

高浜発電所 1～4号炉 基準津波について

2020年7月3日

関西電力株式会社

基準津波評価の全体概要

高浜発電所1～4号炉の基準津波評価について、警報が発表されない可能性のある津波を考慮した上で、基準津波の選定を行う。

具体的には、既許可時の基準津波評価のうち、地震以外に起因する津波について警報が発表されない場合の評価を追加し、結果を基準津波の選定に考慮する。

既許可時(2016.4.20許可)の評価

1. 敷地周辺に影響を及ぼした過去の津波
文献調査・津波堆積物調査より、発電所の安全性に影響を与えるような過去の津波がないことを確認

2. 地震に起因する津波
・大陸棚外縁～B～野坂断層
・FO-A～FO-B～熊川断層 の2波源を抽出。

3. 地震に起因する津波
(行政機関の波源モデル)
・福井県モデル(若狭海丘列付近断層)
・秋田県モデル(日本海東縁部の波源)
・検討会モデル(若狭海丘列付近断層) の3波源を抽出。

4. 地震以外に起因する津波
・海底地すべり: エリアA(Es-G3)、エリアB(Es-K5)、エリアC(Es-T2)
・陸上地すべり: No.1,2,3, No.10, No.14
を抽出。

5. 津波の組み合わせ
・福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と海底地すべりエリアB(Kinematicモデル)の組み合わせ
・FO-A～FO-B～熊川断層と陸上地すべりNo.14(運動学的手法)の組み合わせ
を抽出。

6. 基準津波の選定
基準津波1: 福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と海底地すべりエリアB(Kinematicモデル)の組み合わせ(78秒ずれ)
基準津波2: FO-A～FO-B～熊川断層と陸上地すべりNo.14(運動学的手法)の組み合わせ(54秒ずれ)
の2波源を基準津波として選定。

7. 年超過確率の参照

8. 砂移動評価

警報が発表されない場合 (今回評価)

<基準津波の選定> (選定方針は次ページ参照)

4. 地震以外に起因する津波
海底地すべりについて、警報が発表されない場合の津波評価を追加。

6. 基準津波の選定
警報が発表されない場合の津波評価結果も考慮して基準津波を選定。

7. 年超過確率の参照
6.の結果を受けて追加検討。

8. 砂移動評価
6.の結果を受けて追加検討。

〈基準津波の選定〉

【基準津波の選定方針】

- ① 敷地遡上の防止及び海水ポンプの取水性確保の観点から、各評価点において発電所への影響が大きい波源を選定する。
- ② 上記①の観点から、各評価点において最高水位・最低水位となる波源を基準津波として選定するが、敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源（施設影響が生じる波源）がある場合にはそれらを全て基準津波として選定する。
- ③ 警報が発表されない場合には警報に基づく取水路防潮ゲート閉止ができないため、ゲート内への津波の浸入によって施設の安全性に影響が生じるおそれがある。このため、警報に基づくゲート閉止を前提とした基準津波に加え、警報が発表されない場合についても上記①②の観点で基準津波を選定する。

【基準津波の選定結果】

(1) 既許可時の評価

- ・ 警報に基づいて取水路防潮ゲートを閉止する。
- ・ 敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源はない。（津波到達に対して防潮ゲート閉止が間に合わない波源もあるが、その場合でも敷地高さ及び取水可能水位を超えない。）
- ・ 防潮ゲート前面、放水口前面、放水路(奥)で最高水位となる波源は「福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と海底地すべりエリアBの組み合わせ」。 → **基準津波1として選定。**
- ・ 各海水ポンプ室及び3,4号炉循環水ポンプ室で最高水位・最低水位となる波源は「FO-A～FO-B～熊川断層と陸上地すべり(No.14)の組み合わせ」。 → **基準津波2として選定。**

※：第53回原子力規制委員会の概要（警報が発表されない可能性のある津波への対応について）

2019年6月13日会合
資料1 P2 再掲

- ・ 2018年12月22日、インドネシアのスンダ海峽にある火山島のアナク・クラカタウの噴火に伴い津波が発生。
- ・ 火山の山体崩壊土砂が海に滑り落ちたことによる津波と考えられる。（詳細は各種機関調査中）
- ・ 津波警報が発表されずに津波が襲来したことで大きな被害。
- ・ 高浜発電所では、津波警報発表後に取水路防潮ゲートを閉止することで、津波の敷地遡上を防止。
- ・ 高浜発電所に関し、津波警報が発表されない可能性がある「隠岐トラフ海底地すべり」による津波について、取水路防潮ゲートが閉状態での遡上評価、津波による海水ポンプ等の重要な設備への影響等を確認する。

(2) 警報が発表されない場合(今回評価)※

- ・ 警報に基づく取水路防潮ゲート閉止ができない。
- ・ 敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源は、「海底地すべりエリアB(Kinematicモデル)」及び「海底地すべりエリアC(Kinematicモデル)」。
→ **基準津波3、基準津波4として選定。**
- ・ 施設影響が生じる波源の確認過程における津波水位計算では、発電所に影響する波源を漏れなく抽出する観点から、水位変動が最も大きくなるように、海底地すべりの波源特性のうち崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値に設定した。一方、基準津波の選定方針では「施設影響が生じる波源がある場合にはそれらを全て基準津波として選定する」としていることから、上記2波源では、崩壊規模及び破壊伝播速度が最大値より小さい値でも施設影響が生じるのであれば基準津波として選定する必要がある。以上を踏まえ、施設影響が生じるケースを全て包含する波源とするために、**基準津波3及び基準津波4は、「海底地すべりエリアB(Es-K5、Kinematicモデル)」及び「海底地すべりエリアC(Es-T2、Kinematicモデル)」において崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持った波源として策定する。**なお、崩壊規模及び破壊伝播速度の上限値は、施設影響が生じる波源の確認過程において採用している最大値とする。
- ・ 基準津波3及び基準津波4は施設影響が生じることから、耐津波設計において対策を講じる。具体的には、若狭湾内の伝播特性により高浜発電所の取水口付近では襲来する津波の第1波より第2波以降の振幅が大きくなること、及び、基準津波3及び基準津波4では第2波以降の水位変動で施設影響が生じる結果となっていることを踏まえ、発電所構内の潮位計で判断基準(トリガー)を超える水位変動量を検知した場合に、取水路防潮ゲートを閉止し、施設影響が生じる後続波の浸入を防止することで施設影響を回避する。よって、安全設計上、施設影響が生じるケースをすべて検知できる判断基準の設定が必須である。そこで、耐津波設計では、基準津波3及び基準津波4を用いて施設影響が生じる津波をすべて検知できるように判断基準を設定する。海底地すべりを波源とする津波は、崩壊規模が小さくなると振幅が小さくなり、破壊伝播速度が小さくなると振幅が小さくなって周期が長くなる。したがって、海底地すべりを波源とする基準津波3及び基準津波4の崩壊規模、破壊伝播速度の値を小さくすることで、わずかに施設影響が生じる津波波形を作成し、これにより施設影響が生じる津波を網羅的に検知できる判断基準を設定する。よって、**耐津波設計における判断基準設定においては、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持つ基準津波3及び基準津波4を用いるものとする。**

基準津波の選定方針及び結果概要

(1) 既許可時の評価

※1: 閉: 取水路防潮ゲート天端TP+8.5mで全閉、開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0~+8.5mはカーテンウォールあり) ※2: 地盤変動量0.23m隆起

●津波水位計算結果

取水路防潮ゲート※1	波源モデル		水位上昇								水位下降				
			取水路防潮ゲート前面	3, 4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室			
閉 (Close)	地震に起因する津波	大陸棚外縁～B～野坂断層		5.3	0.9	0.9	0.9	1.3	2.1	2.1	—	—	—		
		日本海東縁部の波源		—	—	—	—	—	—	—	—	-0.8	-0.7	-1.0	
	地震以外に起因する津波	海底地すべり	エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.3	-0.3	-0.3	
				Kinematicモデルによる方法	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.6	1.8	-0.8	-0.8	-0.8	
			エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	2.0	0.8	0.8	0.8	1.0	1.9	2.1	-0.7	-0.7	-0.8	
				Kinematicモデルによる方法	4.1	1.2	1.1	1.1	1.3	3.7	4.0	-1.1	-1.0	-1.1	
			エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	2.4	0.8	0.7	0.7	1.1	1.1	1.3	-0.5	-0.5	-0.8	
				Kinematicモデルによる方法	3.3	1.1	1.1	1.1	1.2	3.7	3.9	-0.9	-0.9	-1.2	
	行政機関の波源モデルを用いた津波	福井県モデル(若狭海丘列付近断層)		4.5	1.1	1.1	1.1	1.4	3.6	3.8	-0.8	-0.8	-1.0		
		秋田県モデル(日本海東縁部の断層)		4.4	1.7	1.7	1.7	1.7	2.9	3.0	-1.4	-1.4	-1.6		
		若狭海丘列付近断層		大すべり中央	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	2.1	2.1	—	—	—	
				大すべり隣接LRR	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	1.9	—	—	—	
				大すべり隣接LLR	3.7	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	2.0	—	—	—	
	津波の組み合わせ(一体計算)	福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と隠岐トラフ海底地すべりエリアB(Es-K5)		21秒ずれ	4.9	1.3	1.3	1.2	1.7	5.0	5.8	—	—	—	
				63秒ずれ	5.1	1.3	1.3	1.2	1.8	5.3	6.1	—	—	—	
78秒ずれ				5.5	1.3	1.2	1.1	1.7	5.3	6.2	—	—	—		
開 (Open)	地震に起因する津波	FO-A～FO-B～熊川断層		2.0	2.1	1.9	1.9	2.5	2.7	2.8	-1.9※2	-1.8※2	-2.0※2		
		地震以外に起因する津波	陸上地すべり	No.1,2,3	Watts他による方法	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	-0.1	-0.1	-0.1
	運動学的手法				0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	2.1	2.1	-0.3	-0.3	-0.4	
	No.10			Watts他による方法	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	-0.1	-0.1	-0.1	
				運動学的手法	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.5	1.4	-0.1	-0.1	-0.1	
	No.14			Watts他による方法	1.0	1.1	0.9	1.0	1.0	0.6	0.6	-0.3	-0.4	-0.4	
				運動学的手法	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	0.6	0.7	-0.3	-0.4	-0.4	
	津波の組み合わせ(一体計算)	FO-A～FO-B～熊川断層と陸上地すべり(No.14)		30秒ずれ	—	—	—	—	—	—	—	-1.9※2	-1.8※2	-1.9※2	
				45秒ずれ	2.1	2.4	2.1	2.1	2.5	2.7	2.7	—	—	—	
				51秒ずれ	—	—	—	—	—	—	—	—	-1.8※2	-1.8※2	-2.0※2
				54秒ずれ	2.2	2.5	2.2	2.2	2.5	2.7	2.7	—	-1.8※2	-1.8※2	-2.0※2
				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

基準津波1

基準津波2

●施設影響の有無 ...津波水位計算結果に潮位のばらつき(上昇側+0.15m, 下降側-0.17m)、高潮の裕度(上昇側+0.49m)を考慮。

数字はT.P.(m)、青字は施設影響が生じる値(該当なし)

取水路防潮ゲート※1	波源モデル		水位上昇								水位下降				
			取水路防潮ゲート前面	3, 4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室			
閉 (Close)	地震に起因する津波	大陸棚外縁～B～野坂断層		5.9	1.6	1.5	1.5	1.9	2.7	2.8	—	—	—		
		日本海東縁部の波源		—	—	—	—	—	—	—	—	-0.9	-0.9	-1.1	
	地震以外に起因する津波	海底地すべり	エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	-0.5	-0.5	-0.5	
				Kinematicモデルによる方法	2.7	1.6	1.6	1.6	1.6	2.3	2.4	-0.9	-0.9	-1.0	
			エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	2.7	1.5	1.5	1.5	1.6	2.6	2.8	-0.9	-0.9	-1.0	
				Kinematicモデルによる方法	4.7	1.8	1.8	1.7	2.0	4.4	4.6	-1.2	-1.2	-1.3	
			エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	3.0	1.4	1.3	1.3	1.8	1.8	2.0	-0.7	-0.7	-1.0	
				Kinematicモデルによる方法	3.9	1.7	1.7	1.7	1.8	4.3	4.6	-1.1	-1.1	-1.4	
	行政機関の波源モデルを用いた津波	福井県モデル(若狭海丘列付近断層)		5.1	1.7	1.8	1.7	2.0	4.2	4.4	-1.0	-1.0	-1.2		
		秋田県モデル(日本海東縁部の断層)		5.1	2.3	2.3	2.3	2.3	3.5	3.7	-1.6	-1.6	-1.8		
		若狭海丘列付近断層		大すべり中央	4.2	1.4	1.3	1.3	1.9	2.7	2.7	—	—	—	
				大すべり隣接LRR	4.2	1.4	1.3	1.3	1.9	2.5	2.6	—	—	—	
				大すべり隣接LLR	4.4	1.4	1.3	1.3	1.9	2.5	2.6	—	—	—	
	津波の組み合わせ(一体計算)	福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と隠岐トラフ海底地すべりエリアB(Es-K5)		21秒ずれ	5.5	2.0	1.9	1.9	2.3	5.7	6.4	—	—	—	
				63秒ずれ	5.8	1.9	1.9	1.9	2.4	5.9	6.8	—	—	—	
78秒ずれ				6.1	1.9	1.8	1.8	2.3	6.0	6.8	—	—	—		
開 (Open)	地震に起因する津波	FO-A～FO-B～熊川断層		2.6	2.8	2.5	2.5	3.1	3.3	3.4	-2.0	-2.0	-2.2		
		地震以外に起因する津波	陸上地すべり	No.1,2,3	Watts他による方法	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	-0.3	-0.3	-0.3
	運動学的手法				1.3	1.4	1.3	1.3	1.5	2.7	2.8	-0.5	-0.5	-0.5	
	No.10			Watts他による方法	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5	1.7	-0.3	-0.3	-0.3	
				運動学的手法	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1	-0.3	-0.3	-0.3	
	No.14			Watts他による方法	1.6	1.7	1.5	1.7	1.7	1.2	1.3	-0.5	-0.6	-0.6	
				運動学的手法	1.7	1.9	1.7	1.7	1.7	1.2	1.3	-0.5	-0.5	-0.6	
	津波の組み合わせ(一体計算)	FO-A～FO-B～熊川断層と陸上地すべり(No.14)		30秒ずれ	—	—	—	—	—	—	—	—	-2.1	-2.1	
				45秒ずれ	2.8	3.1	2.8	2.8	3.1	3.3	3.4	—	—	—	
				51秒ずれ	—	—	—	—	—	—	—	—	-2.0	-2.0	-2.1
				54秒ずれ	2.8	3.1	2.8	2.8	3.1	3.3	3.4	-2.0	-2.0	-2.1	
				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	施設影響が生じる高さ(上昇側:敷地高さ・防潮ゲート高さ・防潮堤高さ、下降側:取水可能水位)				8.5	3.5	3.5	3.5	3.5	8.0	8.0	-3.2	-3.2	-3.5	

基準津波1

基準津波2

基準津波の選定方針及び結果概要

(2) 警報が発表されない場合(今回評価)

※1: 閉: 取水路防潮ゲート天端TP+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0→+8.5mはカーテンウォールあり)

●津波水位計算結果

数字はT.P.(m)、赤字は各評価点の最大値

取水路防潮ゲート※1	波源モデル		水位上昇								水位下降				
			取水路防潮ゲート前面	3, 4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室			
開 (Open)	地震以外に起因する津波	海底地すべり	エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.5	-0.6	-1.1
				Kinematicモデルによる方法	2.0	2.3	2.1	2.2	2.6	1.6	1.8	-1.2	-1.4	-2.2	
			エリアA (Es-G101)	Watts他の予測式	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.4	-0.5	-1.1	
				Kinematicモデルによる方法	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1	0.8	0.9	-0.6	-0.7	-1.3	
			エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	2.2	2.5	2.3	2.4	2.5	1.9	2.1	-1.4	-1.5	-2.1	
				Kinematicモデルによる方法	3.6	3.9	3.7	3.8	3.8	3.7	4.0	-3.6	-3.7	-3.7	
			エリアB (Es-K6)	Watts他の予測式	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	-0.7	-0.8	-1.3	
				Kinematicモデルによる方法	2.0	2.3	2.1	2.1	2.3	1.7	1.9	-1.4	-1.5	-2.2	
			エリアB (Es-K7)	Watts他の予測式	1.4	1.7	1.5	1.5	1.7	1.1	1.2	-0.9	-1.0	-1.6	
				Kinematicモデルによる方法	2.1	2.3	2.1	2.2	2.6	2.2	2.4	-1.5	-1.6	-2.4	
			エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	1.4	1.8	1.4	1.6	1.8	1.1	1.4	-1.3	-1.4	-2.2	
				Kinematicモデルによる方法	3.2	3.7	3.3	3.5	3.6	3.7	3.9	-2.4	-2.5	-2.8	
			エリアC (Es-T8)	Watts他の予測式	1.3	1.7	1.2	1.3	1.6	0.9	1.1	-1.0	-1.0	-1.7	
				Kinematicモデルによる方法	1.8	2.1	1.9	2.0	2.1	2.4	2.5	-1.7	-1.9	-2.6	
エリアC (Es-T13)	Watts他の予測式	0.9	1.2	0.9	1.0	1.3	0.9	0.9	-0.6	-0.7	-1.3				
	Kinematicモデルによる方法	1.8	2.0	1.8	1.8	2.1	2.3	2.4	-1.5	-1.6	-2.3				
エリアC (Es-T14)	Watts他の予測式	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	-0.6	-0.7	-1.2				
	Kinematicモデルによる方法	2.0	2.4	2.1	2.2	2.4	1.9	2.0	-1.5	-1.6	-2.1				

基準津波3

基準津波4

●施設影響の有無 ...津波水位計算結果に潮位のばらつき(上昇側+0.15m, 下降側-0.17m)、高潮の裕度(上昇側+0.49m)を考慮。

数字はT.P.(m)、青字は施設影響が生じる値

取水路防潮ゲート※1	波源モデル		水位上昇								水位下降			
			取水路防潮ゲート前面	3, 4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室		
開 (Open)	地震以外に起因する津波	海底地すべり	エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	-0.6	-0.7	-1.3
				Kinematicモデルによる方法	2.6	3.0	2.8	2.8	3.2	2.3	2.4	-1.4	-1.5	-2.4
			エリアA (Es-G101)	Watts他の予測式	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	-0.6	-0.7	-1.2
				Kinematicモデルによる方法	1.5	1.6	1.5	1.5	1.7	1.5	1.6	-0.8	-0.9	-1.5
			エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	2.8	3.1	3.0	3.0	3.1	2.6	2.8	-1.5	-1.6	-2.3
				Kinematicモデルによる方法	4.3	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	4.6	-3.7	-3.8	-3.8
			エリアB (Es-K6)	Watts他の予測式	1.7	1.9	1.8	1.8	1.9	1.6	1.7	-0.8	-0.9	-1.5
				Kinematicモデルによる方法	2.6	2.9	2.8	2.8	2.9	2.3	2.5	-1.5	-1.7	-2.4
			エリアB (Es-K7)	Watts他の予測式	2.1	2.4	2.1	2.1	2.3	1.7	1.8	-1.1	-1.2	-1.8
				Kinematicモデルによる方法	2.7	3.0	2.8	2.8	3.2	2.8	3.0	-1.7	-1.8	-2.5
			エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	2.0	2.4	2.1	2.2	2.5	1.8	2.0	-1.5	-1.6	-2.4
				Kinematicモデルによる方法	3.8	4.3	4.0	4.1	4.3	4.3	4.5	-2.5	-2.6	-2.9
			エリアC (Es-T8)	Watts他の予測式	2.0	2.3	1.9	1.9	2.3	1.6	1.7	-1.2	-1.2	-1.9
				Kinematicモデルによる方法	2.5	2.7	2.5	2.6	2.8	3.0	3.1	-1.9	-2.0	-2.8
エリアC (Es-T13)	Watts他の予測式	1.5	1.8	1.6	1.6	1.9	1.5	1.5	-0.8	-0.9	-1.4			
	Kinematicモデルによる方法	2.4	2.6	2.4	2.5	2.8	2.9	3.0	-1.7	-1.8	-2.5			
エリアC (Es-T14)	Watts他の予測式	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.4	1.5	-0.7	-0.8	-1.4			
	Kinematicモデルによる方法	2.7	3.1	2.8	2.9	3.0	2.6	2.7	-1.6	-1.8	-2.3			
施設影響が生じる高さ(上昇側: 敷地高さ・防潮ゲート高さ・防潮堤高さ、下降側: 取水可能水位)			8.5	3.5	3.5	3.5	3.5	8.0	8.0	-3.2	-3.2	-3.5		

基準津波3

基準津波4

目次

1. 敷地周辺に影響を及ぼした過去の津波	
1-1. 文献調査結果	6
1-2. 津波堆積物調査結果	10
2. 地震に起因する津波	
2-1. 地震に起因する津波影響評価検討フロー	16
2-2. 既往津波の再現性の検討	18
2-3. 津波伝播計算手法及び計算条件	22
2-4. 検討対象波源の選定及び津波評価	39
3. 地震に起因する津波(行政機関の波源モデル)	
3-1. 福井県モデル(若狭海丘列付近断層)	46
3-2. 秋田県モデル(日本海東縁部の断層)	51
3-3. 検討会モデル(若狭海丘列付近断層及びFO-A~FO-B~熊川断層)	57
4. 地震以外に起因する津波	
4-1. 海底地すべりに起因する津波評価	71
4-2. 陸上の斜面崩壊(地すべり)に起因する津波評価	130
4-3. 火山現象に起因する津波評価	147
5. 津波の組合せ	150
5-1. 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべりの組合せ	152
5-2. FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべりの組合せ	157
6. 基準津波の選定	167
7. 基準津波の年超過確率の参照	
7-1. 検討方針	191
7-2. 評価の流れ	193
7-3. 検討対象波源	195
7-4. ロジックツリーの設定	197
7-5. 評価結果	234
8. 津波に対する安全性(砂移動評価)	239

1. 敷地周辺に影響を及ぼした過去の津波

1-1. 文献調査結果

既往津波の調査結果(文献調査結果)

以下の文献調査を実施し、日本海における津波の記録を確認するとともに、地震以外の要因による津波についての記載の有無を確認。

- ① 羽鳥徳太郎(1984): 日本海の歴史津波, 月刊海洋科学, Vol.16, No. 9.
- ② 国立天文台(2014): 理科年表 平成27年, 丸善.
- ③ 宇佐美龍夫他(2013): 「日本被害地震総覧 599 - 2012」, 東京大学出版会.
- ④ 羽鳥徳太郎(2010): 歴史津波からみた若狭湾岸の津波の挙動, 歴史地震, 第25号, pp.75-80.
- ⑤ 渡辺偉夫(1998): 日本被害津波総覧[第2版], 165pp.
- ⑥ 気象庁(2007): 平成19年8月 地震・火山月報(防災編), 第1号, pp.41-42.



