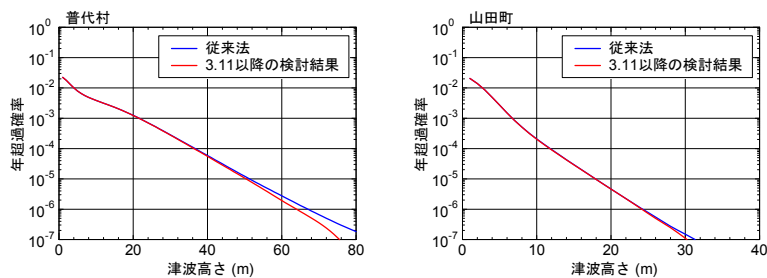
長期評価の波源別算術平均ハザード曲線

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～ロジック分岐の影響評価(2)～



プレート間地震と津波地震の連動地震 (①～④) の発生モデルに関する分岐の影響

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～ロジック分岐の影響評価(3)～



ばらつきと打ち切りに関する分岐の影響

53

## 確率論的津波評価手法に関する知見（付属編 第5章）

54

## 確率論的津波評価手法に関する知見

- ▶ 誤差の標準偏差と打ち切り範囲 (5.1)
  - ▶ 計算結果と痕跡高のばらつきの統計的性質 (5.1.1)
  - ▶ 津波高さ推定値のばらつきに関する検討 (5.1.2)
- ▶ 専門家の活用 (5.2)
  - ▶ 日本原子力学会標準の考え方 (5.2.1)
  - ▶ SSHACレポートの方法 (5.2.2)
- ▶ G-R式のb値に関する既往知見 (5.3)
- ▶ 確率論的津波ハザード解析結果に高潮が及ぼす影響 (5.4)
  - ▶ 検討対象 (5.4.1)
  - ▶ 確率台風モデルの設計 (5.4.2)
  - ▶ 台風の理論最大強度の計算 (5.4.3)
  - ▶ 津波ハザード解析に高潮が与える影響 (5.4.4)
  - ▶ まとめ (5.4.5)

55

## 確率論的津波評価手法に関する知見 ～専門家の活用(5.2)～

日本原子力学会標準の考え方（日本原子力学会(2012)）

専門家活用水準	概要
専門家活用水準1	不確かさへの影響が比較的小さい水準を想定し、ロジックツリーの技術的な纏め役が自らロジックツリーを作成する。
専門家活用水準2	不確かさの影響が比較的大きいことを想定し、ロジックツリーの技術的な纏め役がモデルの提案者および関連する専門家に接触して見解を聴取、又は専門家を一堂に集めて討論などを通じて、コミュニティ分布を評価してロジックツリーを作成する。
専門家活用水準3	不確かさの要因が多岐に亘り、重要かつ複雑と判断されることを想定し、モデル提案者でなく不確かさの客観評価者として専門家を活用し、纏め役が編成した専門家によるパネルが評価したコミュニティ分布を公平に集約してロジックツリーを作成する。

56

## 確率論的津波評価手法に関する知見 ～専門家の活用(5.2)～

SSHACレポート (NRC, 1997) の検討レベルおよび検討方法 (日本原子力学会(2015))

検討レベル	課題の程度	検討方法
レベル1	ハザードへの影響度が小さい場合	TIが文献レビュー、経験に基づきモデルを評価し、コミュニティの分布を見積もる。
レベル2	ハザードに影響、意見の違いがある場合	TIがモデル提案者や関連の専門家と接触し、見解や根拠を聞き、コミュニティの分布を見積もる。
レベル3	ハザードに最も影響、意見の違いあり、複雑な場合	TIがモデル提案者や関連の専門家を一同に集めて討論をもち、提案の改善、絞り込みを行い、コミュニティの分布を見積もる。
レベル4	同上 (より組織的に実施する場合)	TFIが専門家パネルを組織し、議論の焦点を絞る。各評価者のコミュニティ分布の見積もりを引き出し、集約する。

TI : Technical Integrator (ロジックツリーの技術的なまとめ役)

TFI : Technical Facilitator/Integrator (ロジックツリーの技術的なまとめ役であり、専門家の意見統合の世話役)

コミュニティ分布 : 専門家集団が総合的に評価する時点での不確定性の客観的分布