○既往津波に関しては、地震によるもの、地震以外の要因によるものを含め、若狭湾周辺に大きな被害をもたらした津波はない。

○火山活動に伴う山体崩壊が引き起こした津波としては、日本海側では1741年渡島沖地震の記載があるが、これ以外に、海底・陸上の地すべりや、海底火山活動、その他を成因とした津波の記録は認められない。

1-1. 文献調査結果

文献調査結果

敷地周辺の既往津波の発生状況及び痕跡高について文献調査を行い、敷地に影響を及ぼしたと考えられる既往津波を抽出する。

【日本海における主な既往の津波を発生させた地震一覧】(1/2)

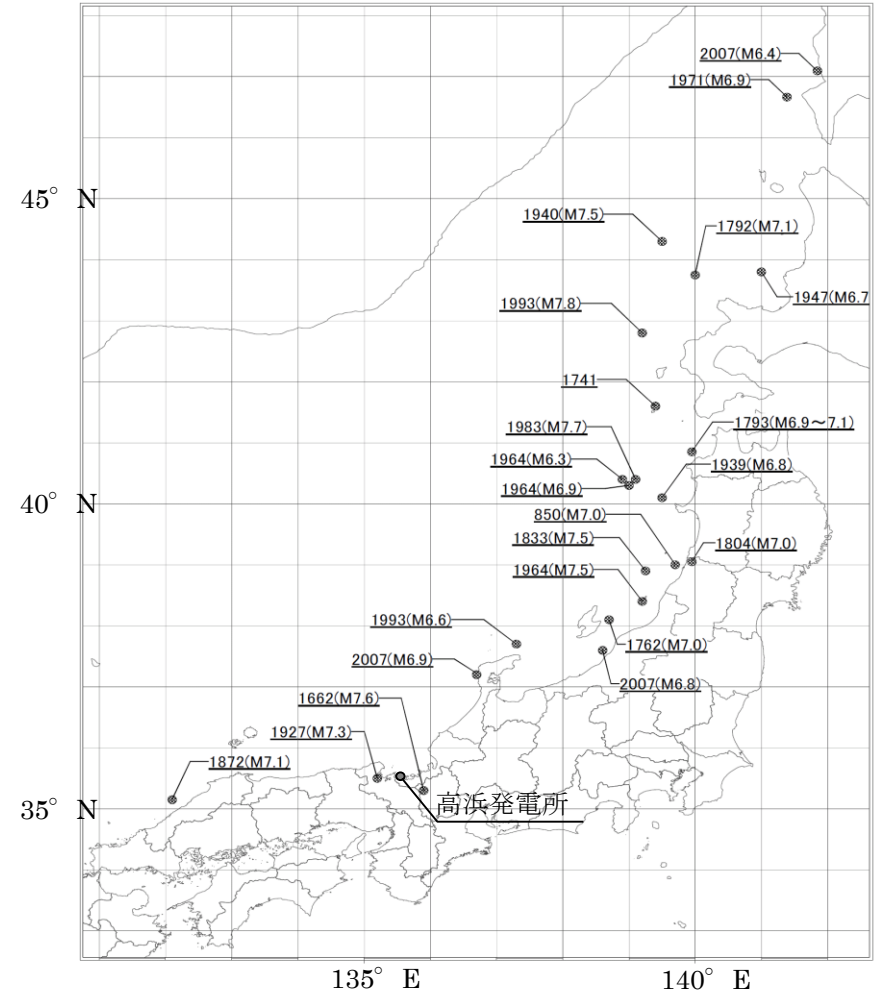
発生年月日	波源域	震央		地震規模 M	津波規模 階級 m	地震・津波の概要
		北緯 (°N)	東経 (°E)			
850.-.一 嘉祥3年	山形沖	39.0	139.7	7	2	出羽：地裂け、山崩れ、国府の城柵は傾斜し、圧死多数。最上川の岸崩れ、海水は国府から6里のところまで追った。
1662.6.16 寛文2年	近江	35.2	135.95	7 ¹ / ₄ ~7.6	—	滋賀唐崎で田畑85町湖中に没し潰家1570。大溝で潰家1020余、死37。彦根で潰家1千、死30余。榎村で死300、所川村で死260余。京都で町屋倒壊1千、死200余など。諸所の城破損。大きな内陸地震で、比良断層または花折断層の活動とする説がある。
1741.8.29 寛保1年	渡島沖	41.6	139.4	—	3	渡島西岸・津軽・佐渡：渡島大島この月の下旬より活動、13日に噴火した。19日早朝に津波、北海道で死1467、流出家屋729、船1521破壊、津軽で田畑の損も多く、流出潰家約100、死37余。佐渡・能登・若狭にも津波。
1762.10.31 宝暦12年	新潟沖	38.1	138.7	7	1	佐渡：石垣・家屋が破損、銀山道が崩れ、死者があった。鶴島村で津波により26戸流出。新潟で地割れを生じ、砂と水を噴出。酒田・羽前南村山郡・日光で有感。
1792.6.13 寛政4年	積丹沖	43.75	140.0	7.1	2	後志：津波があった。忍路で港頭の岸壁が崩れ、海岸に引き上げていた夷船漂流、出漁中の夷人5人溺死。美国でも溺死若干。
1793.2.8 寛政4年	鯉ヶ沢	40.85	139.95	6.9~7.1	1	西津軽：鯉ヶ沢・深浦で激しく、全体で潰家154、死12など。大戸瀬を中心に約12kmの沿岸が最高3.5m隆起した。小津波があり、余震が続いた。
1804.7.10 文化1年	象潟	39.05	139.95	7	1	羽前・羽後：『象潟地震』：5月より付近で鳴動があった。被害は全体で潰家5千以上、死300以上。象潟湖が隆起して乾陸あるいは沼となった。余震が多かった。象潟・酒田などに津波の記事がある。
1833.12.7 天保4年	山形沖	38.9	139.25	7 ¹ / ₂	2	羽前・羽後・越後・佐渡：庄内地方で特に被害が大きく、潰家475、死42。津波が本庄から新潟に至る海岸と佐渡を襲い、能登で大破流出家約345、死約100。
1872.3.14 明治5年	浜田	35.15	132.1	7.1	0	石見・出雲：『浜田地震』：1週間ほど前から鳴動、当日には前震もあった。全体で全潰約5千、死約550、特に石見東部で被害が多かった。海岸沿いに数尺の隆起・沈降が見られ、小津波があった。

発生年月日	波源域	震央		地震規模 M	津波規模 階級 m	地震・津波の概要
		北緯 (°N)	東経 (°E)			
1927.3.7 昭和2年	丹後	35.6	134.9	7.3	-1	京都府北西部：『北丹後地震』：被害は丹後半島の頸部が最も激しく、淡路・福井・岡山・米子・徳島・三重・香川・大阪に及ぶ。全体で死2925、家屋全壊12584。郷村断層(長さ18km、水平ずれ最大2.7m)とそれに直交する山田断層(長さ7km)を生じた。測量により、地震に伴った地殻の変形が明らかになった。
1939.5.1 昭和14年	男鹿	39.9	139.8	6.8	-1	男鹿半島：『男鹿地震』：2分後にもM6.7の地震があった。半島頭部で被害があり、死27、住家全壊479など。軽微な津波があった。半島西部が最大44cm隆起した。
1940.8.2 昭和15年	積丹沖	44.4	139.8	7.5	2	神威岬沖：震害はほとんどなく、津波による被害が大きかった。波高は、羽幌・天塩2m、利尻3m、金沢・宮津1m、天塩河口で溺死10。
1947.11.4 昭和22年	留萌沖	43.8	141.0	6.7	1	北海道西方沖：北海道の西側に津波があり、波高は利尻島杓形で2m、羽幌付近で0.7m。小被害があった。
1964.5.7 昭和39年	男鹿沖	40.4	138.7	6.9	-1	男鹿半島沖：青森・秋田・山形3県に民家全壊3などの被害があった。
1964.6.16 昭和39年	新潟沖	38.4	139.2	7.5	2	新潟県沖：『新潟地震』：新潟・秋田・山形の各県を中心に被害があり、死26、家屋全壊1960、半壊6640、浸水15297、その他船舶・道路の被害も多かった。新潟市内の各所で噴砂水がみられ、地盤の流動化による被害が著しかった。津波が日本海沿岸一帯を襲い、波高は新潟県沿岸で4m以上に達した。粟島が約1m隆起した。
1964.12.11 昭和39年	秋田県沖	40.4	139.0	6.3	-1	八郎潟干拓堤防約1kmが20cm沈下、亀裂2箇所。検潮記録による津波の最大振幅は深浦10cm。
1971.9.6 昭和46年	樺太沖	46.7	141.4	6.9	0	震度は樺内3、北見江幸2、網走・根室1であったが、樺太全体で有感。震央付近では気象庁震度で5~6相当で地震の被害があったと思われる(詳細不明)。日本において津波は樺内で最も大きく、検潮記録による津波の最大全振幅は64cm。
1983.5.26 昭和58年	秋田・青森沖	40.4	139.1	7.7	2~3	秋田県沖：『日本海中部地震』：被害は秋田県で最も多く、青森・北海道がこれに次ぐ。日本全体で死104(うち津波によるもの100)、傷163(同104)、建物全壊934、半壊2115、流失52、一部破損3258、船沈没255、流失451、破損1187。津波は早い所で津波警報発令以前に沿岸に到達した。石川・京都・島根など遠方の府県にも津波による被害が発生した。

文献調査結果

【日本海における主な既往の津波を発生させた地震一覧】(2/2)

発生年月日	波源域	震央		地震規模 M	津波規模 階級 m	地震・津波の概要
		北緯 (°N)	東経 (°E)			
1993.2.7 平成5年	能登半島沖	37.7	137.3	6.6	0	輪島で深度5, 石川県珠洲市を中心に地震被害あり, 重傷1人, 軽傷28人。また, 新潟県でも軽傷1人。津波の最大全振幅は以下の通り。 福井港26cm, 金沢港32cm, 輪島港51cm, 輪島25cm, 宇出津港18cm, 伏木港5cm, 富山新港5cm, 萩浦橋9cm, 富山7cm, 直江津23cm, 柏崎港48cm, 寺泊港17cm, 岩船港40cm, 両津港12cm, 小木13cm。
1993.7.12 平成5年	北海道 南西沖	42.8	139.2	7.8	3	北海道南西沖：『平成5年北海道南西沖地震』：地震に加えて津波による被害が大きくなり, 死202, 不明28, 傷323, 特に地震後間もなく津波に襲われた奥尻島の被害は甚大で, 島南端の青苗地区は火災もあって壊滅状態, 夜10時すぎの闇のなかで多くの人命, 家屋等が失われた。津波の高さは青苗の市街地で10mを越えたところがある。
2007.3.25 平成19年	能登半島沖	37.2	136.7	6.9	-1	能登半島沖：『平成19年能登半島地震』：海陸境界域の横ずれ成分を含む逆断層型地殻内地震。死1, 傷356, 住家全壊686, 半壊1740(2009年1月現在)。最大計測震度6強(石川県内3市町), 珠洲と金沢で0.2mの津波。
2007.7.16 平成19年	新潟県 上中越沖	37.6	138.6	6.8	-1	新潟県上中越沖：『平成19年新潟県上中越沖地震』：新潟県沿岸海域の逆断層型地殻内地震。2004年中越地震に近いが余震活動は不活発。震源域内の原子力発電所が被災した初めての例。死15, 傷2346, 住家全壊1331, 半壊5710(2008年10月15日現在)。最大計測震度6強(新潟県内3市村, 長野県1町), 地盤変状・液状化なども目立った。日本海沿岸で最大35cm(柏崎)の津波。
2007.8.2 平成19年	サハリン 西方沖	47.1	141.8	6.4	-	サハリン西方沖(サハリン南部付近)でM6.4の地震が発生し, 北海道で最大震度2を観測した。この地震により現地で少なくとも2名以上の死者などの被害があった(平成19年9月1日現在, 米国地質調査所による)。サハリン南部のホルムスク, ネベリスクで0.1~0.2m程度の津波が観測された(米国海洋大気庁による)。今回観測した潮位変動の高さは高いところで稚内と留萌の0.2mであった。



【日本海における既往地震の震央位置, 地震規模M】

1)波源域は羽島(1984)¹⁾および国立天文台(2014)²⁾ならびに宇佐美他(2013)³⁾による
 2)震央の位置, 地震規模および地震・津波の概要は, 国立天文台(2014)²⁾による
 3)津波規模階級m(今村・飯田)は, 国立天文台(2014)²⁾および渡辺(1998)⁴⁾による
 4)1662年に近江で発生した地震の波源域, 震央, 地震規模および地震・津波の概要は, 宇佐美他(2013)³⁾および羽島(2010)⁵⁾による
 5)1971年に樺太南西沖で発生した地震の波源域, 震央, 地震規模および地震・津波の概要は, 渡辺(1998)⁴⁾による
 6)2007年にサハリン西方沖で発生した地震の波源域, 震央, 地震規模の概要は, 気象庁(2007)⁶⁾による

1-2. 津波堆積物調査

1-2. 津波堆積物調査

既往津波の調査結果(津波堆積物調査結果)

1.調査目的

- 若狭湾における津波の痕跡に関するデータ拡充を図ることを目的として、関西電力(株)、日本原子力発電(株)、(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)の3社共同で、津波堆積物調査を実施

2.調査位置

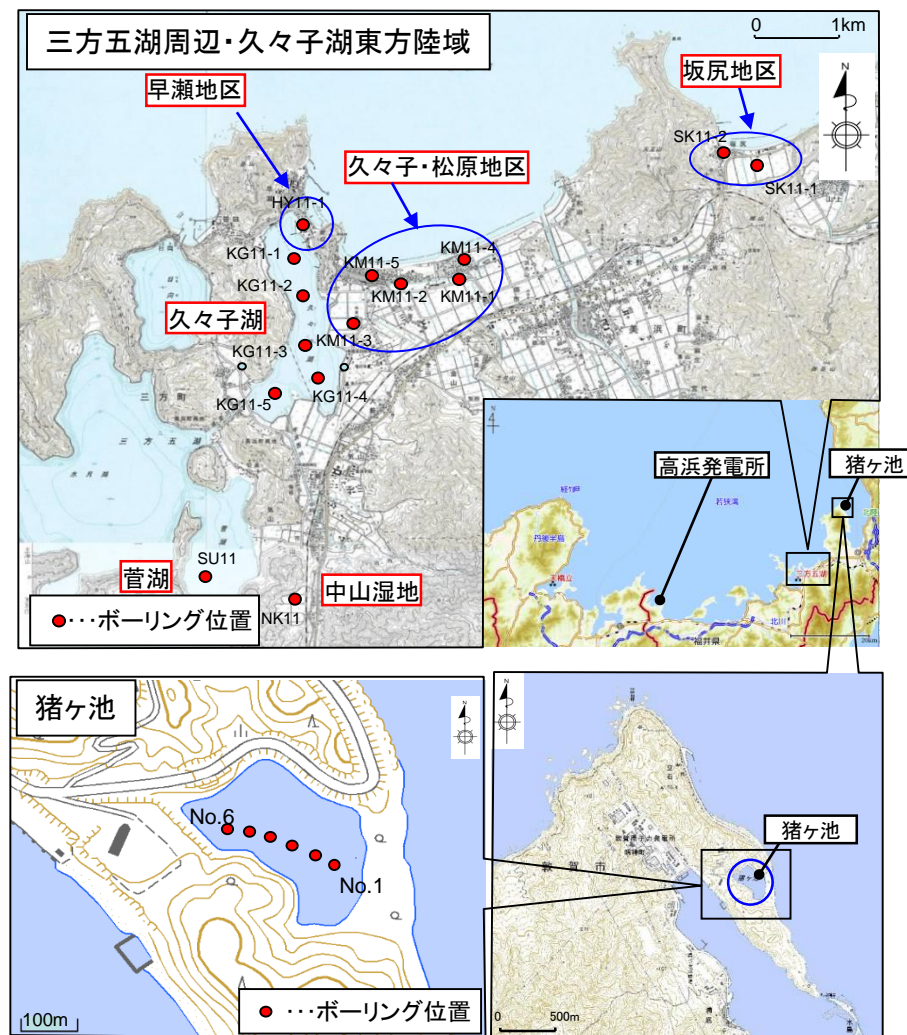
- 三方五湖周辺
(久々子湖5箇所、中山湿地1箇所、菅湖1箇所)
- 久々子湖東方陸域
(早瀬、久々子・松原、坂尻の各地区8箇所)
- 猪ヶ池(6箇所)

3.調査・評価方法

- ボーリングにより、完新世(約1万年前以降)の地層をカバーするよう試料採取を実施
- X線CTスキャンを併用した肉眼観察、微化石層分析等を実施し、海から運ばれた痕跡(砂層など)を調査し、津波堆積物の有無を評価

4.評価結果

- 各発電所の安全性に影響を与えるような津波の痕跡は認められなかった(H24.12.18原子力規制庁へ提出済)



○津波堆積物調査結果からも、高浜発電所の安全性に影響を与えるような規模の津波の痕跡は認められない。
 ○なお、本津波堆積物調査の後、新たに文部科学省研究開発局、東京大学地震研究所による「日本海地震・津波調査プロジェクト(2013)」において、日本海側の沿岸域における津波堆積物調査が行われており、今後も調査の動向を注視していく。

日本海・地震津波調査プロジェクトについて

日本海地震・津波調査プロジェクト

東京大学地震研究所

海洋研究開発機構

京都大学防災研究所

東京大学大学院工学系研究科

東京大学大学院情報学環附属総合防災情報研究センター

新潟大学災害・復興科学研究所

横浜国立大学大学院環境情報研究院

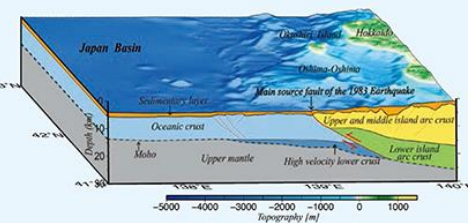
防災科学技術研究所



日本海地震・津波調査プロジェクトとは

2011年3月11日の「東北地方太平洋沖地震」により発生した大津波は、日本列島の広範な地域に極めて甚大な人的・物的な被害を及ぼし、防災対策の見直しが必要になっています。日本海側には、津波や強震動を引き起こす活断層が多数分布しており、1983年の日本海中部地震や1993年の北海道南西沖地震では、津波による深刻な被害が発生しました。これらの津波や強震動を引き起こす断層については、文部科学省の「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究（平成19～24年）」において新潟・新潟沖～西津軽沖にかけて調査が実施され、震源断層モデルが構築されています。しかし、その他の地域については、震源断層モデルや津波波源モデルを決定するための観測データが十分に得られていません。このような日本海側の地震・津波災害に対する情報不足は、自治体・事業者・住民等が防災対策をとる上での懸念材料となっていることはご承知のとおりです。このような問題に対応するために、文部科学省「日本海地震・津波調査プロジェクト」（委託先：東京大学）では、2013年9月から8カ年に渡り日本海の沖合から沿岸域及び陸域にかけての領域で観測データを取得し、日本海の津波波源モデルや沿岸・陸域における震源断層モデルを構築します。また、これらのモデルを用いて津波・強震動シミュレーションを行い、防災対策をとる上での基礎資料を

提供するとともに、地震調査研究推進本部の実施する長期評価・強震動評価・津波評価に資する基礎データを提供します。また、津波・地震災害予測に対する社会的要請の切迫性に鑑みて、調査・研究成果にもついで防災リテラシーの向上を目指して、地域研究会を立ち上げ、行政・研究者・ライフライン事業者などの間で、日本海とその沿岸の津波・地震災害予測に関する情報と問題意識の共有化を図ります。



1983年日本海中部地震の震源断層と地殻構造のイメージ図

「日本海地震・津波調査プロジェクト」の仕組み

(1) 地域の防災リテラシーの向上に向けた取り組み



情報社会学
・工学研究

(3) 津波及び強震動の予測

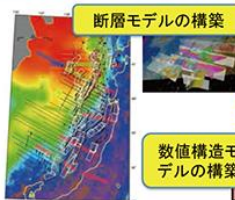


数値シミュレーション

(2) 津波波源モデル・震源断層モデルの構築



構造調査



断層モデルの構築

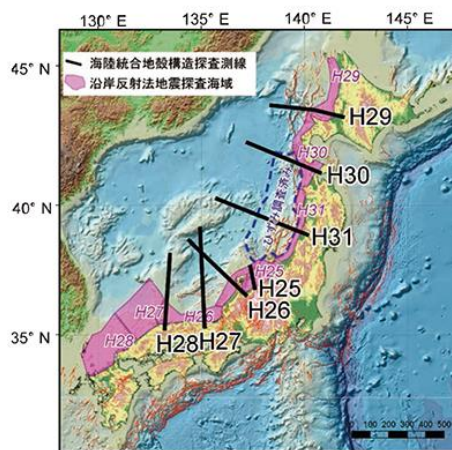


古地震・古津波調査

数値構造モデルの構築

本プロジェクトでは、構造調査を基軸として構築された断層モデルに基づいて、津波および強震動予測が行われ、これらの成果が工学や災害情報学等の研究成果を取り込みながら、全体として地域の防災リテラシー向上に活用されていくことになります。

地球科学・工学・社会科学の各サブプロジェクトの成果を有機的に結びつけて、未解決の問題点を明確にしながら、地域に還元していくことを目的として、理学的な成果を災害情報学、海岸工学的な研究を通じて、実際の地域防災リテラシー向上につなげるための研究を行います。



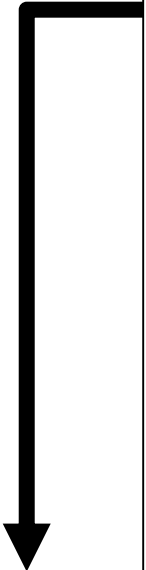
沿岸の調査にみられる約5500年前の津波堆積物（新潟県佐和田・加茂川のボーリング記録）

日本海とその沿岸において、津波や強震動を発生させる波源および震源断層について直接的なデータにもついで、断層モデルを構築することを目的として、過去の地震・津波の調査や海域および海陸統合の地下構造調査を広い領域で行います。また、海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価は、長期予測において重要な課題であり、この準備として震源断層を含む数値モデルによる検討を行います。

陸域・海域での構造調査や古地震・古津波・活構造調査などに基づいて得られた断層モデルから、日本海沿岸における津波シミュレーションにより、沿岸での津波波高を予測します。また、構築された震源断層モデルにもついで、強震動予測のための震源断層モデルに必要なパラメータを検討し、震源モデルの特性化や対象地域の地下速度構造モデルの高度化を進めます。これらの情報を組み合わせて、断層帯が活動した場合の強震動予測を行い、地震動分布の特徴を調べます。

日本海・地震津波調査プロジェクトについて

個別研究テーマ

- 
- (1) 地域の防災リテラシー向上に向けた取組
- 1-1「防災教育に対する知識構造的アプローチ」 田中 淳 東京大学情報学環附属総合防災情報研究センター
 - 1-2「沿岸防災手法の工学的評価」 佐藤 慎司 東京大学工学系研究科
 - 1-3「地域研究会・広域合同研究会の実施」 佐藤 比呂志 東京大学地震研究所
- (2) 津波波源モデル・震源断層モデルの構築
- 2-1 歴史地震・古津波調査
 - 2-1-1「歴史文書・地震記録の調査」 佐竹 健治 東京大学地震研究所
 - 2-1-2「津波堆積物の調査」 卜部 厚志 新潟大学災害・復興科学研究所
 - 2-2 海域構造調査
 - 2-2-1「沖合構造調査」 小平 秀一 海洋研究開発機構
 - 2-2-2「海域プレート構造調査」 篠原 雅尚 東京大学地震研究所
 - 2-3「沿岸海域および海陸統合構造調査」 佐藤 比呂志 東京大学地震研究所
 - 2-4「陸域活構造調査」 石山 達也 東京大学地震研究所
 - 2-5 津波波源モデル・震源断層モデルの構築
 - 2-5-1「断層モデルの構築」 佐藤 比呂志 東京大学地震研究所
 - 2-5-2「沿岸域の地震活動の把握」 松原 誠 防災科学技術研究所
 - 2-5-3「構成岩石モデルの構築」 石川 正弘 横浜国立大学
 - 2-6「海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備」 佐藤 比呂志 東京大学地震研究所
- (3) 津波及び強震動の予測
- 3-1「津波予測」 佐竹 健治 東京大学地震研究所
 - 3-2「強震動予測」 岩田 知孝 京都大学防災研究所

2-1-2「津波堆積物の調査」

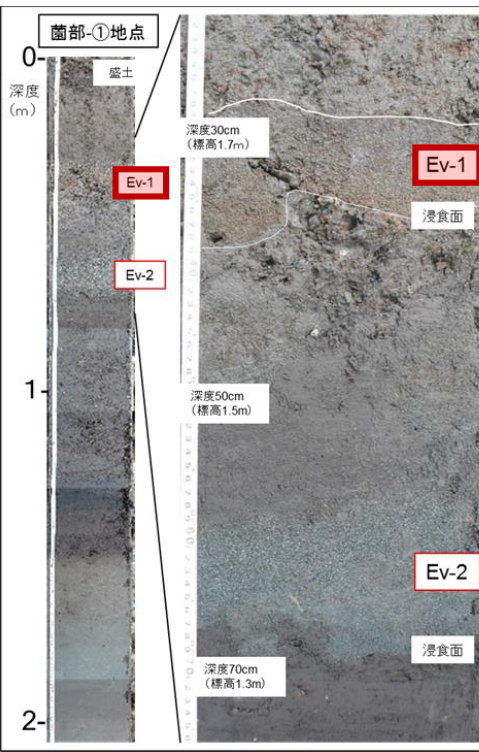
担当責任者： 卜部 厚志 准教授 新潟大学災害・復興科学研究所

北海道から九州に至る日本海沿岸域での津波堆積物の新たな認定手法も含めた検討と履歴・遡上範囲の解析を行い、歴史時代以前における津波波源の推定に必要な基礎資料を得る。

★★★平成25年度実施内容の概要★★★

福井地域を対象として、津波堆積物を確認するためのボーリング調査(10地点)、地層引抜き装置による調査(11地点)、簡易ボーリング調査(2地区)や海岸露頭調査などを行った。

日本海・地震津波調査プロジェクトに関連する一連の報告について



- <H27.5.24の口頭発表※1内容>
- ・海岸から約550m内陸の調査地点①付近において、1m以浅に海成と考えられる3層のイベント堆積物を確認。
 - ・すなわち、H25調査で見つかった3層のイベント堆積物のうち、最も浅いEv-1層が、Ev-1a, 1bの2層に分かれる。
 - ・放射性炭素分析により、Ev-1a, Ev-1b, Ev-2のイベント年代としては、14世紀～16世紀程度で、明確な差はなかった。
 - ・イベント堆積物は、津波由来の可能性が高い。
 - ・イベントの回数については更なる検討が必要。
 - ・今回見つかったイベント堆積物が天正地震によるものかどうかは、年代分析結果からははっきりしない。

※1: 山本博文・ト部厚志・佐々木直広・高清水康博・片岡香子 (2015): 若狭湾沿い、高浜町の海岸低地におけるトレンチおよびハンドオーガーによる津波堆積物調査, 日本地球惑星科学連合2015年大会, MIS25-04, 口頭発表

日本海地震・津波調査プロジェクト平成25年度成果報告書(平成26年5月)文部科学省研究開発局、国立大学法人東京大学地震研究所

○本プロジェクトの一環として、福井大・山本教授らにより津波堆積物調査が行われており、H25年度の調査で津波起源の可能性のある3層のイベント堆積物が見つかったとの報告※2がなされている(上図)。さらに、H27.5.24の地球惑星科学連合大会における口頭発表において、これらのイベント堆積物のうち、比較的浅いEv-1及びEv-2イベントの発生年代について追加検討した結果が報告されている。

○報告のあったイベント堆積物(Ev-1a, Ev-1b及びEv-2)は、イベント年代は14世紀～16世紀であるが、天正地震(1586)よりもやや古い年代の測定結果が出ていることから、特定には至らずはっきりしたことはいえない、とされている。

○ト部他(2014)※3によると、「津波と考えられる堆積物の分布状況等から復元すると、これらの堆積物を形成した津波は当時の海側に位置した浜堤を大きく乗り越えるような規模ではなく、流出河川等から遡上して内陸側の一部に分布した可能性がある。」とされている。山本他(2016)※4においても調査結果について報告されているが、イベント堆積物の層厚分布及び植物片の並びから、津波は「現在の笠原川河口付近の浜堤の切れ間から低地へと入り込んできたと推測される」とあり、ト部他(2014)と同様の考察がされている。

○今回報告のあったイベント堆積物(Ev-1a, Ev-1b及びEv-2)は調査地点①のみで見つかったものであり、また、同時期に美浜町坂尻地区で実施された調査では、イベント堆積物は見つかっていない。

※2: 日本海地震・津波調査プロジェクト平成25年度及び平成26年度成果報告書(平成26年5月、平成27年10月)
 ※3: ト部厚志・山本博文・佐々木直広・高清水康博・片岡香子(2014): 若狭湾沿いの海岸平野における津波堆積物調査, 日本第四紀学会講演要旨集44, 日本第四紀学会
 ※4: 山本・本多翔・佐々木直広・ト部厚志(2016): 若狭湾沿岸で見出された津波堆積物, 日本地質学会第123年学術大会講演要旨集, 日本地質学会

日本海・地震津波調査プロジェクトについて まとめ

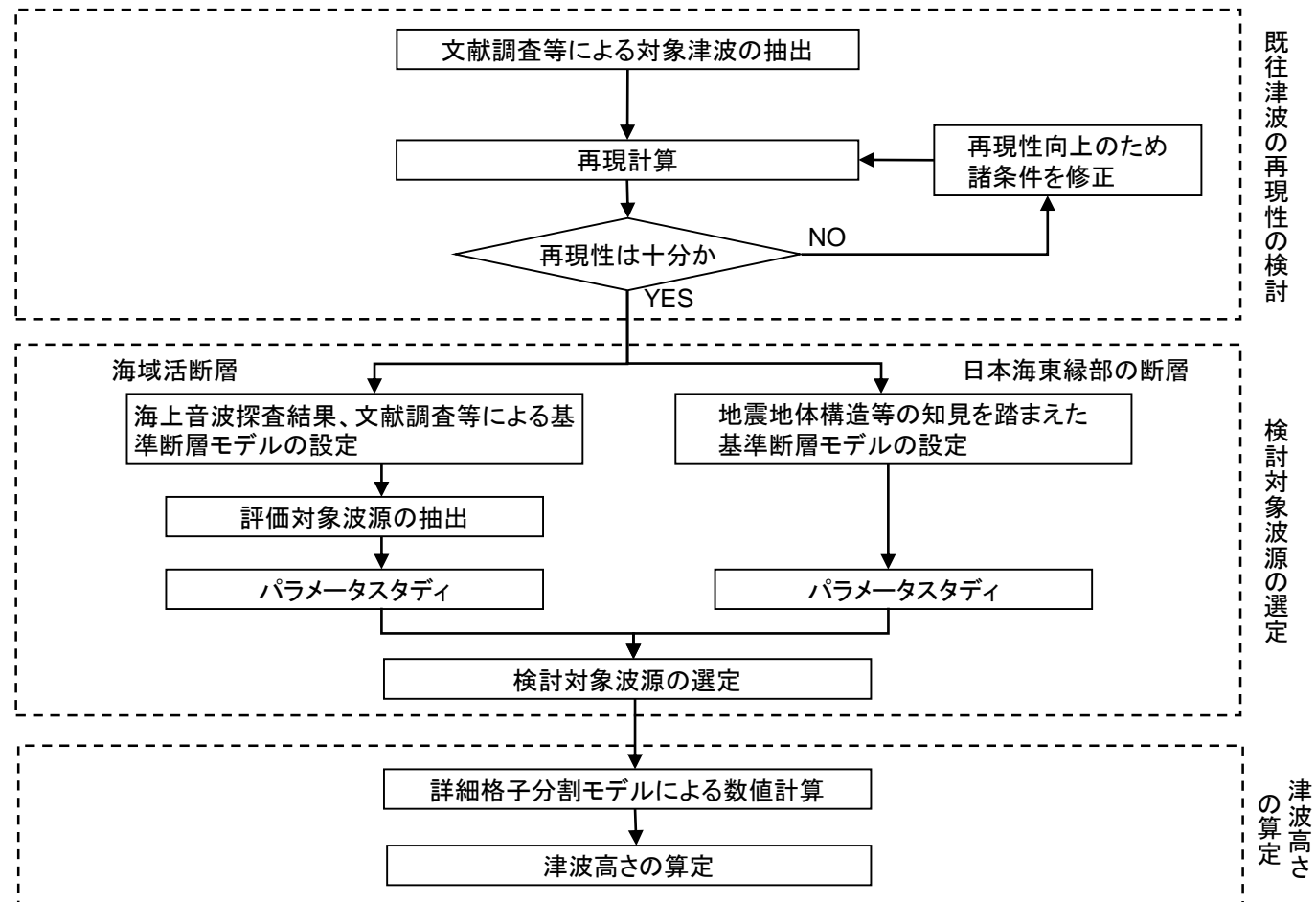
- 事業者による津波堆積物調査結果(平成24年12月18日報告済)では、三方五湖周辺及び久々子湖東方陸域においては、発電所の安全性に影響を与えるような津波の痕跡は認められていないとしている。
- 一方、ト部他(2014)によると、「若狭湾沿岸の海岸平野では、現在の浜堤地形の背後の低湿地の堆積環境において、複数層準のイベント堆積物が認定でき、このうちのいくつかは津波起源である可能性が非常に高い。しかし、津波と考えられる堆積物の分布状況等から復元すると、これらの堆積物を形成した津波は当時の海側に位置した浜堤を大きく乗り越えるような規模ではなく、流出河川等から遡上して内陸側の一部に分布した可能性がある。」とされている。山本他(2016)でも同様の考察がされている。
- また、山本他(2015)によると、高浜町における津波堆積物調査において津波起源の可能性のあるとされるイベント堆積物が報告されているが、複数の調査地点のうち1箇所のみで見つかったものであり、同時期に美浜町坂尻地区で実施された調査では、イベント堆積物は見つかっていない。
- 以上より、仮に本報告のイベント堆積物が津波起源であったとしても、発電所に影響を与えるような規模のものではなかったと考えている。
- なお、当社が三方五湖周辺及び久々子湖東方陸域で実施した津波堆積物調査や若狭湾沿岸部の神社への聞き取り調査結果(平成24年12月18日報告済)においても、発電所の安全性に影響を与えるような津波の痕跡は認められておらず、高浜町内に古くからある青海神社への津波来襲の事実も確認されていない。
- 当社としては、引き続き本調査、検討結果を注視し、必要に応じて津波評価に反映していく所存である。

2. 地震に起因する津波

2-1. 地震に起因する津波影響評価検討フロー

○土木学会津波評価技術(2016)に示される検討手順を参考に、以下の通り津波高さを算定。

- ①文献調査及び数値シミュレーションによる既往津波による影響検討
- ②日本海東縁部の断層及び海域活断層に想定される地震の設定と数値シミュレーションによる検討



2-2. 既往津波の再現性の検討

2-2. 既往津波の再現性の検討

既往津波の数値シミュレーションの対象波源の抽出

○文献調査によれば、若狭湾周辺に大きな被害をもたらした津波はなく、高浜発電所付近に比較的大きな水位変動を与えたと考えられる津波には、1983年日本海中部地震津波及び1993年北海道南西沖地震津波がある。

○これらは高浜発電所で津波高さが観測されており、1983年日本海中部地震津波では0.85mの振幅を、1993年北海道南西沖地震津波ではT.P. -0.02~+0.67m (T.P.は東京湾平均海面)の水位変動を記録している。

○以上より、既往津波の数値シミュレーションの対象津波として、以下の波源を抽出。

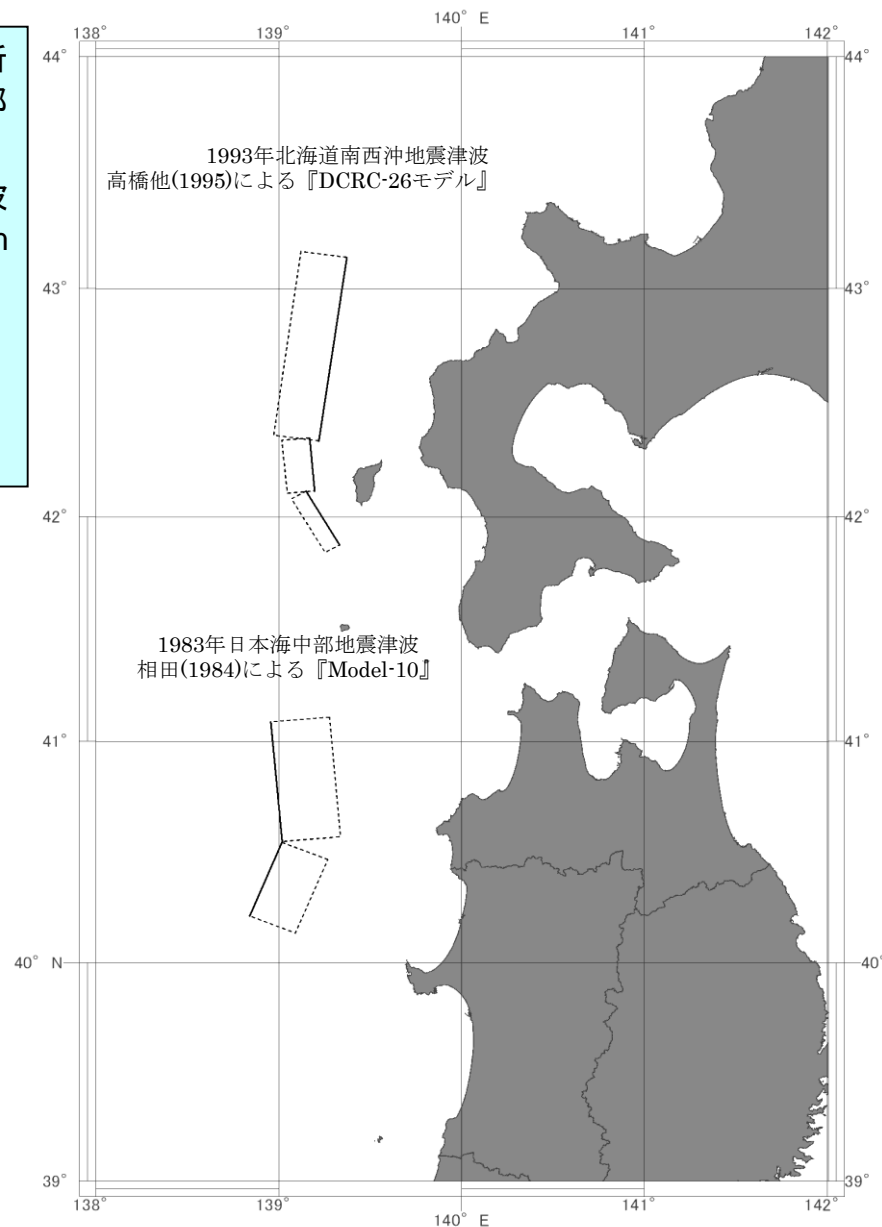
- ・1983年日本海中部地震津波
- ・1993年北海道南西沖地震津波

○選定した既往津波について数値シミュレーションによる痕跡高の再現性検討を行い、解析モデル及び計算手法の妥当性を確認する。

○既往津波の検討に用いた断層モデルは、1983年日本海中部地震津波では相田(1984)の「Model-10」を、1993年北海道南西沖地震津波では高橋他(1995)の「DCRC-26モデル」を基本とし、数値シミュレーションを実施した。

【既往津波の断層モデル】

対象津波	モデル	面積 (km ²)	長さ L (km)	幅 W (km)	すべり量 D (km)	上縁深さ d (km)	走向 θ (°)	傾斜角 δ (°)	すべり角 λ (°)	備考
1983年 日本海中部	7.74	1200	40.0	30	7.60	2	22	40	90	相田の Model-10
		1800	60.0	30	3.05	3	355	25	80	
1993年 北海道南西沖	7.84	2250	90.0	25	5.71	10	188	35	80	高橋他の DCRC-26 モデル
		650	26.0	25	4.00	5	175	60	105	
		458	30.5	15	12.00	5	150	60	105	

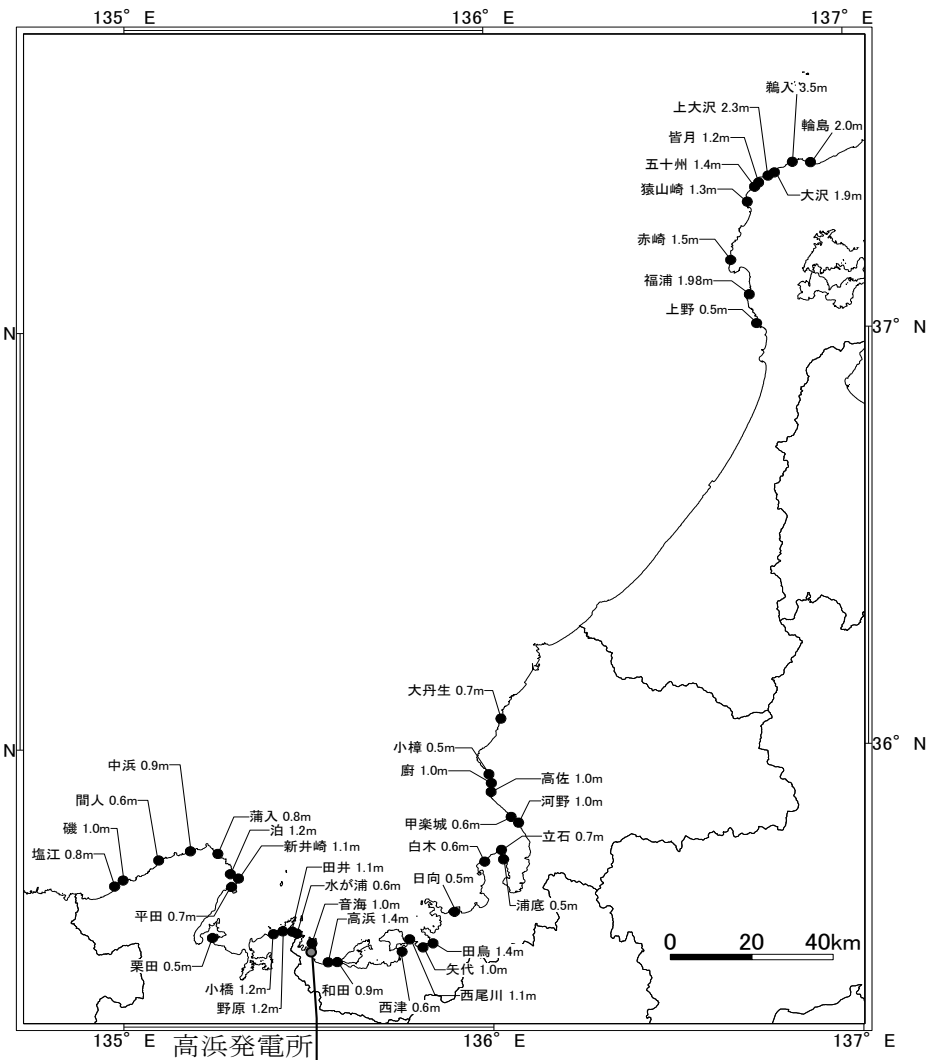
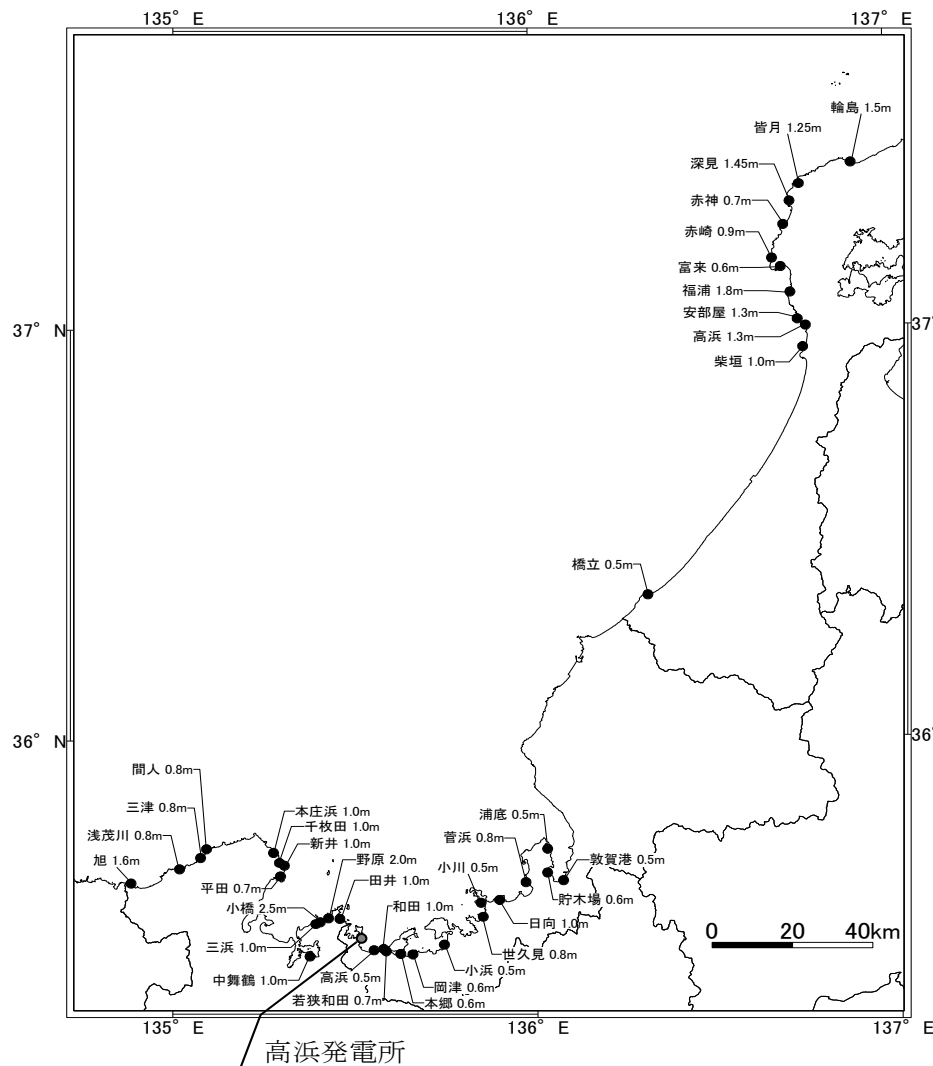


2-2. 既往津波の再現性の検討

既往津波による発電所周辺の痕跡高

【1983年日本海中部地震津波】
(発電所周辺の痕跡高)

【1993年北海道南西沖地震津波】
(発電所周辺の痕跡高)



※: 痕跡高は東北大学工学部津波防災実験所(1984)による

※: 痕跡高は後藤他(1994), 東北大学工学部災害制御研究センター(1994), 首藤他(1997), 阿部他(1994)による

2-2. 既往津波の再現性の検討

既往津波の再現性の検討(計算結果と痕跡値の比較)

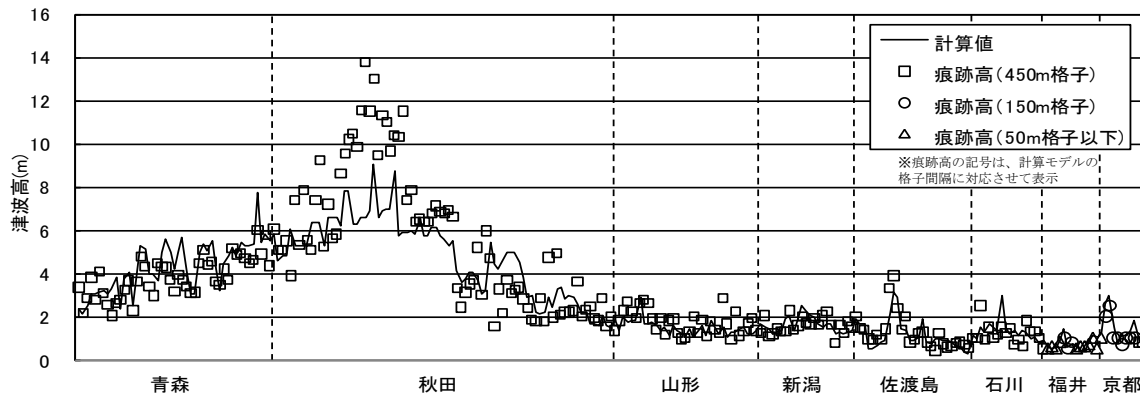
対象津波	地点数 n	幾何平均 K	幾何標準偏差 κ
1983年日本海中部地震津波	259	1.01	1.37
1993年北海道南西沖地震津波	153	1.01	1.37

【幾何平均 K 及び幾何標準偏差 κ の再現性の目安】

$$0.95 < K < 1.05$$

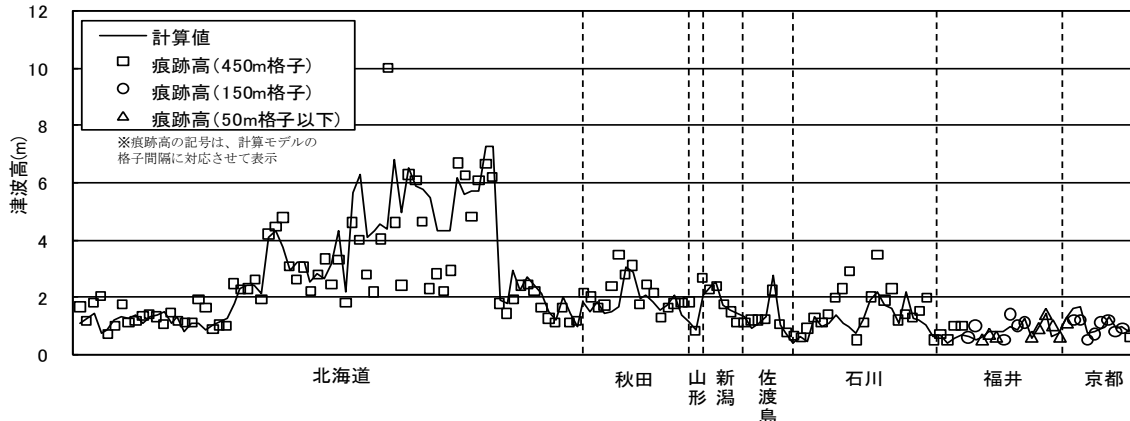
$$\kappa < 1.45$$

【1983年日本海中部地震津波】



※ 痕跡高は東北大学工学部津波防災実験所(1984)による

【1993年北海道南西沖地震津波】



※: 痕跡高は後藤他(1994)(9), 東北大学工学部災害制御研究センター(1994), 首藤他(1997), 阿部他(1994)による

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

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

$$K_i = \frac{R_i}{H_i}$$

ここで R_i は i 番目の地点の観測値(痕跡高), H_i は i 番目の地点の計算値

既往津波に対する当社の数値シミュレーション結果の再現性は、 K , κ とも目安値の範囲内に収まっていることから良好であり、解析モデル及び計算手法の妥当性が確認された。

2-3. 津波伝播計算手法及び計算条件

2-3-1. 概略計算手法及び計算条件

概略計算条件

設定項目		設定値	
津波計算	基礎方程式	非線形長波理論式及び連続式(後藤他(1982) ^{※1})	
	変数配置および差分スキーム	Staggered Leap-frog法	
計算条件等	計算領域	対馬海峡から間宮海峡に至る東西方向約1,500km, 南北方向約2,000km	
	空間格子間隔	1,350m→450m→150m→50m→25m→12.5m	
	時間格子間隔	0.3秒 安定条件(CFL条件)を十分満足するように設定	
	初期条件	断層モデルを用いて、Mansinha他(1971) ^{※2} の方法により計算される海底面の鉛直変位分布を初期条件とする。	
	境界条件	沖側境界	特性曲線法をもとに誘導される自由透過の条件(後藤他(1982) ^{※1})
		陸域境界	完全反射条件
	海底摩擦	マンニングの粗度係数 $n=0.030$ (土木学会(2016) ^{※3})	
	水平渦動粘性係数	$0\text{m}^2/\text{s}$	
計算時間	海域活断層3.0時間、日本海東縁部の断層6.0時間		
計算潮位	T.P.±0.0m		

※1 : 後藤智明・小川由信(1982): Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学土木工学科資料.

※2 : Mansinha, L. and D.E. Smylie(1971): The displacement field of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.

※3 : 土木学会(2016): 原子力発電所の津波評価技術2016.

津波伝播計算領域及び空間格子間隔

海上保安庁等による最新の地形図及び海上音波探査の結果ならびに取水口付近の深浅測量の結果を用いて地形データを作成。

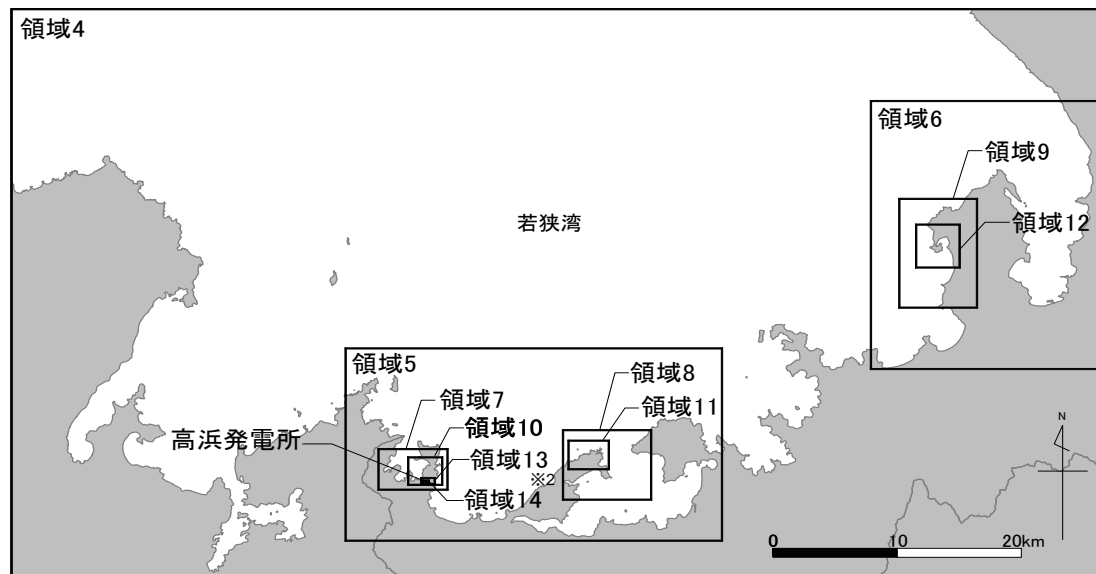


領域番号	空間格子間隔 $\Delta x(m)$	最大水深 $h_{max}(m)$	CFL条件を満たす $\Delta t(sec) \times 1$
1	1350	3800	4.95
2,3	450	3700	1.67
4	150	240	2.19
5,6	50	90	1.19
7,8,9	25	80	0.63
10,11,12	12.5	60	0.36

※1

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh_{max}}}$$

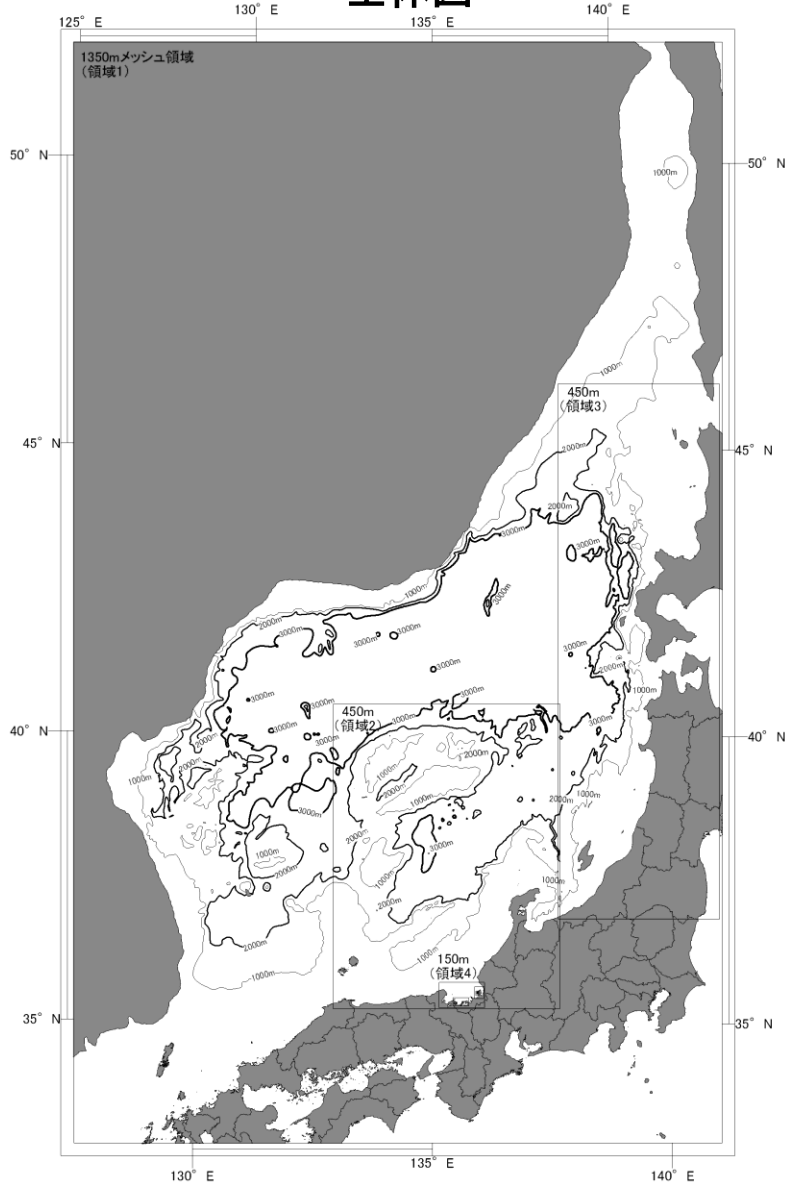
ここに、
 Δx : 空間格子間隔
 Δt : 時間格子間隔
 h_{max} : 最大水深
 g : 重力加速度



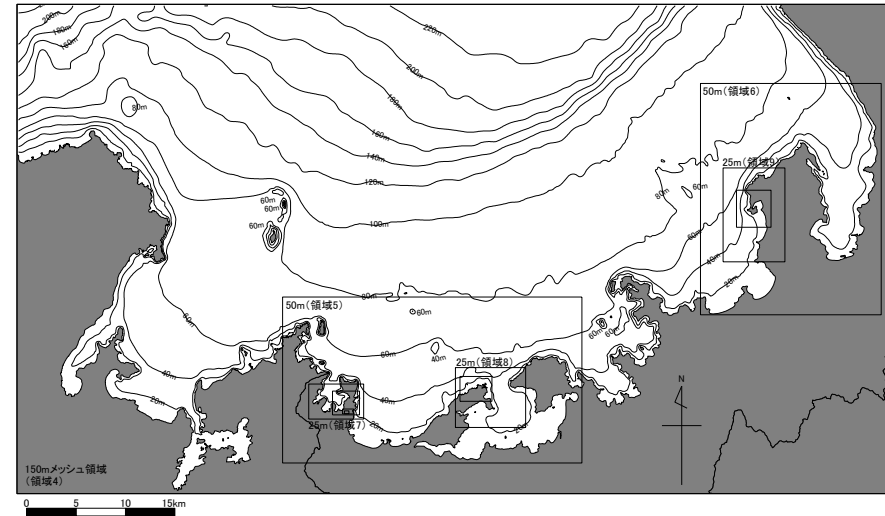
※2 領域13, 14は使用しない。

水深分布図※

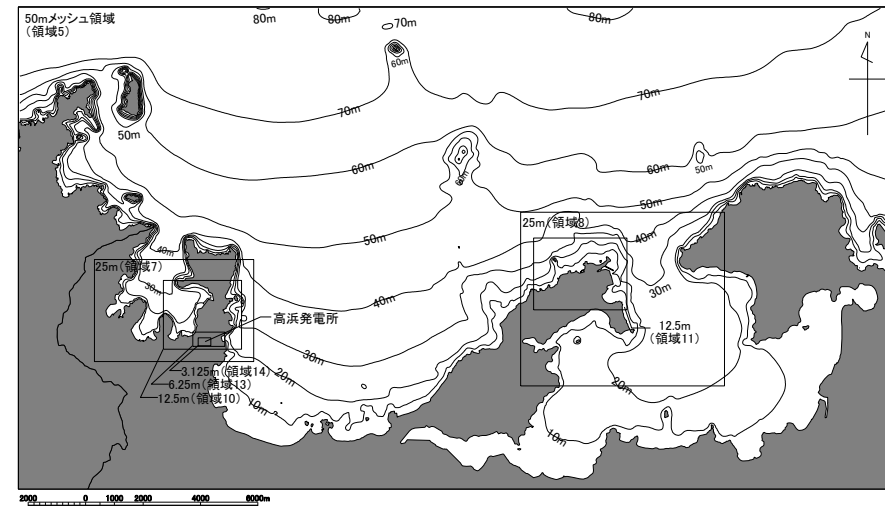
全体図



150m格子以下の領域



50m格子以下の領域



※: 詳細計算手法においても同じ水深分布図を用いる。

2-3-2. 詳細計算手法及び計算条件

詳細計算条件

設定項目		設定値	
津波計算	基礎方程式	非線形長波理論式及び連続式(後藤他(1982) ^{※1})	
	変数配置および差分スキーム	Staggered Leap-frog法	
計算条件等	計算領域	対馬海峡から間宮海峡に至る東西方向約1,500km, 南北方向約2,000km	
	空間格子間隔	1,350m→450m→150m→50m→25m→12.5m→6.25m→3.125m	
	時間格子間隔	0.05秒(取水路防潮ゲート開時は0.025秒) ※安定条件(CFL条件)を満足するように設定	
	初期条件	断層モデルを用いて、Mansinha他(1971) ^{※2} の方法により計算される海底面の鉛直変位分布を初期条件とする。	
	境界条件	沖側境界	特性曲線法をもとに誘導される自由透過の条件(後藤他(1982) ^{※1})
		陸域境界	完全反射条件(発電所敷地については遡上境界とする)
	海底摩擦	マンニングの粗度係数 $n=0.030$ (土木学会(2016) ^{※3})	
	水平渦動粘性係数	$0\text{m}^2/\text{s}$	
	計算時間	海域活断層3.0時間、日本海東縁部の断層6.0時間	
	計算潮位	水位上昇側T.P.+0.49m、水位下降側T.P.0.00m	
	評価潮位	水位上昇側T.P.+0.49m、水位下降側T.P.-0.01m ※国土交通省・舞鶴検潮所のデータによる(2007年1月～2011年12月の5箇年)	
津波防護対策	取水路防潮ゲート、放水口側防潮堤を考慮		
津波水位評価	cmを切り上げ、10cm単位で評価する。		

※1 : 後藤智明・小川由信(1982): Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学土木工学科資料, 1982

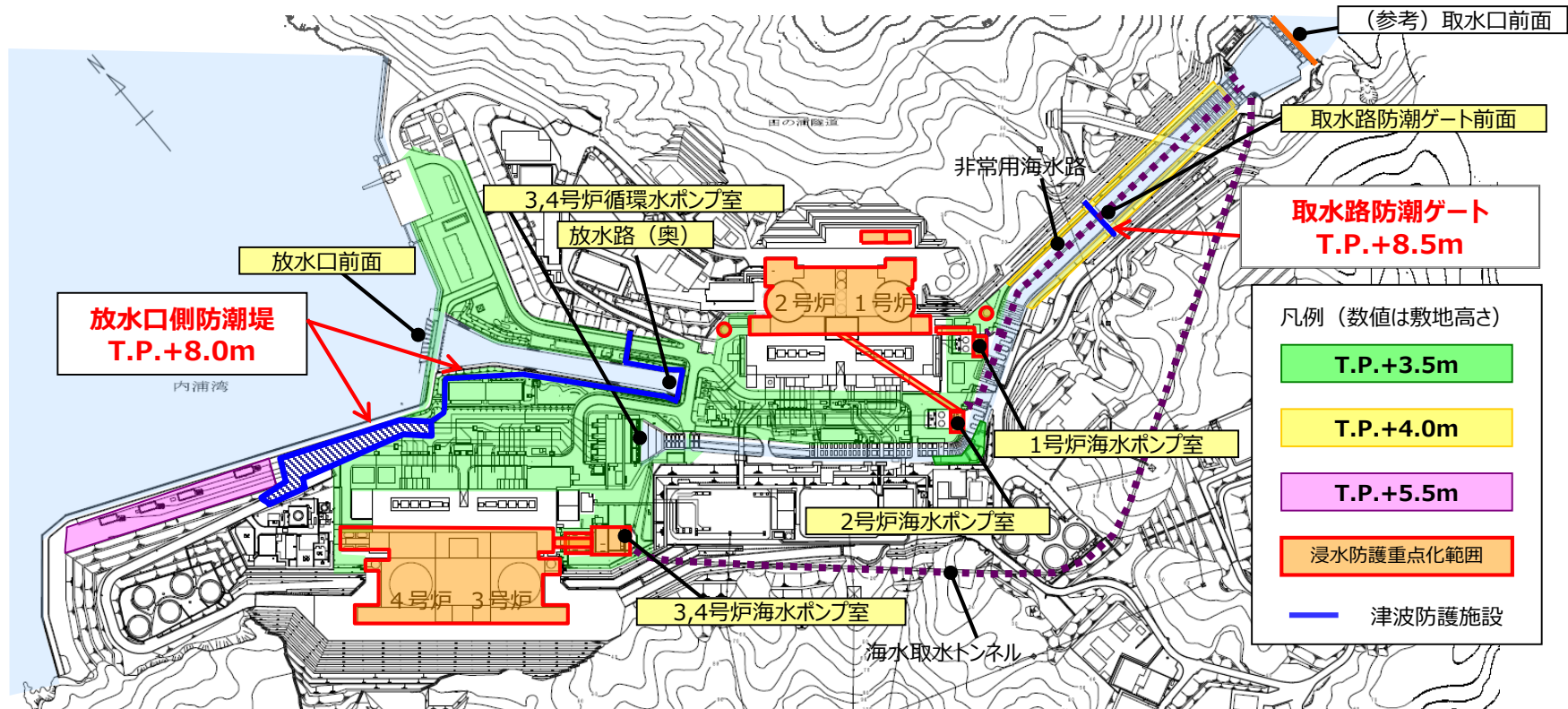
※2 : Mansinha, L. and D.E. Smylie(1971): The displacement field of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.

※3 : 土木学会(2016): 原子力発電所の津波評価技術2016.

2-3-2. 詳細計算手法及び計算条件

津波防護施設の概要

- 水位上昇側の津波水位評価点については、津波防護対象への津波の影響を確認するため、取水路防潮ゲート前面、海水ポンプ室(1号炉、2号炉及び3,4号炉)、3,4号炉循環水ポンプ室、放水口前面及び放水路(奥)を選定する。
- 水位下降側の津波水位評価点については、引き津波に対する海水ポンプの取水性を確認するため、海水ポンプ室(1号炉、2号炉及び3,4号炉)を選定する。

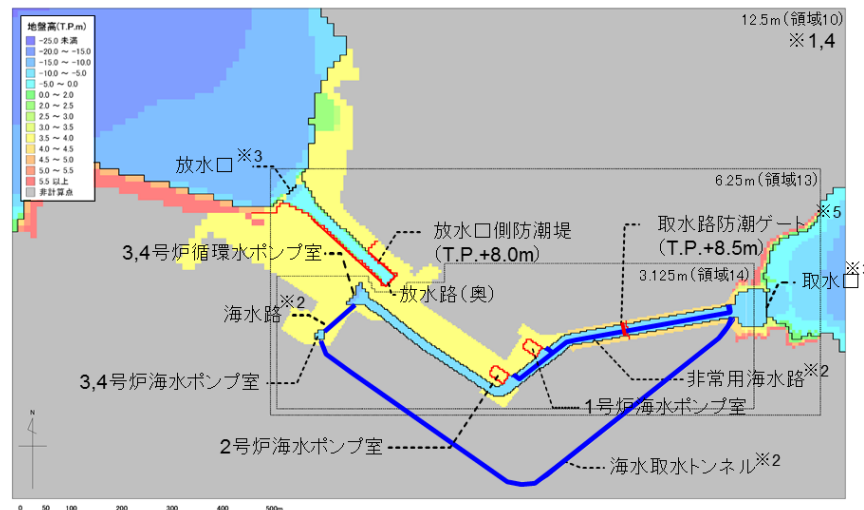


津波防護対象

- 重要な安全機能を有する設備(浸水防護重点化範囲): 原子炉格納施設、原子補助建屋、制御建屋、中間建屋、燃料油貯油そう、海水ポンプ室、復水タンク
- 重大事故等対処施設: 緊急時対策所、空冷式非常用発電装置 他

取水路防潮ゲート開閉による各評価点(取水路側)の位置づけ

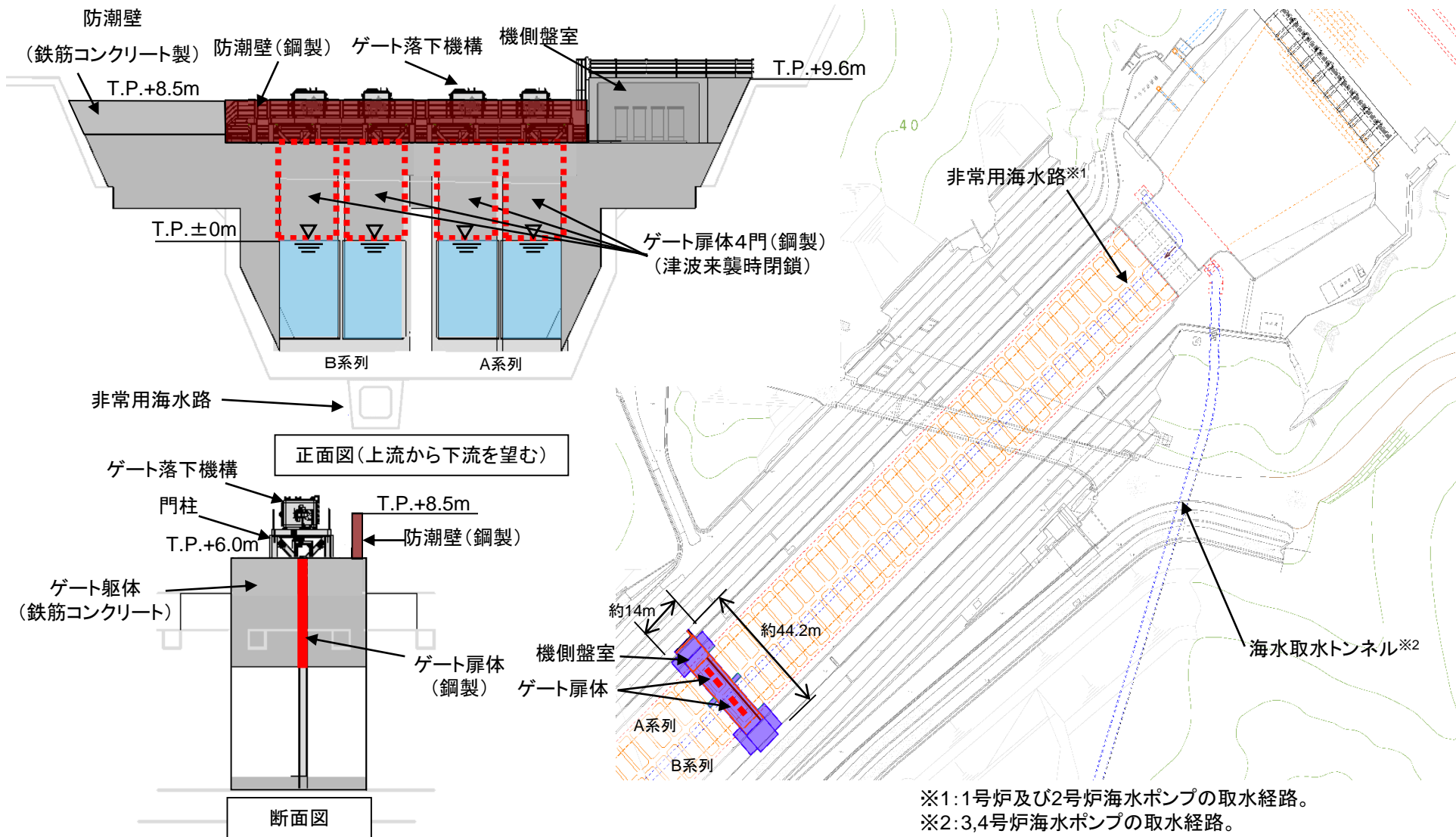
- 取水路側の各評価点(取水路防潮ゲート、各ポンプ室)については、いずれも評価点として必要であるが、安全機能を持つ施設への影響(敷地への遡上、海水取水ポンプの取水性)の観点では、防潮ゲートの開閉によって評価点として重視すべき度合いが異なる。
- 防潮ゲート閉(close)の場合は、防潮ゲート前については越流による津波浸入有無の観点から評価点として重視が必要だが、各ポンプ室については取水路からの津波浸入がなく水位変動が小さいので評価点として重視する必要はない。
- 防潮ゲート開(open)の場合は、防潮ゲート前については水位によらず津波が浸入するので評価点として重視する必要はないが、各ポンプ室については取水路からの津波浸入によって水位変動が大きくなるので評価点として重視が必要である。



評価点 (取水路側)	評価点として重視の要否 (安全機能を持つ施設への影響の観点)	
	取水路防潮ゲート 閉(close)	取水路防潮ゲート 開(open)
取水路防潮ゲート前面	<p>重視要</p> <p>ゲート閉止によって内側への津波の浸入を防止していることから、ゲート前水位がゲート高さを超えないことを確認するために、評価点として重視が必要。</p>	<p>重視不要</p> <p>ゲート開状態では津波水位に関わらず内側に津波が浸入するため、評価点として重視する必要はない。</p>
各ポンプ室 ・3,4号炉循環水ポンプ室 ・1号炉海水ポンプ室 ・2号炉海水ポンプ室 ・3,4号炉海水ポンプ室	<p>重視不要</p> <p>ゲート閉状態では非常用海水路、海水取水トンネル、海水路を通じて各ポンプ室に津波が浸入するため、津波水位が敷地高さを超えないこと及び海水ポンプの取水可能水位を下回らないことの確認が必要。 ただし、ゲート閉止によって取水路を通じた津波浸入が防止されることから、津波による水位変動は小さくなるため、評価点として重視する必要はない。</p>	<p>重視要</p> <p>ゲート開状態では取水路、非常用海水路、海水取水トンネル、海水路を通じて各ポンプ室に津波が浸入するため、津波水位が敷地高さを超えないこと及び海水ポンプの取水可能水位を下回らないことの確認が必要。 ただし、ゲート開状態では取水路を通じて津波が浸入することから、津波による水位変動は大きくなるため、評価点として重視が必要。</p>

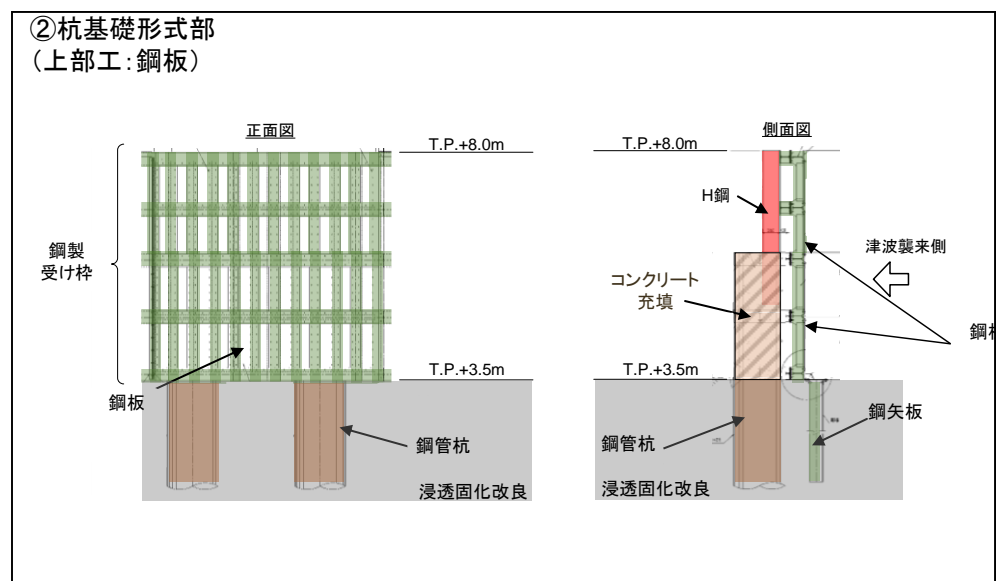
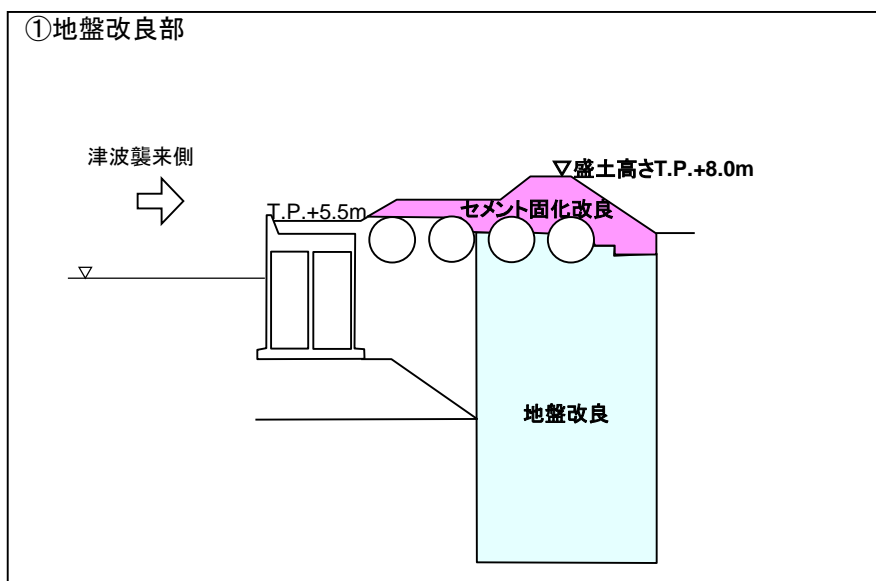
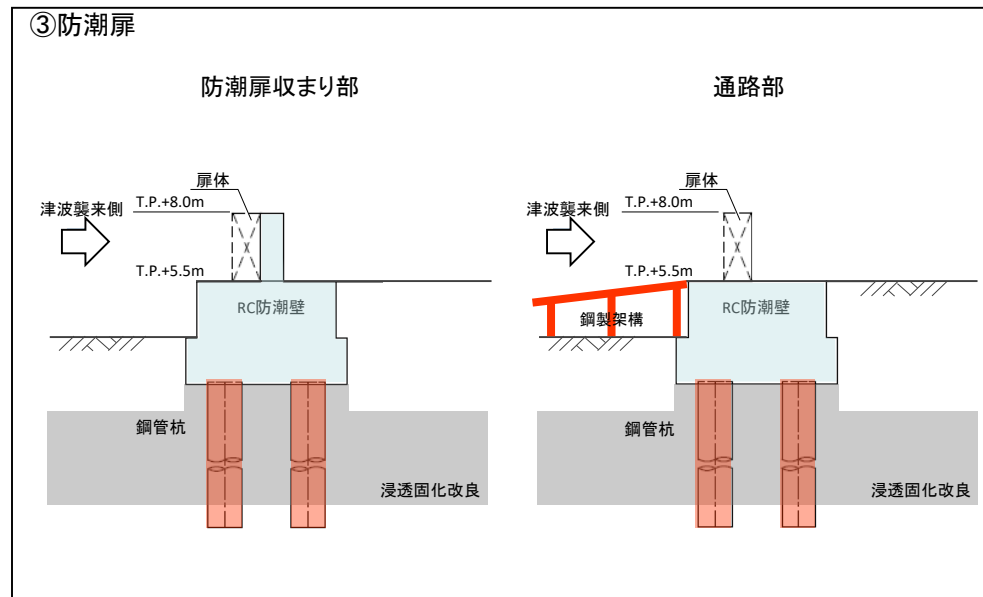
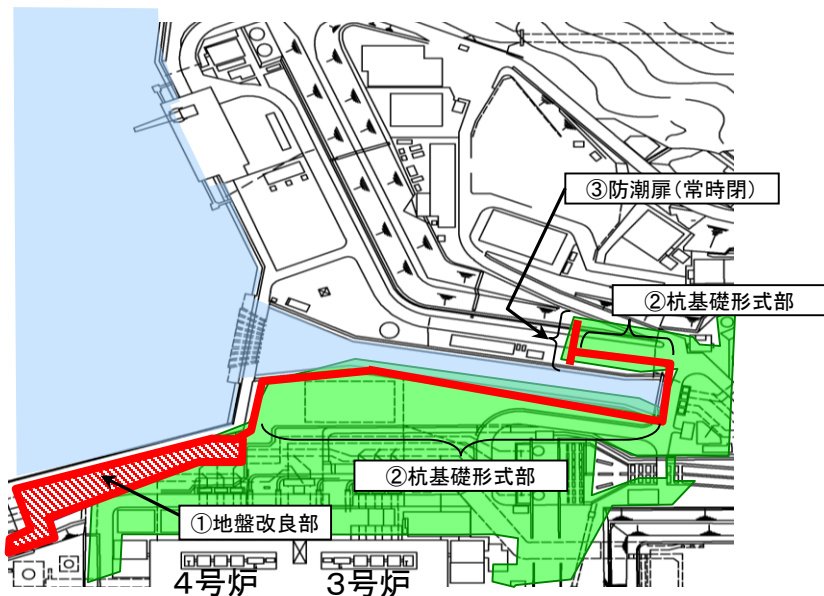
取水路防潮ゲートについて

取水路防潮ゲートのうちゲート扉体は、大津波警報が発表された場合に、中央制御室からの遠隔操作により、地震・津波発生後13分で全門を確実に閉止することとする。



2-3-2. 詳細計算手法及び計算条件

放水口側防潮堤及び防潮扉について



2-3-2. 詳細計算手法及び計算条件

津波伝播計算領域及び空間格子間隔

敷地に比較的近い波源の検討にあたり、計算安定性確保の観点から敷地近辺の空間格子配置パターンを使い分けるものとする。



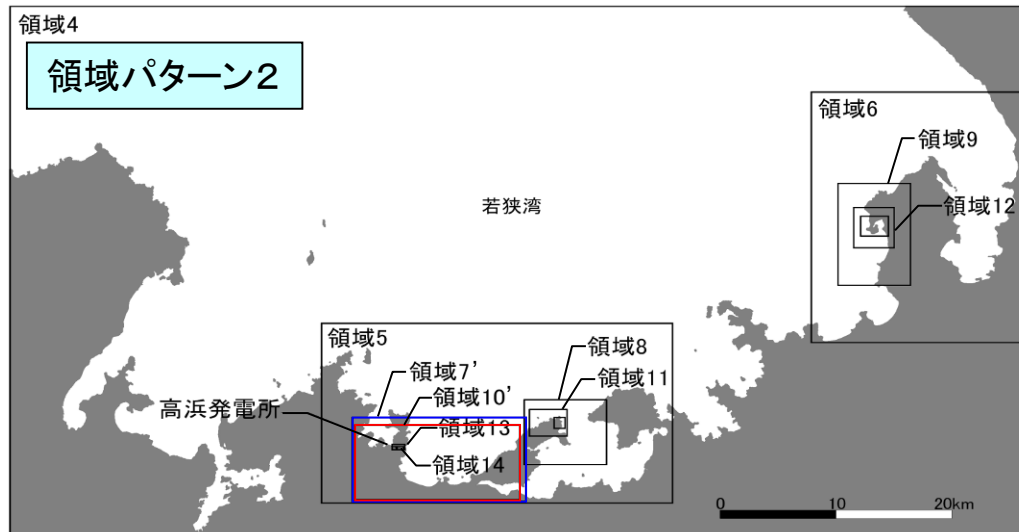
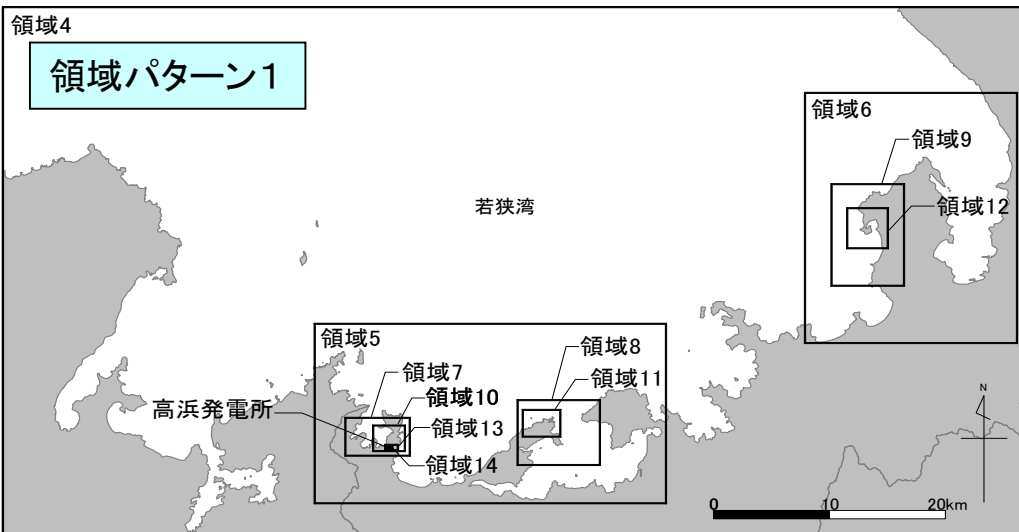
領域番号	空間格子間隔 Δx (m)	最大水深 h_{max} (m)	CFL条件を満たす Δt (sec) ※1
1	1350	3800	4.95
2,3	450	3700	1.67
4	150	240	2.19
5,6	50	90	1.19
7,7'※2,8,9	25	80	0.63
10,10'※2,11,12	12.5	60	0.36
13	6.25	10	0.44
14	3.125	10	0.22

※1

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh_{max}}}$$

ここに、
 Δx : 空間格子間隔
 Δt : 時間格子間隔
 h_{max} : 最大水深
 g : 重力加速度

※2: FO-A~FO-B断層~熊川断層、陸上地すべりの計算時には7'及び10'(領域パターン2)を用いている。

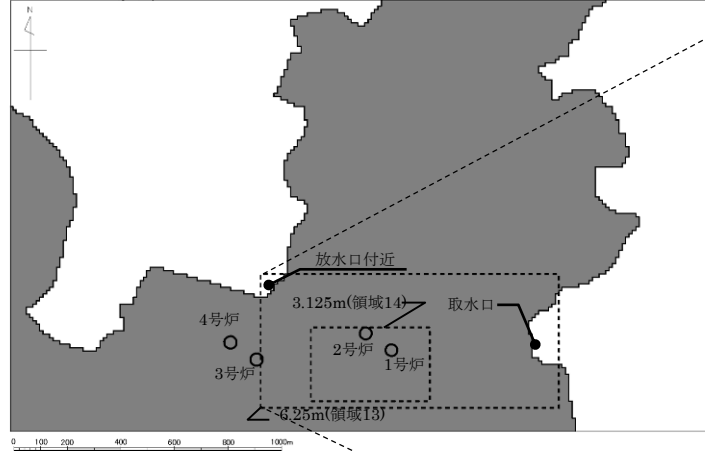


詳細計算モデル

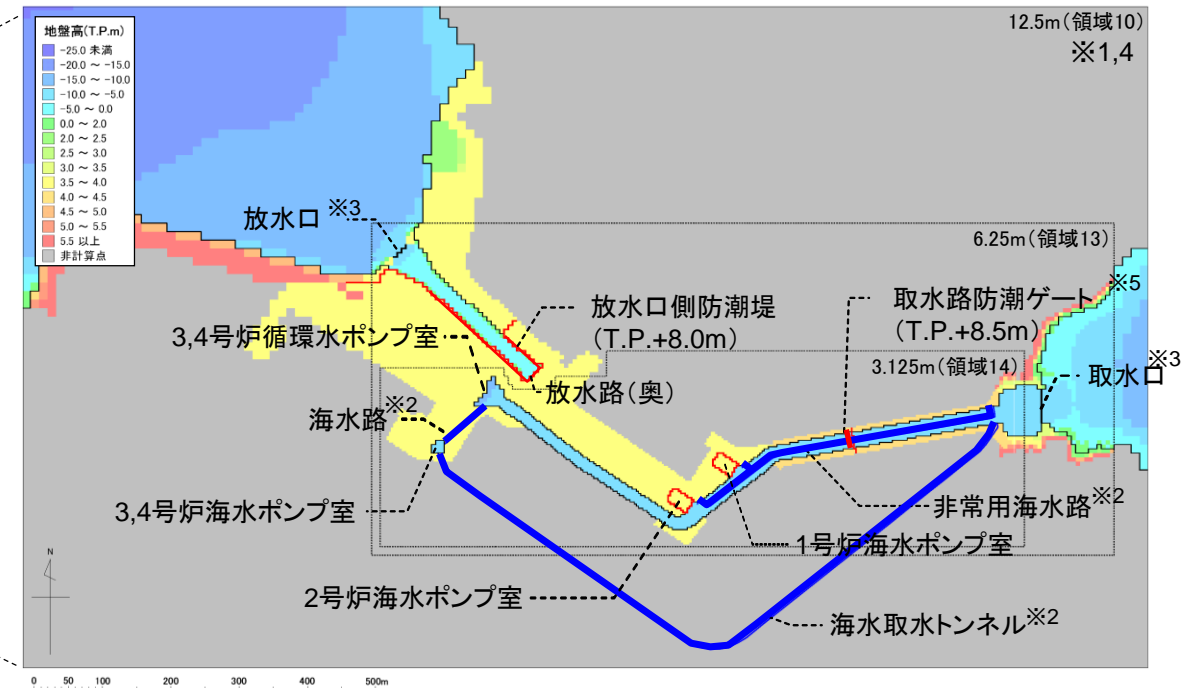
- 基準津波の対象となる波源に対して、3,4号炉海水ポンプ室までの水理特性を考慮した詳細格子分割の数値計算モデルによる数値シミュレーションを実施し、津波水位を算出した。
- 水位評価にあたっては、潮位条件(朔望平均満潮位T.P.+0.49m、朔望平均干潮位T.P. - 0.01m)※を考慮した。
- 警報が発表されない場合については、取水路防潮ゲート「開」、循環水ポンプ「取水あり(水位下降側のみ)」とする。

※気象庁・舞鶴検潮所のデータによる
(2007年1月～2011年12月の5箇年)

12.5m(領域10)



〔取水路等の水理特性を考慮した数値計算モデル〕

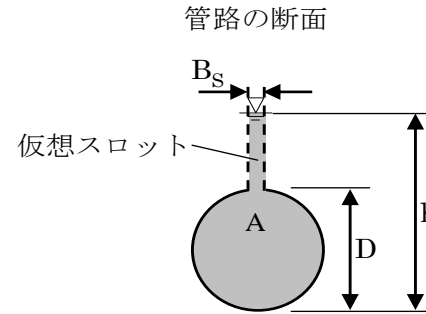
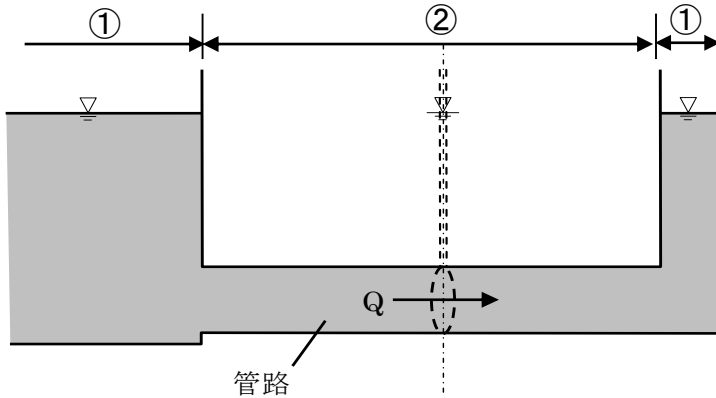


- ※1 本計算範囲は12.5m、6.25m及び3.125m格子であり、非線形長波理論式及び連続式で計算。
- ※2 海水路、海水取水トンネル(管路)、非常用海水路は、仮想スロットモデルにより一次元不定流の連続式及び運動方程式で計算。
- ※3 取放水口のカーテンウォール及び取水路防潮ゲートは、本間公式および土木研究所(1996)による計算式から、越流量および開口部通過流量を計算。
- ※4 灰色の着色部を除くメッシュで遡上計算が可能。
- ※5 取水路防潮ゲートは津波到達時間により「開」「閉」の条件を設定。警報が発表されない場合については、取水路防潮ゲートは「開」の条件を設定。
- ※6 警報が発表されない場合については、循環水ポンプによる取水を考慮する。ただし、循環水ポンプは、運用上の設定水位(T.P.-2.50m)に達した場合には取水を停止する。

2-3-2. 詳細計算手法及び計算条件

海水ポンプ室の水位評価における計算条件および管路部の計算手法

海水路、海水取水トンネル(管路)及び非常用海水路は、仮想スロットモデルによる一次元不定流の連続式及び運動方程式により計算した。



計算条件	条件設定
スクリーン損失	・海水ポンプ室内のスクリーン損失については考慮しない
貝付着	・貝の付着を考慮した粗度係数を採用 (粗度係数:n=0.02)
海水ポンプの 運転条件	・水位上昇側: 海水ポンプの取水なし ・水位下降側: 海水ポンプの取水あり

①開水路の連続式及び運動方程式

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

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

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

ここに、 η : 水面の鉛直変位量,
 $D = \eta + h$, h : 静水深,
 $M = uD$, $N = vD$, (u, v) : (x, y) 方向の流速,
 $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$, g : 重力加速度,
 $f_c = gn^2 D^{-1/3}$, n : マニングの粗度係数

②管路の連続式及び運動方程式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial M}{\partial x} = gA(s_0 - s_f)$$

ここに、 $A = A_0 + B_s(h - D)$, $B_s = \frac{gA_0}{a^2}$,

A : 流水断面積,
 Q : 流量,
 D : 管径 (円形の場合),
 B_s : 仮想スロット幅,
 h : 水深 (圧力水頭),
 A_0 : 管断面積 (円形の場合 $\pi D^2 / 4$),
 g : 重力加速度,
 a : 圧力伝播速度,

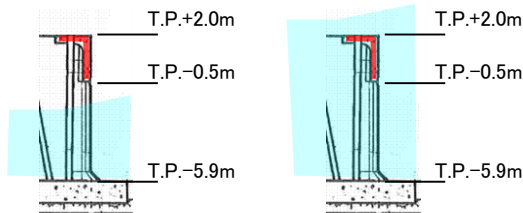
$$M = \frac{Q^2}{gA} + h_G A \cos \theta, \quad S_0 = -\sin \theta = -dz/dx, \quad S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{R^{4/3} A^2},$$

M : 比力,
 S_0 : 水路底勾配,
 S_f : 摩擦勾配,
 n : マニングの粗度係数,
 R : 径深,
 h_G : 水面から図心までの距離

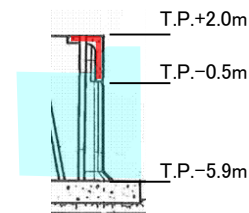
取放水口及び取水路の解析モデル(取放水口のカーテンウォール及び角落し部分の計算方法)

取水口の計算条件

越流量の計算方法
(本間公式)



カーテンウォールの通過流量の計算方法
(土木研究所(1996)の計算式)

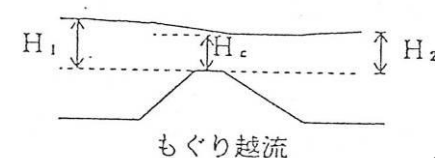
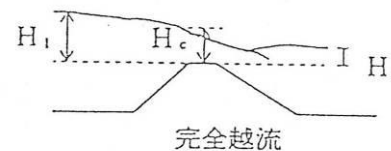


越流量の計算方法(本間公式)

- 高浜発電所の構造物(カーテンウォール、隔壁、角落し)については、水位がその天端を超える場合に本間公式を用いて越流量を計算する。
- 天端高を基準とした防波堤前後の水深を H_1 、 H_2 ($H_1 > H_2$) としたとき、線流量 Q は次式に示すとおりである。

$$Q = 0.35H_1\sqrt{2gH_1} \quad ; \quad H_2 \leq 2H_1/3 \quad (\text{完全越流})$$

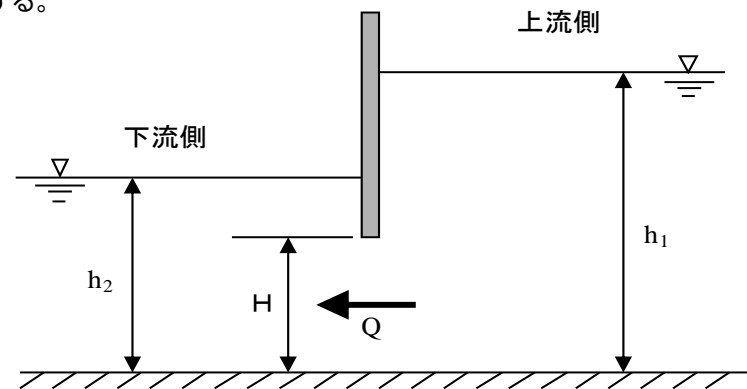
$$Q = 0.91H_1\sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad ; \quad H_2 > 2H_1/3 \quad (\text{もぐり越流})$$



カーテンウォールの通過流量の計算方法(土木研究所(1996)の計算式)

- 高浜発電所のカーテンウォールを通過する流量は、ゲートからの流出量算定式として、一般によく用いられる土木研究所(1996)の計算式により求めるものとする。
- なお、津波がカーテンウォールの天端を超える場合には、本間公式から求まる越流量を加算する。

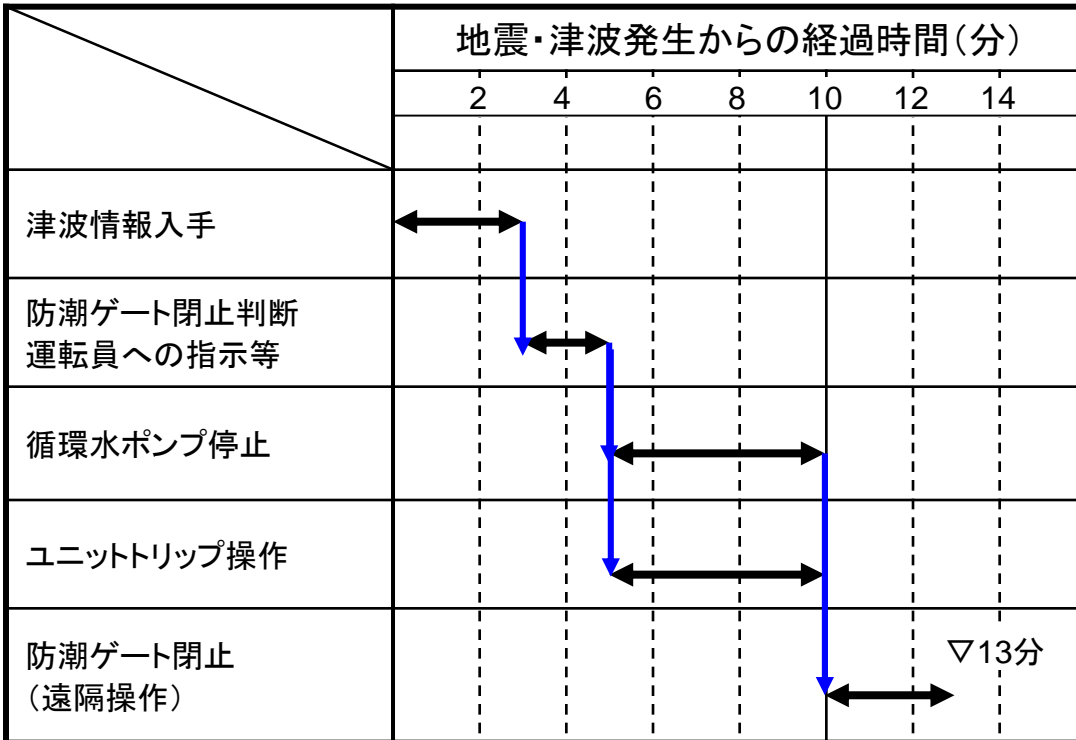
水位の関係		計算式	流量係数 C	
①	$h_2 \geq H$	$h_1 < \frac{3}{2}H$	自由流出: $Q = CBh_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)}$ ただし、 $\frac{h_1}{h_2} \geq \frac{3}{2}$ の場合は $h_2 = \frac{2}{3}h_1$ とする	0.79
		$h_1 \geq \frac{3}{2}H$	中間流出: $Q = CBH\sqrt{2gh_1}$	0.51
③	$h_2 < H$	潜り流出: $Q = CBH\sqrt{2g(h_1 - h_2)}$	0.75	



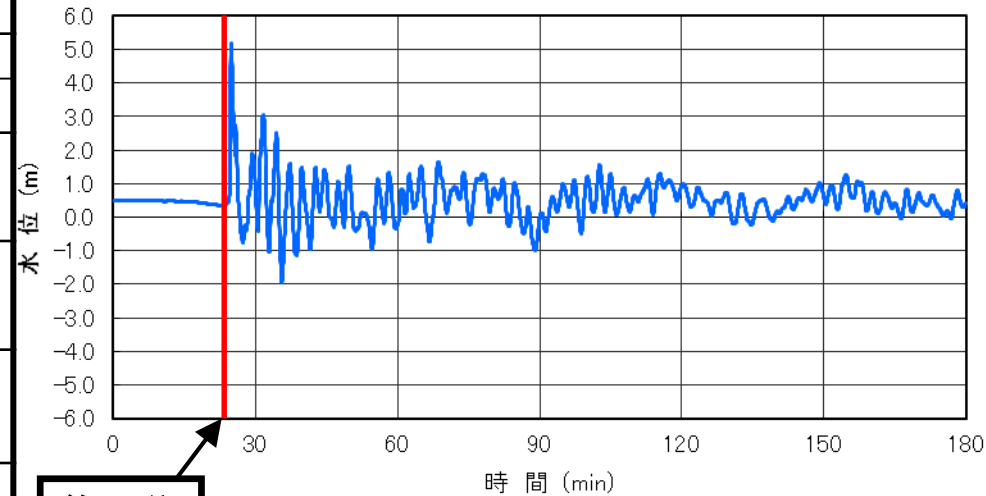
h_1, h_2 : 施設前後の水位(m) H : 開口部高さ(m) Q : 流量(m^3/s)
 B : 開口幅(m) C : 流量係数 g : 重力加速度(m/s^2)

取水路防潮ゲートの開閉状態の考え方(1)

防潮ゲート閉止操作の想定



津波到達時間



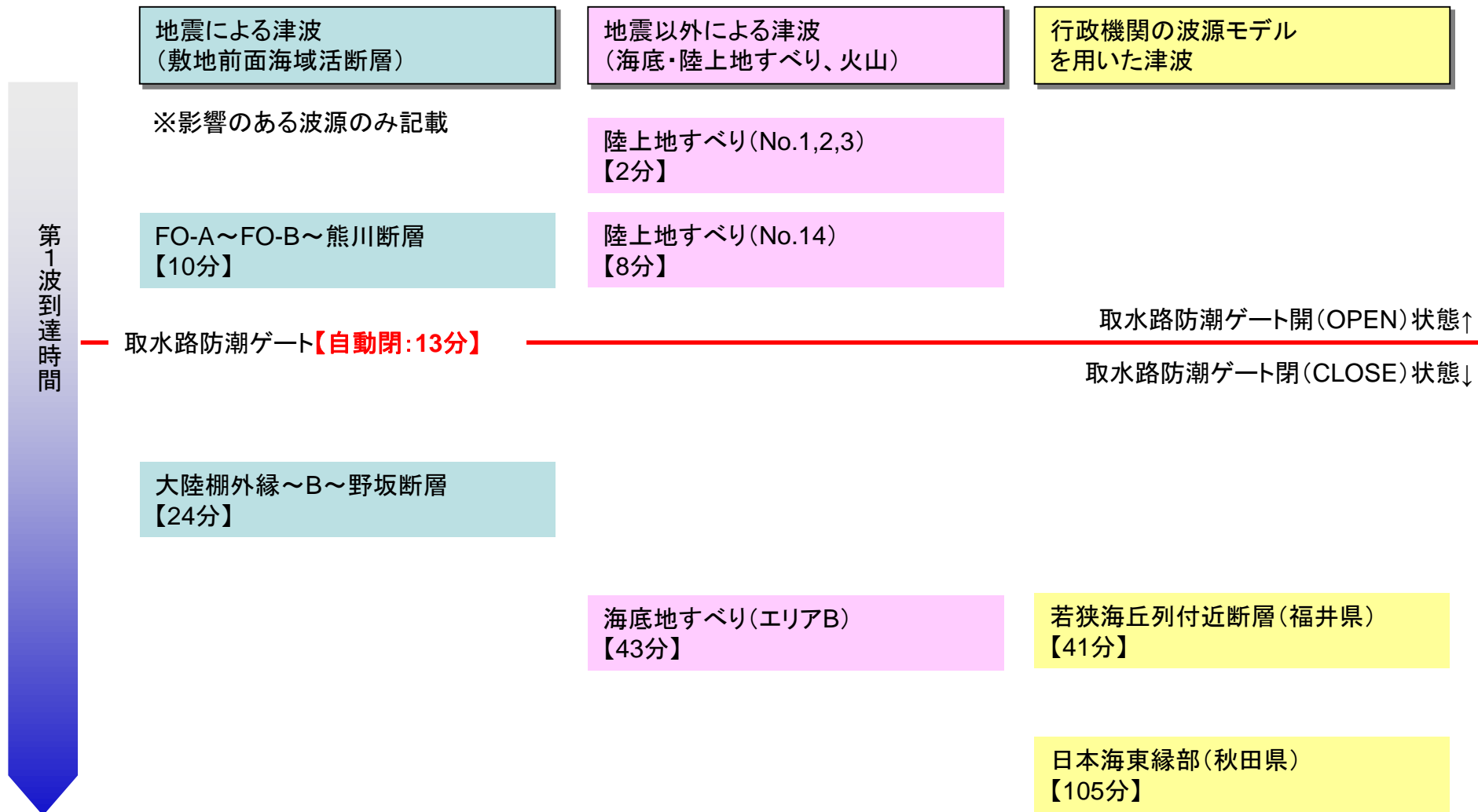
津波時刻歴波形(取水路防潮ゲート前面)

波源:大陸棚外縁~B~野坂断層

津波評価を行うにあたって、防潮ゲートは「閉」状態を基本とするが、津波発生後13分以内に第1波が到達する津波に対しては、ゲート閉止操作が間に合わないものとして、取水路防潮ゲートを「開」とする。

2-3-2. 詳細計算手法及び計算条件

取水路防潮ゲートの開閉状態の考え方(2)



○取水路防潮ゲートの閉鎖に必要な時間は地震発生後13分(遠隔操作)であり、これをゲート開閉条件の基準としている。
○よって、津波到達時間が13分未満の波源については、取水路防潮ゲートを【開】(OPEN)の条件とし、それ以降に到達する波源については【閉】(CLOSE)の条件とする。

警報が発表されない場合の防潮ゲート開閉条件及びポンプ取水条件

- 警報が発表されないケースでは、警報に基づく取水路防潮ゲート閉止ができないことから、基準津波評価における計算条件として取水路防潮ゲートは「開(4門開)」条件とする。
- 警報が発表されない前提に基づき、水位下降側については、循環水ポンプは「取水あり」とする。水位上昇側については、保守的に、循環水ポンプは「取水なし」とする。
- 海水ポンプの稼働状況は津波警報の有無によって変わらないため、海水ポンプの取水条件は既許可時と同様とする。

検討ケース	津波警報	取水路防潮ゲート		循環水ポンプ取水量※1 ※2		海水ポンプ取水量※1	
		第1波到達までの閉止	計算モデルでの開閉条件	水位上昇側	水位下降側	水位上昇側	水位下降側
警報が発表されないケース	なし	不可	開	<u>1~4号停止時</u> 1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	<u>1~4号運転時</u> 1号：91,500m ³ /h×2 2号：91,500m ³ /h×2 3号：116,000m ³ /h×2 4号：116,000m ³ /h×2	<u>1~4号停止時</u> 1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	<u>1~4号運転時</u> 1号：3,200m ³ /h×3 2号：3,200m ³ /h×3 3号：5,100m ³ /h×1 4号：5,100m ³ /h×1
既許可時の検討ケース	あり	可	閉	<u>1~4号停止時</u> 1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	<u>1~4号停止時</u> 1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	<u>1~4号停止時</u> 1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	<u>1~4号運転時</u> 1号：3,200m ³ /h×3 2号：3,200m ³ /h×3 3号：5,100m ³ /h×1 4号：5,100m ³ /h×1
		不可	開	1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	1号：取水なし 2号：取水なし 3号：取水なし 4号：取水なし	1号：3,200m ³ /h×3 2号：3,200m ³ /h×3 3号：5,100m ³ /h×1 4号：5,100m ³ /h×1

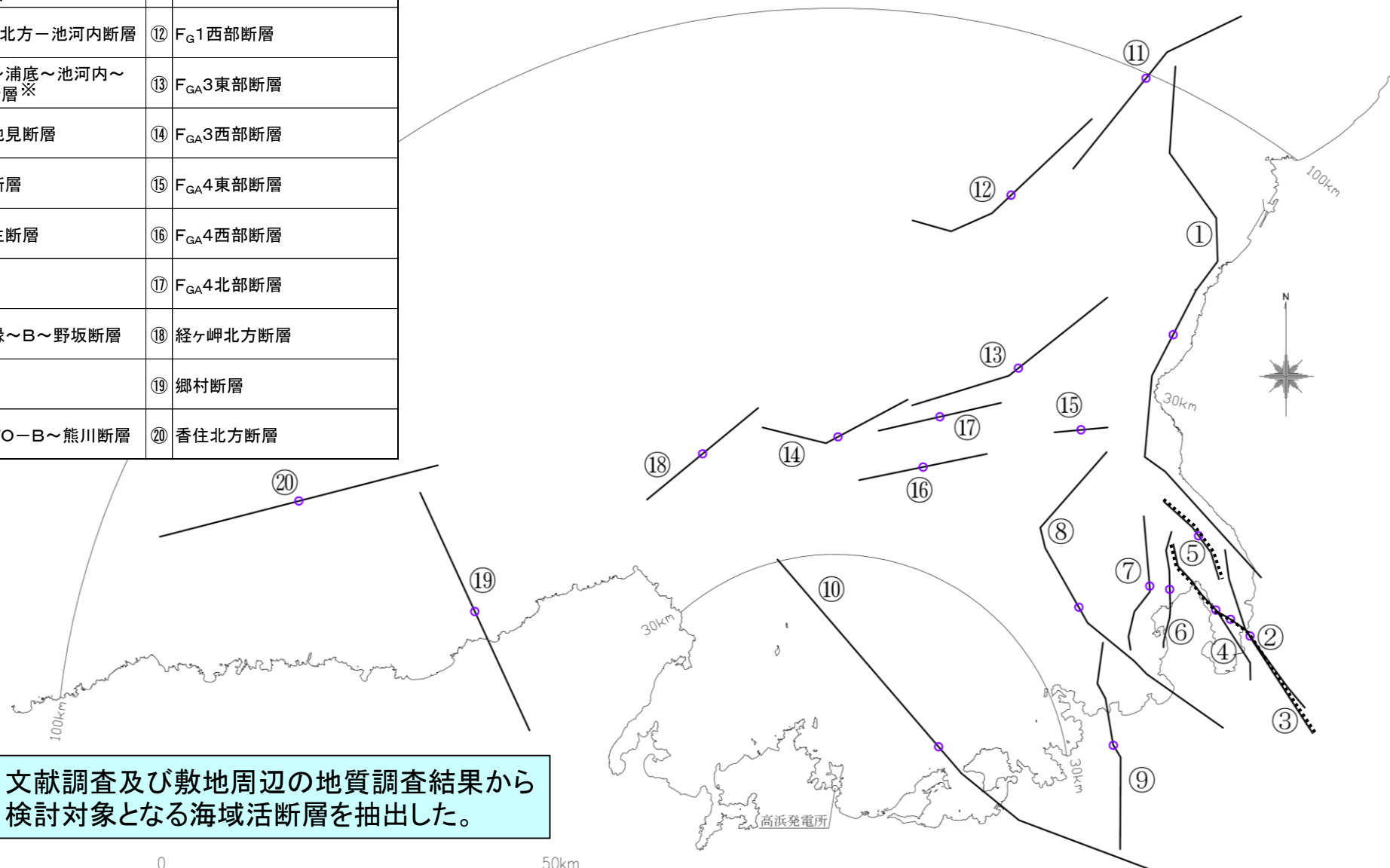
※1:循環水ポンプ・海水ポンプによる取水は水位を低下させるため、水位上昇側の評価では取水量が少ないほうが、水位下降側の評価では取水量が多いほうが、それぞれ保守的な条件設定となる。

※2:循環水ポンプは、水位がT.P.-2.50mまで低下した場合に取水を停止することから、これを計算条件として設定する。なお、水位検知からポンプ取水が完全に停止するまでの時間を考慮し、水位がT.P.-2.50mまで低下してから5分後に取水停止するものとする。

2-4. 検討対象波源の選定及び津波評価

2-4. 検討対象波源の選定及び津波評価

断層名	
① 安島岬沖～和布～干飯崎沖～甲楽城断層	⑪ F _G 1 東部断層
② ウツロギ岬北方～池河内断層	⑫ F _G 1 西部断層
③ 甲楽城沖～浦底～池河内～柳ヶ瀬山断層※	⑬ F _{GA} 3 東部断層
④ 浦底～内池見断層	⑭ F _{GA} 3 西部断層
⑤ 甲楽城沖断層	⑮ F _{GA} 4 東部断層
⑥ 白木～丹生断層	⑯ F _{GA} 4 西部断層
⑦ C断層	⑰ F _{GA} 4 北部断層
⑧ 大陸棚外縁～B～野坂断層	⑱ 経ヶ岬北方断層
⑨ 三方断層	⑲ 郷村断層
⑩ FO-A～FO-B～熊川断層	⑳ 香住北方断層

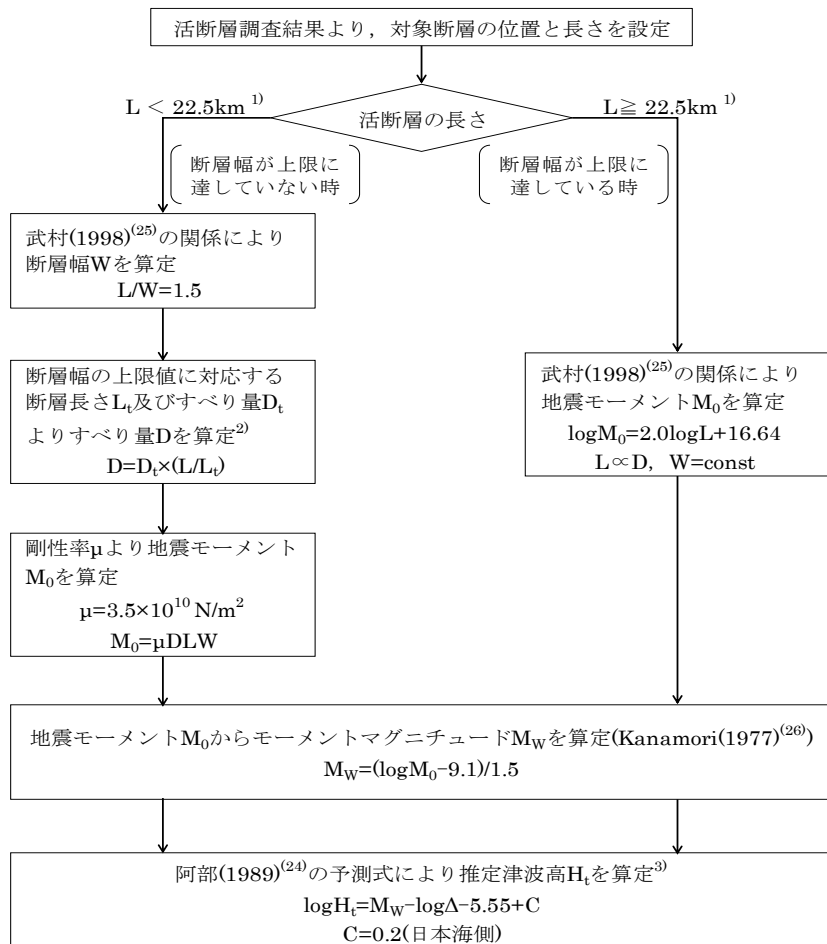


文献調査及び敷地周辺の地質調査結果から検討対象となる海域活断層を抽出した。

※③については、⑤甲楽城沖断層と同時活動するものとして評価する(点線)。

検討対象断層の選定(海域活断層)

【簡易予測式による推定津波高の算定フロー】



1) 断層幅の上限 W_t は、地震発生層の厚さ H_0 を15kmとし、傾斜角 δ を $90^\circ(45^\circ \sim 90^\circ)$ のうち M_w が最大となる値とした際には、 $W_t=H_0/\sin\delta=15\text{km}$ となる。断層幅の上限に対応する断層長さ L_t は、 $L_t=1.5W_t=22.5\text{km}$ となる。

2) 断層幅の上限に対応するすべり量 D_t は、モーメントマグニチュードを $M_{wt}=(\log L_t+3.77)/0.75=6.83$ 、地震モーメントを $M_{0t}=10^{(1.5M_{wt}+9.1)}=2.21 \times 10^{19}\text{Nm}$ 、剛性率を $\mu=3.50 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ とした際には、 $D_t=M_{0t}/(\mu L_t W_t)=1.87\text{m}$ となる。

3) $\log r_0=0.5M_w-2.25$ より求まる r_0 に対して、 $\Delta \leq r_0$ となる場合は $\log H_t=0.5M_w-3.30+C$ 、 $C=0.2$ (日本海側)より求まる H_t を推定津波高とする。

阿部(1989)の簡易予測式により推定津波高さを算定し、パラメータスタディを実施する評価対象波源を抽出した。

【簡易予測式による推定津波高さ】

断層名	断層長さ L (km)	断層幅 W (km)	すべり量 D (m)	地震モーメント M_0 (N·m)	モーメントマグニチュード M_w ^{※1}	敷地から断層までの距離 Δ (km)	推定津波水位 H_t or H_r (m)
1 安島岬沖～和布～干飯崎沖～甲楽城断層	76	15.0	—	2.52E+20	7.54	73.4	2.11
2 ウツロギ峠北方～池河内断層	24	15.0	—	2.51E+19	6.87	57.7	0.57
3 甲楽城沖～浦底～池河内～柳ヶ瀬山断層	36 ^{※2}	15.0	—	5.66E+19	7.11	56.1	1.03
4 浦底～内池見断層	21	14.0	1.75	1.80E+19	6.77	54.9	0.48
5 甲楽城沖断層	13	8.7	1.08	4.26E+18	6.36	57.7	0.18
6 白木～丹生断層	15	10.0	1.25	6.55E+18	6.48	50.9	0.27
7 C断層	18	12.0	1.50	1.13E+19	6.64	48.9	0.40
8 大陸棚外縁～B～野坂断層	49	15.0	—	1.05E+20	7.29	39.9	2.18
9 三方断層	27	15.0	—	3.18E+19	6.94	37.1	1.05
10 FO-A～FO-B～熊川断層	64 ^{※2}	15.0	—	1.79E+20	7.44	15.3	4.17
11 F _G 1東部断層	30	15.0	—	3.93E+19	7.00	100.1	0.45
12 F _G 1西部断層	29	15.0	—	3.67E+19	6.98	80.0	0.53
13 F _{GA} 3東部断層	29	15.0	—	3.67E+19	6.98	59.5	0.72
14 F _{GA} 3西部断層	21	14.0	1.75	1.80E+19	6.77	45.5	0.58
15 F _{GA} 4東部断層	7	4.7	0.58	6.65E+17	5.82	56.6	0.05
16 F _{GA} 4西部断層	17	11.3	1.41	9.53E+18	6.59	43.3	0.40
17 F _{GA} 4北部断層	17	11.3	1.41	9.53E+18	6.59	50.1	0.35
18 経ヶ岬北方断層	19	12.7	1.58	1.33E+19	6.69	46.2	0.47
19 郷村断層	34	15.0	—	5.05E+19	7.07	59.9	0.88
20 香住北方断層	38	15.0	—	6.30E+19	7.14	77.4	0.80

※1: 小数第3位を切上げ ※2: 津波評価上の長さ

波高が**1m以上**となる以下の断層を抽出

「安島岬沖～和布～干飯崎沖～甲楽城断層」、「甲楽城沖～浦底～池河内～柳ヶ瀬山断層」、「大陸棚外縁～B～野坂断層」、「三方断層」、「FO-A～FO-B～熊川断層」の5断層を抽出

2-4. 検討対象波源の選定及び津波評価

パラメータスタディ(海域活断層)

○土木学会(2016)に基づき、不選定性が存在する因子のうち、広域応力場を合理的と考えられる範囲で変化させた数値シミュレーションを実施し、パラメータ変動範囲を補完するように広域応力場を変化させた場合の検討を行った。

○検討対象断層の傾斜角は、調査結果に基づいた傾斜角とした。

○海域活断層においては地盤の変動量も考慮する。

【各断層のセグメントの番号】



【パラメータスタディ結果】

断層名	断層長さ (km)	走行 【傾斜方向】 (°)	モーメント マグニチュード Mw	すべり 量 (m)	傾斜角 (°)	広域 応力場 (°)	上縁 深さ (km)	取水口前面		
								最大水位 上昇量 (m)	最大水位 下降量 (m)	放水口周辺 最大水位 上昇量 (m)
								(m)	(m)	(m)
安島岬沖～和布～ 千飯崎沖～甲楽城 断層	76	① 3.91 ②324.36 ③358.11 ④36.66 ⑤ 27.32 ⑥5.12 ⑦305.16 ⑧317.82 【東】	7.53	5.02	①:45 ②:90 ③～⑦:45 ⑧:90	90	0.0	1.89	-1.10	1.41
								0.74	-0.61	0.87
								0.72	-0.64	0.78
								0.68	-0.68	0.67
甲楽城沖～浦底～ 池河内～柳ヶ瀬山 断層	36※2	①347.98 ②316.76 ③329.74 ④328.03 ⑤322.95 ⑥320.79 ⑦325.76 ⑧317.34 ⑨299.48 ⑩305.13 ⑪147.15 ⑫312.01 ⑬323.77 ⑭143.66 ⑮163.00 【東】	7.10	2.99	90	100	0.0	1.23	-0.77	0.62
								1.11	-0.66	0.56
								0.98	-0.57	0.48
								0.62	-0.39	0.30
海域活断層 大陸棚外縁～ B～野坂断層	49	①41.12 ②345.44 ③330.27 ④309.19 ⑤315.54 ⑥305.27 【東】	7.29	3.76	①～③:60 ④～⑥:90	90	0.0	4.21	-0.93	1.73
							2.5	1.46	-0.95	1.59
							5.0	0.82	-0.88	1.27
							0.0	3.63	-0.91	1.65
三方断層	27	①357.29 ②351.32 ③330.81 ④1.97 【東】	6.94	1.94	60	100	0.0	0.48	-0.35	0.60
								0.48	-0.35	0.57
								0.45	-0.32	0.51
								0.36	-0.27	0.39
FO-A～FO-B～ 熊川断層	64※2	①139.02 ②129.01 ③110.50 【西】	7.43	5.32	90	95	0.0	0.97	-2.91	1.95
							2.5	0.46	-1.38	1.38
							5.0	0.24	-1.25	0.92
							0.0	0.14	-0.13	0.16
						110	0.14	-0.13	0.16	
						120	0.14	-0.13	0.16	

※2:津波評価上の長さ

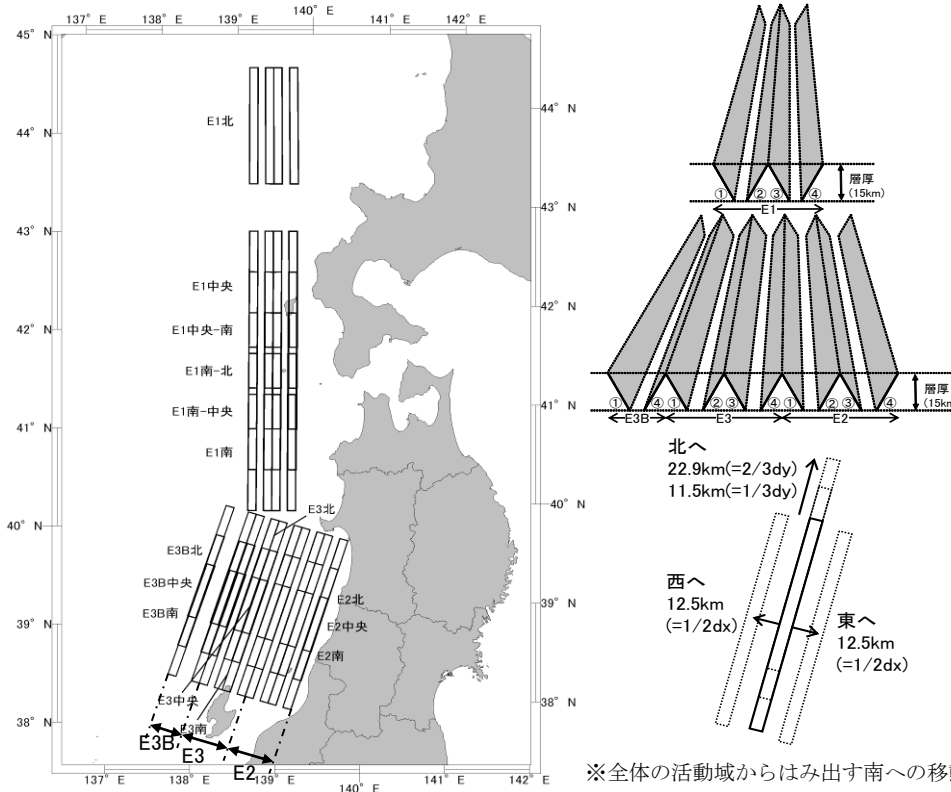
水位変動量の大きい「大陸棚外縁～B～野坂断層」、及び「FO-A～FO-B断層～熊川断層」について詳細数値計算モデルによる検討対象波源として選定する。

2-4. 検討対象波源の選定及び津波評価

基準断層モデルの設定とパラメータスタディ(日本海東縁部の断層)

- 日本海東縁部の地震による想定津波として、北海道沖から新潟県沖までの広範囲な海域にモーメントマグニチュード $M_w=7.85$ の基準断層モデルを設定。
- 土木学会(2016)に基づき、不確定性が存在する因子のうち、「断層の位置」、「傾斜方向」、「走向」を合理的と考えられる範囲内で変化させたパラメータスタディを実施。水位変動量が比較的大きなケースについては、検討範囲を補間するように断層位置を変化させた場合や、傾斜角と上縁深さを変化させた場合の検討も行った。

【断層の設定】



※全体の活動域からはみ出す南への移動は考えない

〔位置調整の詳細〕

【パラメータスタディ結果※】

※代表的なケースのみを抜粋して掲載。
その他のケースはH25.8.14第8回審査会合資料2-3参照

断層名	断層長さ (km)	走向 【傾斜方向】 (°)	位置調整	M_w	すべり量 (m)	傾斜角 (°)	上縁深さ (km)	取水口前面		放水口周辺		
								最大水位 上昇量 (m)	最大水位 下降量 (m)	最大水位 上昇量 (m)		
E1 南②	131	183	基準	7.85	9.44	60	0.0	1.13	-1.17	1.16		
								E2 南①	131	30	基準	7.85
E3 南①	131	20	基準	7.85	9.44	60	0.0	0.92	-1.65	1.43		
								2.5	0.83	-1.49	1.51	
								5.0	0.76	-1.24	1.47	
								52.5	0.85	-1.47	1.36	
								45	0.81	-1.25	1.25	
								30	0.64	-0.78	0.98	
								60	0.85	-0.97	1.45	
								60	1.14	-1.19	1.05	
E3B 南④	131	200		7.85	9.44	60	0.0	1.69	-1.12	1.11		
								60	0.0	0.85	-1.54	1.36
								60	0.0	0.85	-1.46	1.30
								60	0.0	0.85	-1.46	1.30

海域活断層に比べて水位変動量が小さいことから、詳細数値計算モデルによる検討対象波源として選定しない。

検討対象波源の選定

海域活断層、日本海東縁部のパラメータスタディの検討結果より、「大陸棚外縁～B～野坂断層」及び「FO-A～FO-B～熊川断層」について、以下の諸元にて詳細数値計算モデルによる検討を実施する。

断層名	合計断層長さ L	平均断層幅 W	Mw ^{※1}	断層セグメント No.	上端深さ	地震発生層厚さ	傾斜角	断層セグメント幅	広域応力場	すべり角	剛性率	すべり量 D ^{※2}
大陸棚外縁～B～野坂断層	49km	16.2km	7.29	①	0.0km	15.0km	60.00°	17.3km	90°	157°	3.5×10 ¹⁰ N/m ²	3.76m
				②						70°		
				③						46°		
				④			90.00°	15.0km		0°		
				⑤						11°		
				⑥						0°		
FO-A～FO-B～熊川断層	64km	15.0km	7.43	①	0.0km	15.0km	90.00°	15.0km	90°	30°	3.5×10 ¹⁰ N/m ²	5.32m
				②						0°		
				③						0°		

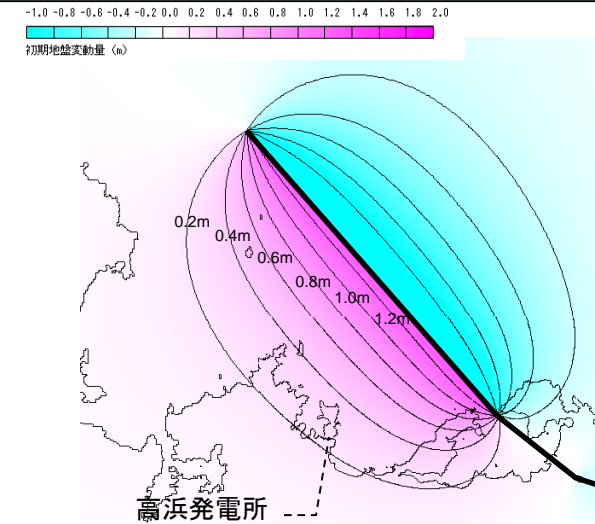
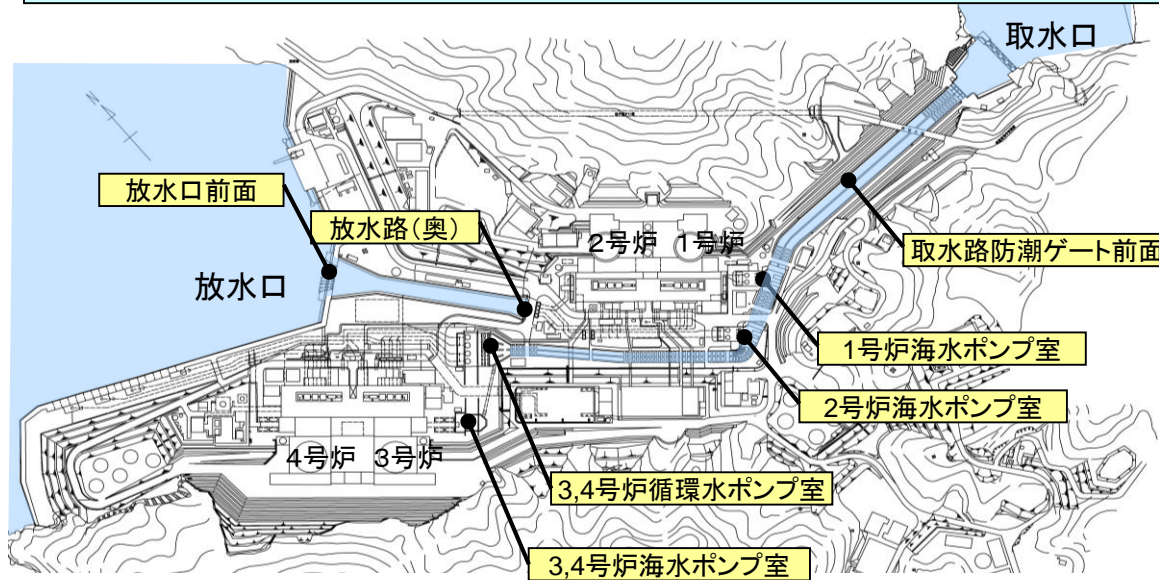
※1: 武村(1998)より、 $\log M_0 = 2.0 \log L + 16.64$ 、Kanamori(1977)より、 $M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$ の関係を用いて算出

※2: $M_0 = \mu DLW$ より算出

2-4. 検討対象波源の選定及び津波評価

地震による津波水位の評価結果

- 水位上昇が最大となるのは、循環水ポンプ及び海水ポンプを全て停止した安全側の条件において、「大陸棚外縁～B～野坂断層」(取水路 防潮ゲート前面)による津波及び「FO-A～FO-B～熊川断層」(取水路防潮ゲート前面以外の評価点)による津波である。
- 水位下降が最大となるのは、海水ポンプを稼動した安全側の条件において、「FO-A～FO-B～熊川断層」による津波である。



FO-A～FO-B～熊川断層※1による地盤変動量

※1: 上縁深さ: 0km、傾斜角: 90°、広域応力場: 90° のケース

波源モデル	※2 取水路 防潮 ゲート	水位上昇							水位下降		
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室
大陸棚外縁～B～野坂断層	閉	5.3	0.9	0.9	0.9	1.3	2.1	2.1	—	—	—
FO-A～FO-B～熊川断層	開	2.0	2.1	1.9	1.9	2.5	2.7	2.8	-1.9 ^{※3}	-1.8 ^{※3}	-2.0 ^{※3}
日本海東縁部の波源	閉	—	—	—	—	—	—	—	-0.8	-0.7	-1.0

※2 閉: 取水路防潮ゲート天端T.P.+8.5mで全閉、開: 両系列のゲートが開いた状態(T.P.±0～+8.5mはカーテンウォールあり)

※3 地盤変動量0.23m隆起

数字は、T.P.(m)

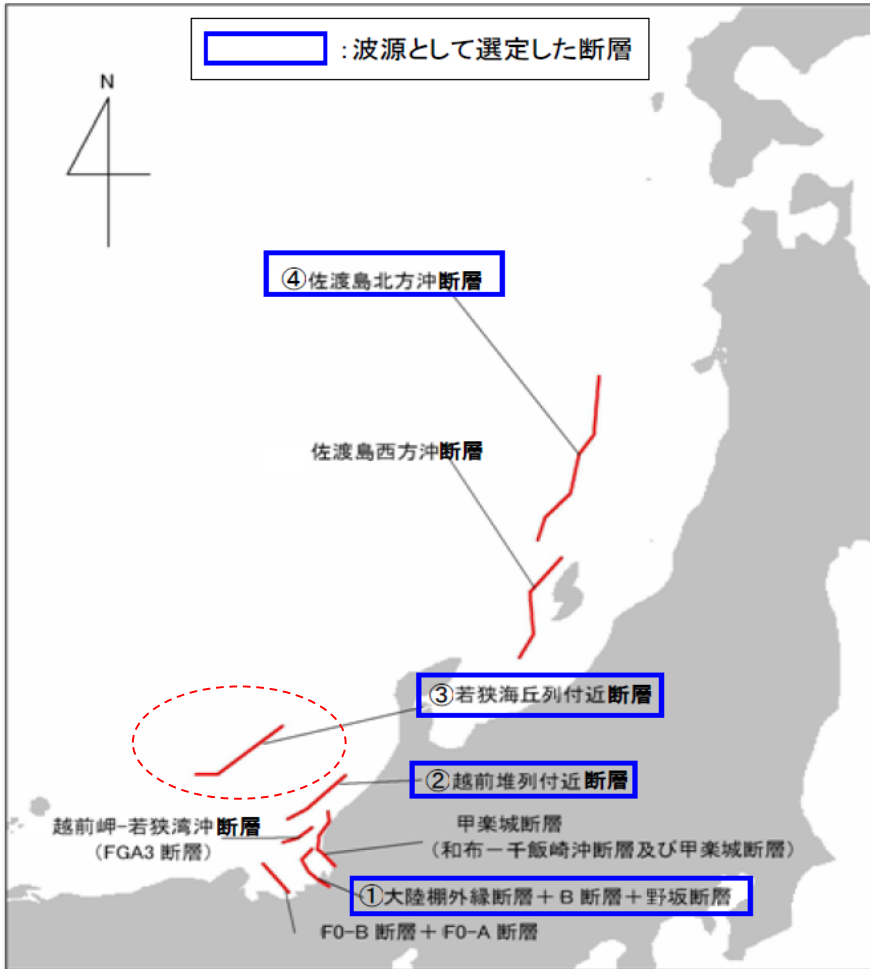
3. 地震に起因する津波(行政機関の波源モデル)

3-1. 福井県モデル(若狭海丘列付近断層)

3-1. 福井県モデル(若狭海丘列付近断層)

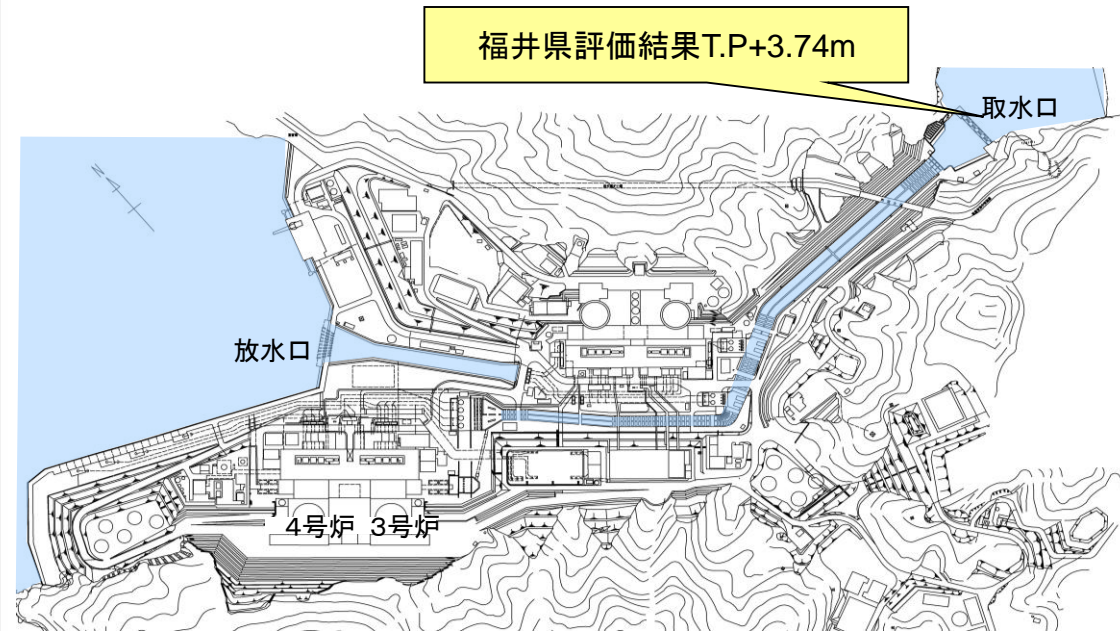
福井県モデル(若狭海丘列付近断層)の諸元

- 高浜発電所の立地する福井県では、県内沿岸市町が津波対策の参考とするための基礎的資料として、県独自で津波高や浸水深の計算(津波シミュレーション)が行われている。
- 県の評価結果では、50m格子サイズの検討結果として取水口前でT.P+3.74mとなっている。



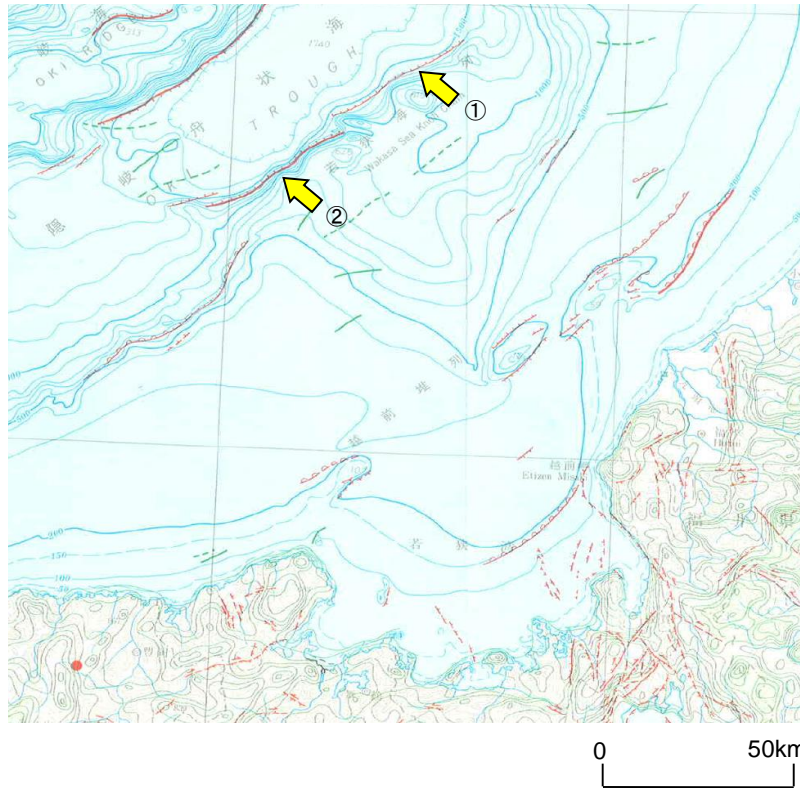
【福井県が想定した若狭海丘列付近断層の断層モデル】

断層長さ (km)	断層幅 (km)	地震規模 Mw	上端深さ (km)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
90	17.32	7.63	0.1	60	90	6.43

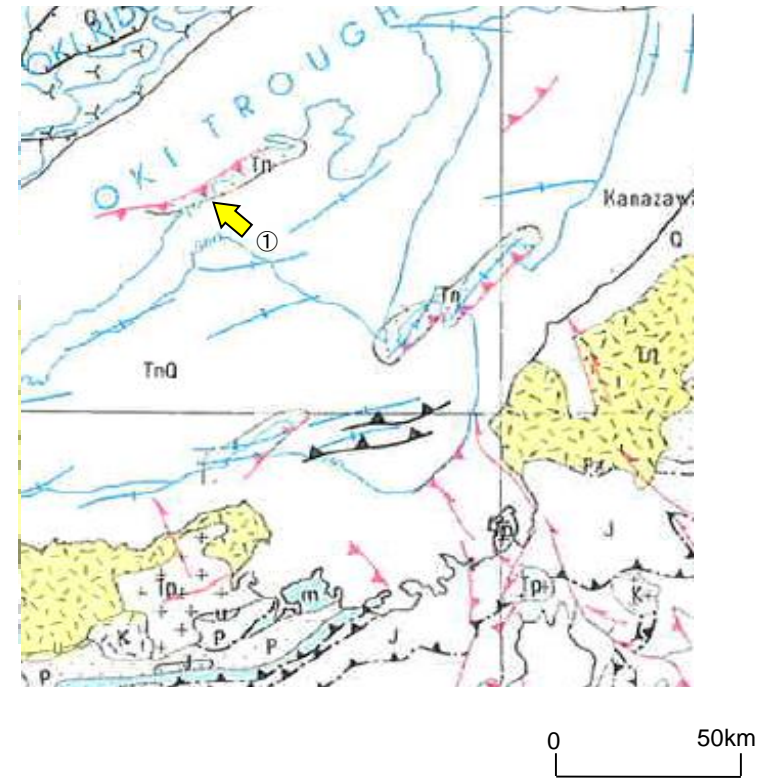


若狭海丘列付近断層に関する文献調査結果

活断層研究会編
「新編 日本の活断層(1991)付図」



地質調査所編
「日本地質アトラス(第二版)(1992)」



断層名	長さ	分類	変位の向き	当社整理番号
①名称なし	約36km (図読)	断層	南東側隆起	F _{AR} 21
②名称なし	約37km (図読)	断層	南東側隆起	F _{AR} 22

断層名	長さ	分類	変位の向き	当社整理番号
①名称なし	約48km (図読)	逆断層	南東傾斜 (南東側隆起)	F _{GA} 12

逆断層, 正断層, 横ずれ断層, 未区分の断層に分類し, 図示

「日本地質アトラス(第二版)(1992)」では、「新編 日本の活断層(1991)」付図に記載された2条の断層のうち、F_{AR}22に相当するF_{GA}12のみを図示

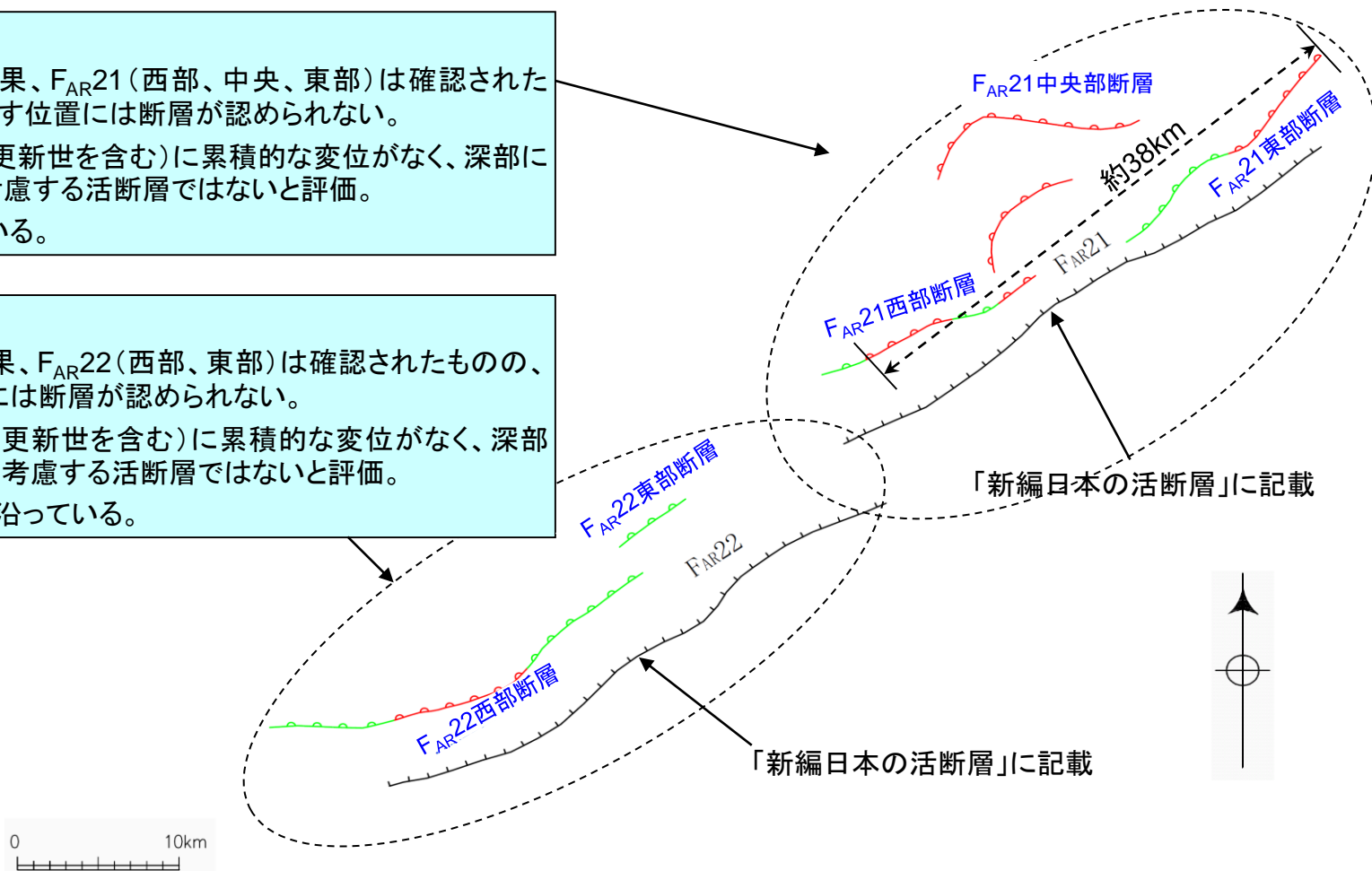
若狭海丘列付近断層に関する評価結果

【F_{AR}21】

- 海上音波探査記録の再解析の結果、F_{AR}21(西部、中央、東部)は確認されたものの、「新編日本の活断層」が示す位置には断層が認められない。
- 緑色の断層は、浅部の地層(後期更新世を含む)に累積的な変位がなく、深部には断層があるものの、震源として考慮する活断層ではないと評価。
- F_{AR}21は緩やかな斜面に位置している。

【F_{AR}22】

- 海上音波探査記録の再解析の結果、F_{AR}22(西部、東部)は確認されたものの、「新編日本の活断層」が示す位置には断層が認められない。
- 緑色の断層は、浅部の地層(後期更新世を含む)に累積的な変位がなく、深部には断層があるものの、震源として考慮する活断層ではないと評価。
- OK層上面の構造が直線的な急崖に沿っている。



- 海上音波探査記録の再解析の結果、「新編 日本の活断層」が示す位置には、断層が認められない。
- 「新編 日本の活断層」が示す位置の北西部に、数条の断層が確認されており、これらのうち、F_{AR}21付近の約38kmを最も大きな波源として評価。ただし、当社発電所から100km以上遠方に位置し、断層長が比較的短いことから、津波評価における検討対象断層としては選定していない。

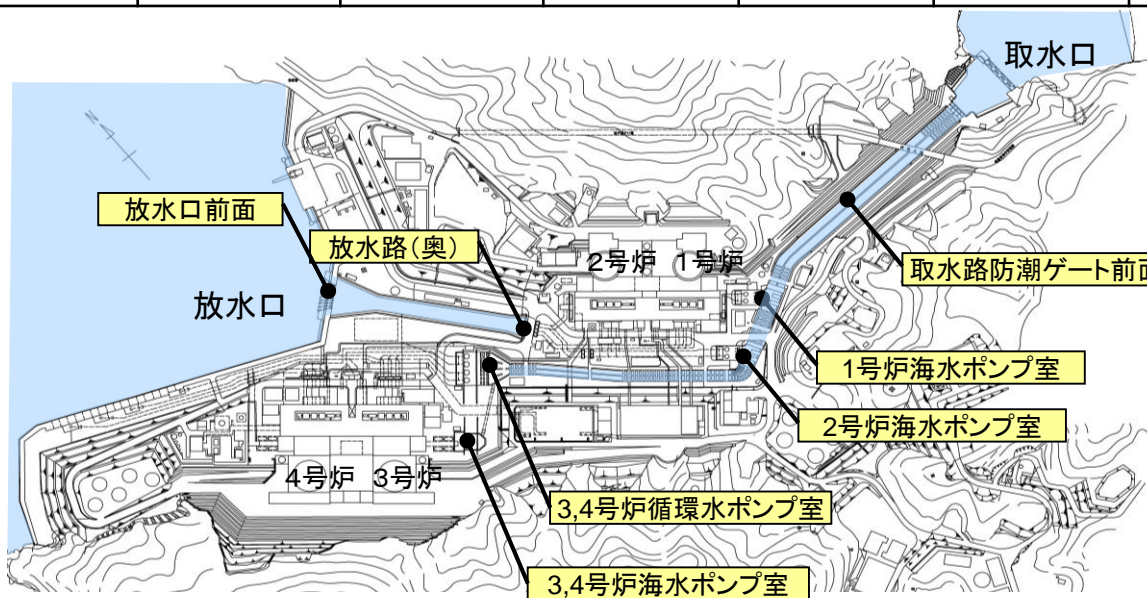
福井県が想定した断層長さ90kmの波源モデルの影響検討を行うため、福井県が想定した波源モデルを用いた津波シミュレーションを実施した

3-1. 福井県モデル(若狭海丘列付近断層)

福井県モデル(若狭海丘列付近断層)による津波水位の評価結果

【福井県が想定した若狭海丘列付近断層の波源モデル】

断層長さ (km)	断層幅 (km)	地震規模 Mw	上端深さ (km)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
90	17.32	7.63	0.1	60	90	6.43



数字は、T.P.(m)

波源モデル	取水路 防潮ゲート ※1	水位上昇							水位下降		
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室
福井県モデル (若狭海丘列付近断層)	閉	4.5	1.1	1.1	1.1	1.4	3.6	3.8	-0.8	-0.8	-1.0

※1 閉: 取水路防潮ゲート天端T.P.+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(T.P.±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

3-2. 秋田県モデル(日本海東縁部の断層)

3-2. 秋田県モデル(日本海東縁部の断層)

行政機関による日本海東縁部の波源断層モデル

行政機関	日本海東縁部付近における断層		
	断層長さ	Mw	引用元
北海道	未記載	7.8	H25.3日本海沿岸の津波浸水想定の特検・見直し報告書のP10(参考4-1 現行の津波想定概要)
青森県	未記載	7.9	H25.1.29津波浸水予測図について
秋田県	350km	8.69	H24.12.28秋田県地震被害想定調査業務委託津波浸水シミュレーション 参考資料
石川県	167km	7.99	H24.3平成23年度石川県津波浸水想定調査
福井県	167km	7.99	H24.9.3福井県における津波シミュレーション結果について
鳥取県	222km	8.16	鳥取県津波対策検討委員会
島根県	222.7km	8.01	島根県津波浸水想定区域(マップ)について
山口県	131.1km	7.85	H25.1.29第4回山口県地震・津波防災対策検討委員会



○各行政機関において、日本海東縁部の断層による津波影響評価を実施しているが、各機関の波源の評価は一致していない。

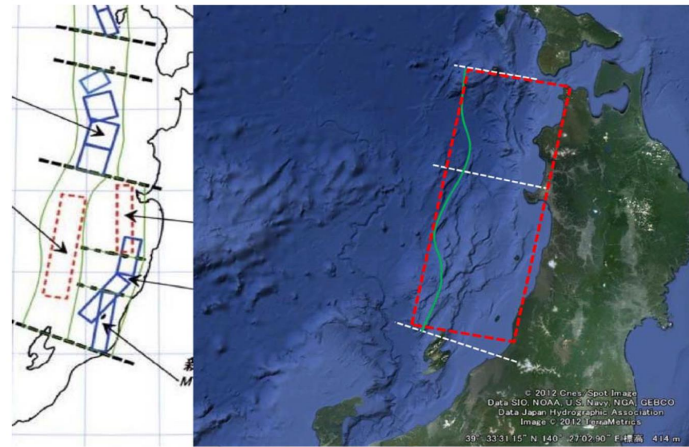
○このうち、最大規模の波源モデルは秋田県の想定モデルである。

3-2. 秋田県モデル(日本海東縁部の断層)

秋田県モデル(日本海東縁部の断層)の諸元

表-2.2.5 海域 A+B+C の津波断層モデル(断層長さ 350km、M=8.7)

巨視的震源パラメータ	設定方法		
断層モデル原点	地中の上端における南端	38° 17' 36.8" N	
走向 θ		138° 5' 14.9" E	
傾斜角 δ	東傾斜	14°	
すべり角 λ	逆断層	20°	
断層モデル上端深さ		90°	
断層モデル長さ L_{model}	海域A、海域B、海域Cの運動	0 km	
断層モデル幅 W_{model}	$W/L=0.38$ を摘要し、5kmメッシュでモデル化	350 km	
断層モデル面積 S_{model}		135 km	
マグニチュード M	$S_{model}=L_{model} \times W_{model}$	47,250 km ²	R=122.6 km
剛性率 μ	$\log S=M-4.07$ $S:km^2$	4.73E+14 cm ²	
平均すべり量 D_{model}	$3.50 \times 10^{11} dyne-cm$ と仮定	8.7	
地震モーメント M_0	$\log D_{model}=10^{-10.2} \times (\mu S)^{0.5}$	3.50E+11 dyne/cm ²	
モーメントマグニチュード M_w	$M_0=\mu \cdot D \cdot S$	3.50E+10 N/m ²	
	$M_w=(\log M_0-16.1)/1.5$ $M_0:dyne-cm$	811 cm	
		8.1 m	
		1.34E+29 dyne-cm	
		1.34E+22 Nm	
		8.69	



【海域 A+B+C、大すべり域(面積比 20%)を断層中央から 15km 北側に配置】

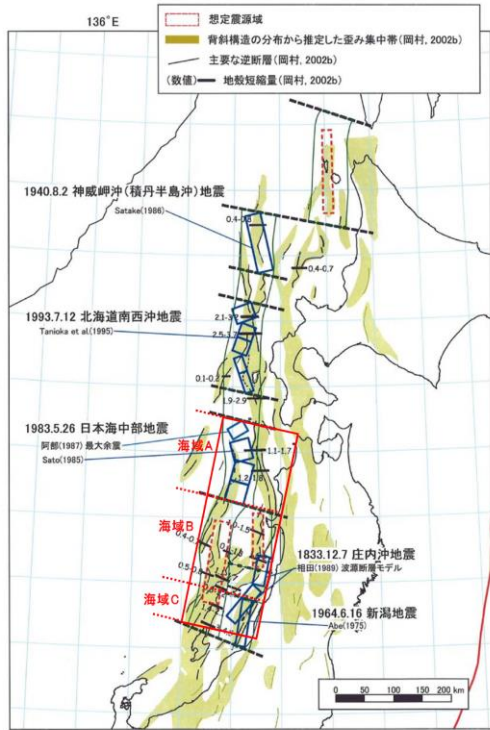
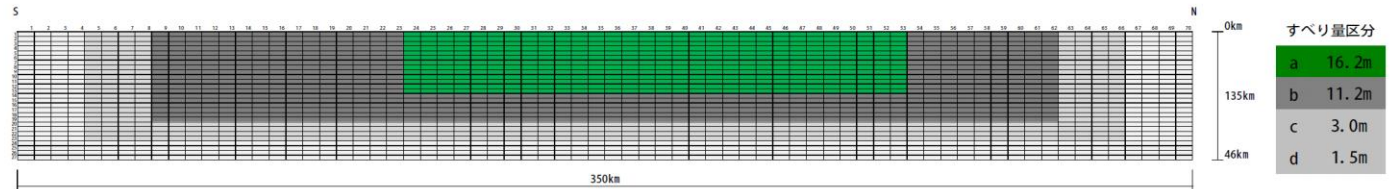


図-2.1.1 秋田県で想定した津波断層の概略の波源域

表-2.1.1 津波断層モデル一覧表

区分	ID	震源、想定地震	関連震源	想定した地震規模		傾斜角	すべり角	断層モデル上端深さ	断層モデル長さ	断層モデル幅	断層モデル面積	断層モデル下端深さ	地震モーメント	モーメントマグニチュード	平均すべり量	備考	
				断層長さL(km)	マグニチュードMj												
単独地震	1	海域A	日本海中部	130	7.9	東傾斜	35	90	0	130	50	6,500	29	6.85E+20	7.82	3.0	
	2	海域B	佐渡島北方沖、秋田県沖、山形県沖	140	7.9	東傾斜	35	90	0	140	54	7,560	31	8.59E+20	7.89	3.2	小断層を2km×2kmでモデル化
	3	海域C	新潟県北部沖、山形県沖	80	7.5	西傾斜	55	90	0	80	32	2,560	26	1.69E+20	7.42	1.9	
運動地震	4	海域A+海域B	新潟県北部沖、山形県沖	270	8.5	東傾斜	20	90	0	270	105	28,350	36	6.24E+21	8.46	6.3	
	5	海域B+海域C	佐渡島北方沖、秋田県沖、山形県沖	220	8.3	東傾斜	20	90	0	220	85	18,700	29	3.34E+21	8.28	5.1	小断層を5km×5kmでモデル化
	6	海域A+海域B+海域C	新潟県北部沖、山形県沖	350	8.7	東傾斜	20	90	0	350	135	47,250	46	1.34E+22	8.69	8.1	

注) 海域Cの単独地震については、津波シミュレーションの概略計算で秋田県への影響が比較的小さいと想定されたため、最終的な詳細計算は省略した。

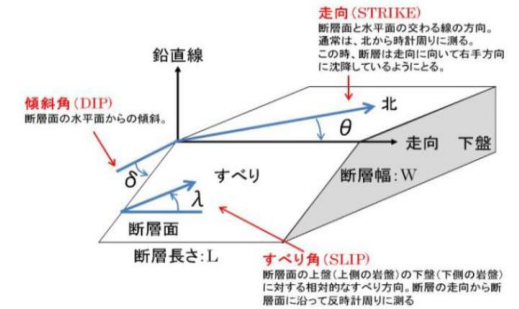


図-3.1.2 断層パラメータの定義

「地震被害想定調査」に係る津波関連データについて(2013年1月31日更新)津波浸水シミュレーション参考資料(秋田県HPより抜粋)

3-2. 秋田県モデル(日本海東縁部の断層)

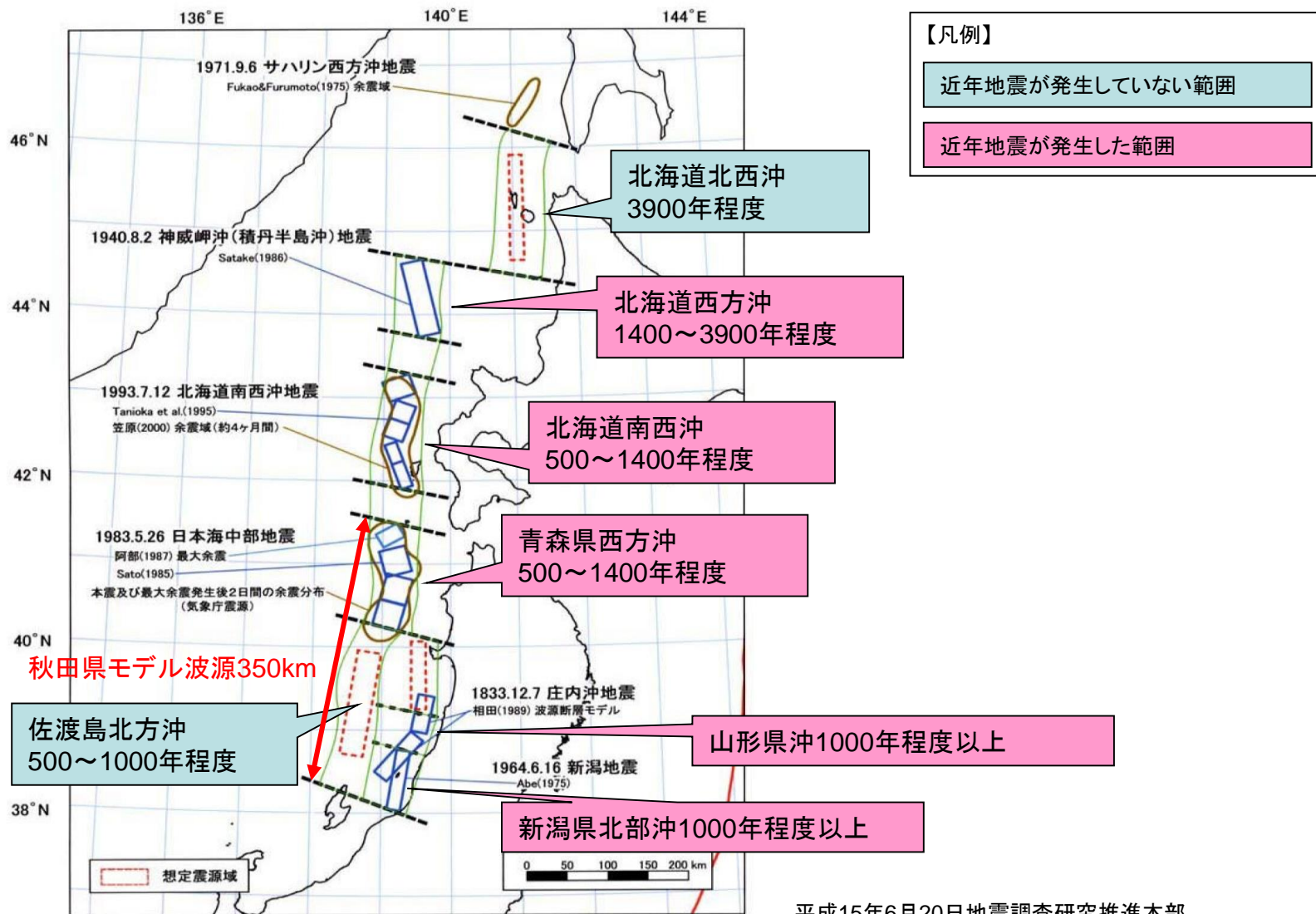


図2 過去の震源モデル、及び想定震源域

○日本海東縁部における地震は、概ね1000年程度の平均発生間隔である。しかしながら、ほとんどの領域で近年地震が発生している状況であり、原子力発電所の運転期間中に秋田県が想定する350kmが発生する可能性は極めて低いと考えられる。

○なお、秋田県のHPにおいても「秋田県沖で歴史上確認された最大の地震は、日本海中部地震(M7.7)であるが、今回想定した最大クラスの地震・津波が発生する可能性は極めて低いものと考えられる」との記載がある。

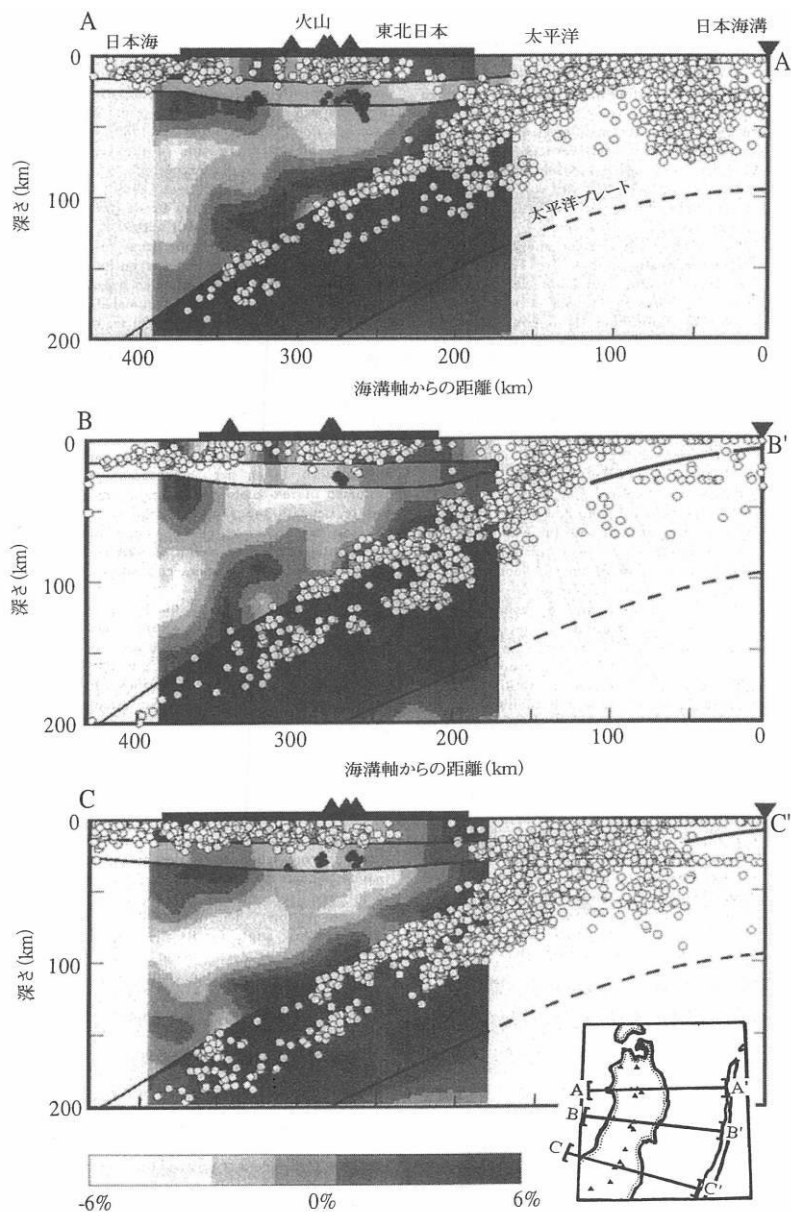


図3.5 島弧に直交する方向(挿入図のA-A', B-B', C-C')に沿った地殻・上部マントルのP波速度分布 (Zhao et al., 1994)

各深さにおける平均速度からのズレを白黒のスケールで示す。白は低速度、黒は高速度に対応する。各図上部の太線は陸地の範囲、三角は活火山の位置、丸は微小地震の震源。

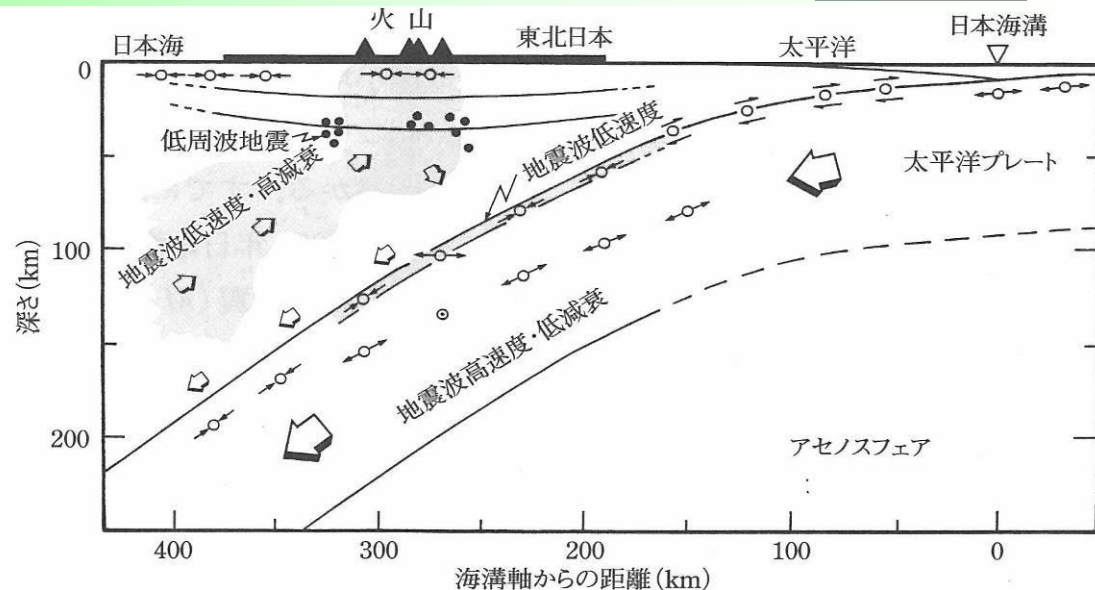


図3.6 東北日本の地殻・上部マントルの東西鉛直断面模式図 (Hasegawa et al., 1994)
丸は地震の震源を、震源に付けた矢印は震源に働く力あるいは断層の動きを示す。

- ・日本海東縁に沿っては、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震など、逆断層型の大地震が帯状に分布。
- ・太平洋側のプレート境界である日本海溝や千島海溝の場合のように、地表面でプレート境界が1本の線で表されるという明瞭な証拠は見つかっておらず、幅広い帯状の領域で2つのプレートの収束を分担していると考えられる。
- ・大陸性地殻では、深さ10-15km付近にデタッチメントがあり、それより浅い上部近くに地震の原因となる断層が形成されると考えられている。背斜構造の規模もデタッチメント深度が15km前後であることを支持する。

出典

大竹他(2002):「日本海東縁の活断層と地震テクトニクス 第3章東北日本の地殻構造と地震活動」, 東京大学出版会

○日本海東縁部は、太平洋側とは異なり、プレートの沈み込みは生じていない。
○また、地震が発生する深さはおおよそ15km以浅であり、秋田県が設定した波源モデルのような地質構造は日本海東縁部には見られない。

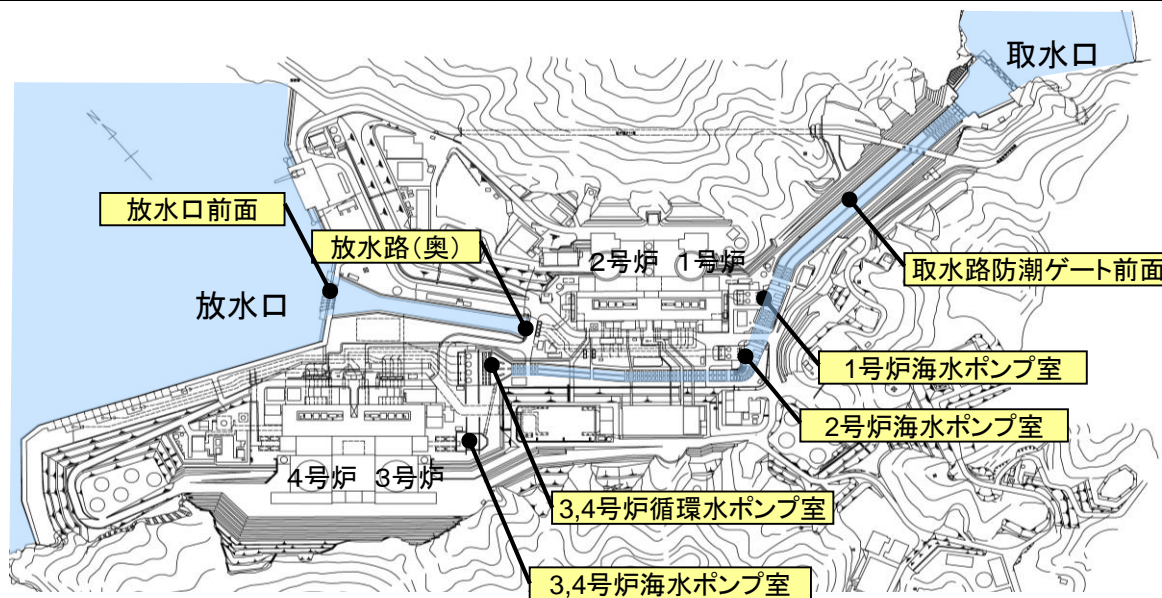
秋田県が想定した断層長さ350kmの波源モデルの影響検討を行うため、秋田県が想定した波源モデルを用いた津波シミュレーションを実施した。

3-2. 秋田県モデル(日本海東縁部の断層)

秋田県モデル(日本海東縁部の断層)による津波水位の評価結果

【秋田県が想定した日本海東縁部の断層の波源モデル(不均質モデル)】

断層長さ (km)	断層幅 (km)	地震規模 Mw	上端深さ (km)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	平均すべり量 (m)
350	135	8.69	0	90	20	8.1



数字は、T.P.(m)

波源モデル	※1 取水路 防潮 ゲート	水位上昇							水位下降		
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室
秋田県モデル (日本海東縁部の断層)	閉	4.4	1.7	1.7	1.7	1.7	2.9	3.0	-1.4	-1.4	-1.6

※1 閉: 取水路防潮ゲート天端T.P.+8.5mで全閉、開: 両系列のゲートが開いた状態(T.P.±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

3-3. 検討会※モデル

○若狭海丘列付近断層

○FO-A～FO-B～熊川断層

検討概要

【検討概要】

国土交通省、内閣府、文部科学省では、「日本海における大規模地震に関する調査検討会」(以下、検討会という)において、日本海における最大クラスの津波断層モデル等の設定に関する検討を行っている。検討会による報告書(平成26年9月)を基に、以下の通り検討を行った。

1. 検討対象波源

⇒基準津波として選定されている若狭海丘列付近断層とFO-A~FO-B~熊川断層の2つの波源モデル(それぞれ5つの不均質モデル)を選定。

2. 概略計算モデルを用いた検討

⇒概略計算を行った結果、若狭海丘列付近断層の水位上昇側において、これまでの一様モデルによる計算結果と同程度もしくはそれ以上の津波水位となった波源を3ケース抽出。

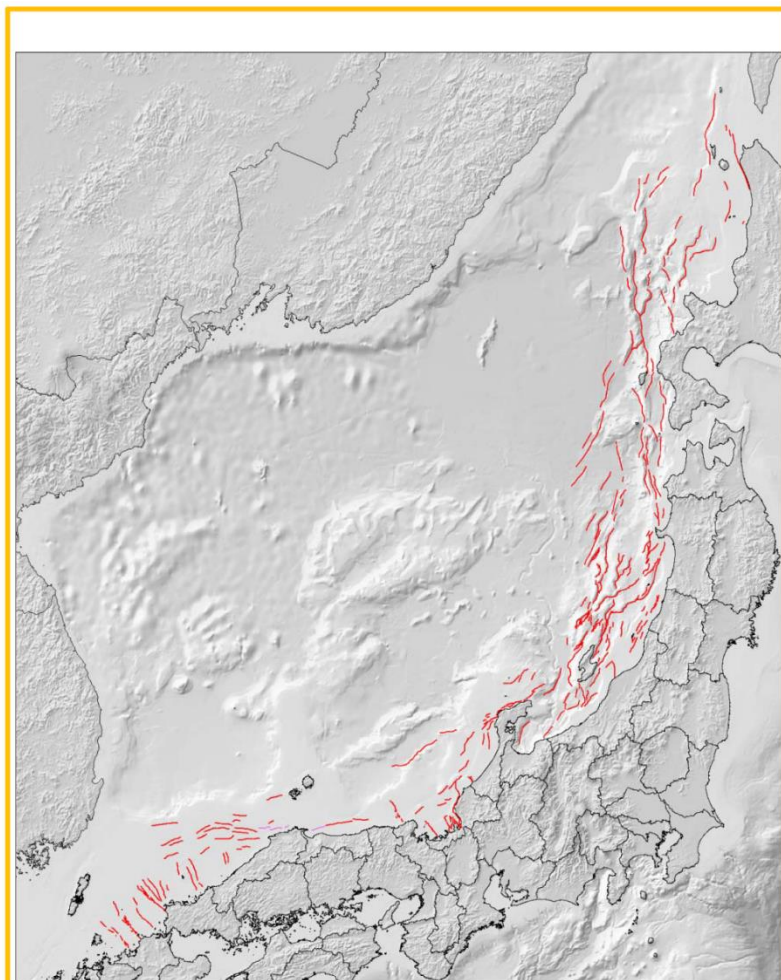
3. 詳細計算モデルを用いた検討

⇒概略計算で抽出された3ケースに対して、詳細計算モデルを用いて津波水位を算出し、いずれの波源においてもこれまでの一様モデルによる計算結果よりも小さい値であることを確認した。

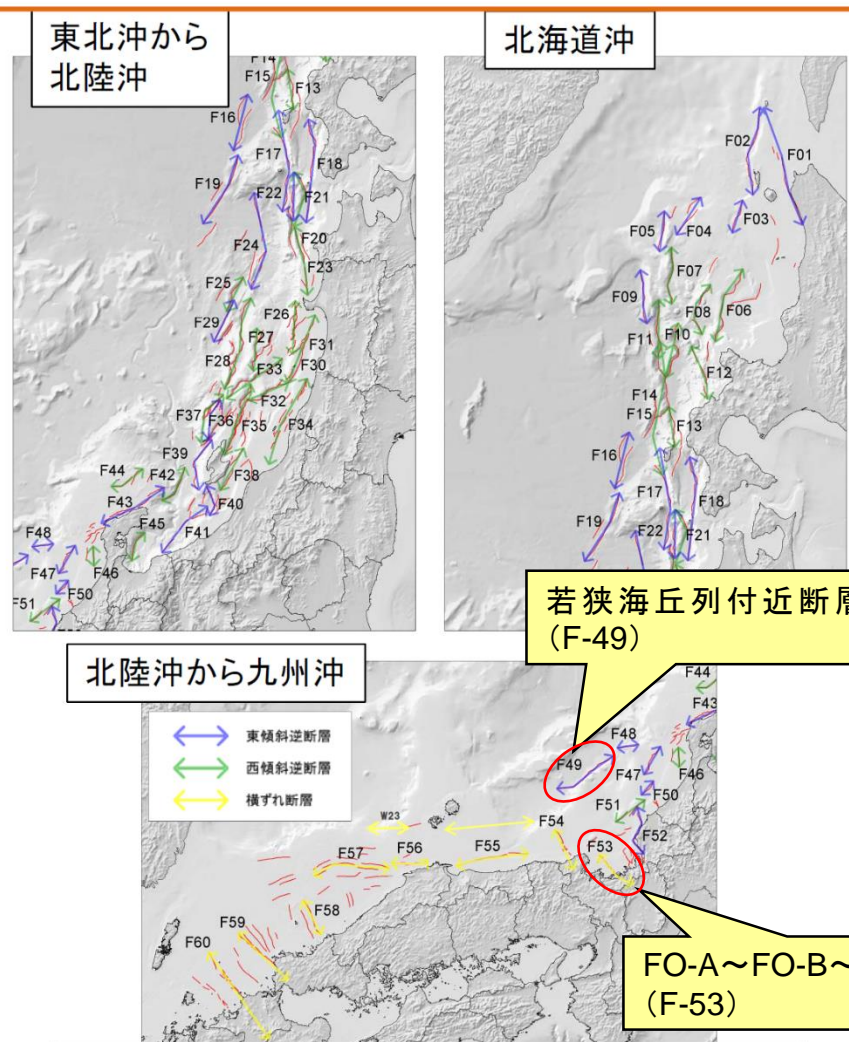
3-3-1. 検討対象波源

3-3-1. 検討対象波源

検討対象波源



今回設定した海底断層トレース



今回設定した断層のグルーピング結果

高浜発電所の基準津波として選定されている、若狭海丘列付近断層(F-49)及びFO-A~FO-B~熊川断層(F-53)の波源モデルについて、津波水位計算を実施した。

3-3-1. 検討対象波源

波源モデルパラメータ

波源	モデル	セグメント		走向 (°)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	上端深さ (km)	断層幅 (km)	断層長さ (km)	合計断層 長さ(km)	Mw	すべり量 (m)
若狭海丘列 付近断層	福井県	Sg1	一様すべり	91	60	90	0.1	17.3	18	90	7.63	6.43
		Sg2		51	60	90	0.1	17.3	72			
	検討会 (F49)	Sg1	背景領域	81	60	264	1.0	14.5	21.1	87	7.39	2.82
		Sg2	大すべり域	81	60	264	2.8	6.2	8.4			4.30
		Sg3	背景領域	47	60	145	1.0	14.5	36.3			2.72
		Sg4	大すべり域	47	60	145	2.8	6.2	16.1			4.40
	Sg5	背景領域	54	60	215	1.0	14.5	29.9	2.76			
	Sg6	大すべり域	54	60	215	2.8	6.2	12.8	4.36			
FO-A~FO-B~ 熊川断層	関西電力	Sg1	一様すべり	139	90	30	0.0	15	36.2	64	7.43	5.32
		Sg2		129	90	0	0.0	15	9.5			
		Sg3		110	90	0	0.0	15	17.7			
	検討会 (F53)	Sg1	背景領域	111	90	35	1.0	14.0	17.2	60	7.21	1.91
		Sg2	大すべり域	111	90	35	3.3	7.0	8.6			3.81
		Sg3	背景領域	130	90	35	1.0	14.0	11.4			1.63
	Sg4	大すべり域	130	90	35	3.3	7.0	6.9	4.09			
	Sg5	背景領域	139	90	35	1.0	14.0	31.3	1.99			
	Sg6	大すべり域	139	90	35	3.3	7.0	14.6	3.73			

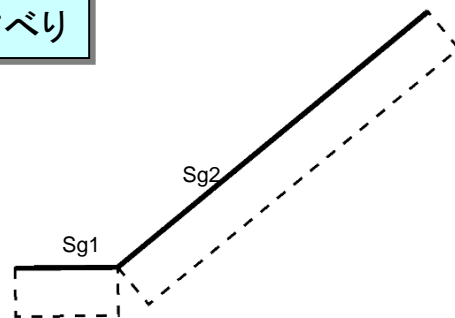
3-3-1. 検討対象波源

若狭海丘列付近断層の波源モデル

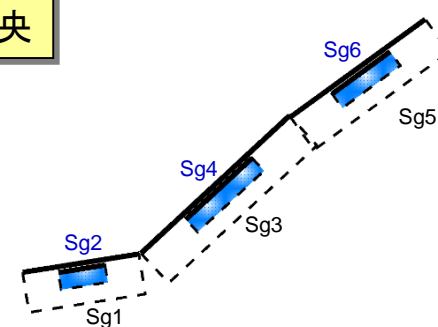
若狭海丘列付近断層(F-49)



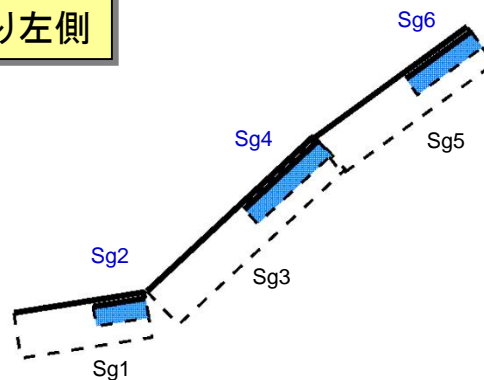
一様すべり



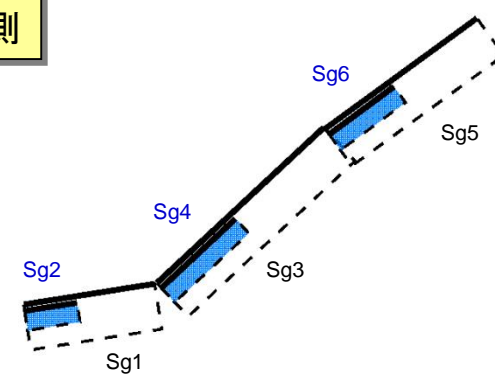
大すべり中央



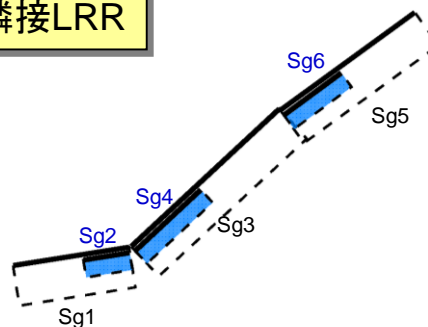
大すべり左側



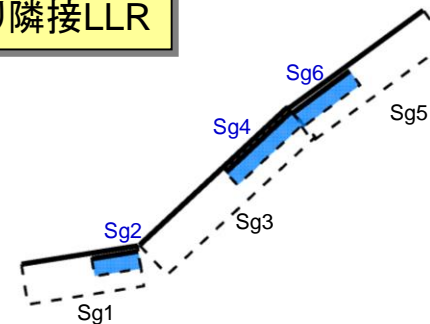
大すべり右側



大すべり隣接LRR



大すべり隣接LLR

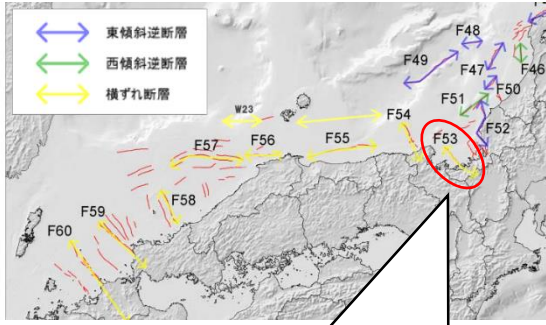


- : 地表面断層位置(背景領域)
- : 地表面断層位置(大すべり領域)
- - - : 断層面(背景領域)
- : 断層面(大すべり領域)

福井県モデル

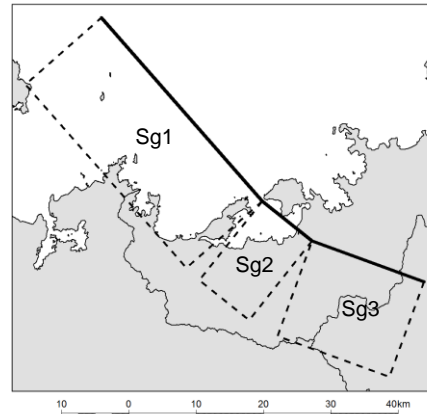
検討会モデル

FO-A~FO-B~熊川断層の波源モデル

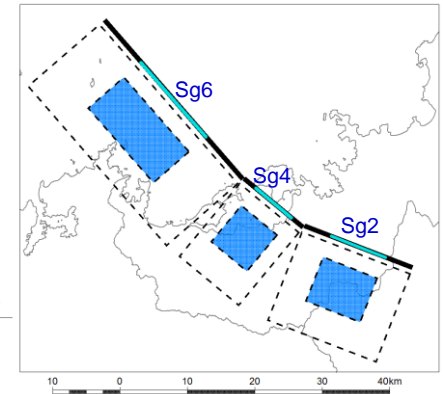


FO-A~FO-B~熊川断層(F-53)

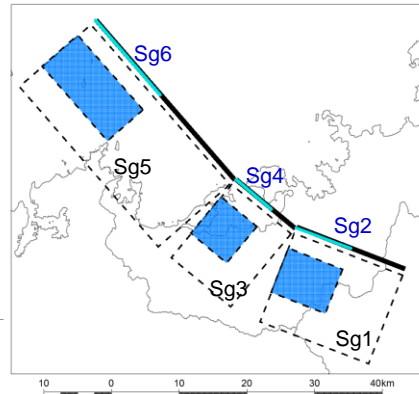
一様すべり



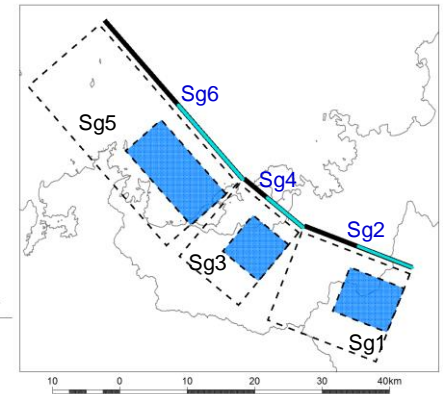
大すべり中央



大すべり左側

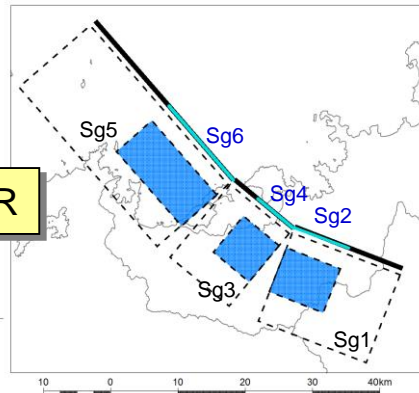


大すべり右側

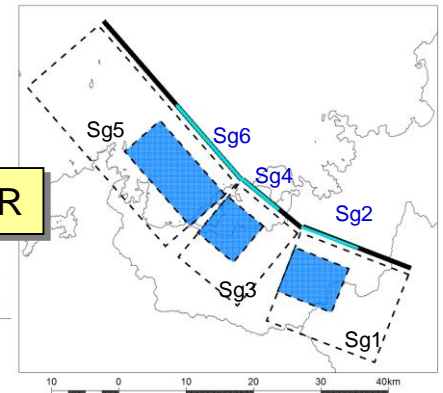


- : 地表面断層位置(背景領域)
 - : 地表面断層位置(大すべり領域)
 - - - : 断層面(背景領域)
 - : 断層面(大すべり領域)
- ※断層面は傾斜角0°として図化

大すべり隣接LRR



大すべり隣接LLR

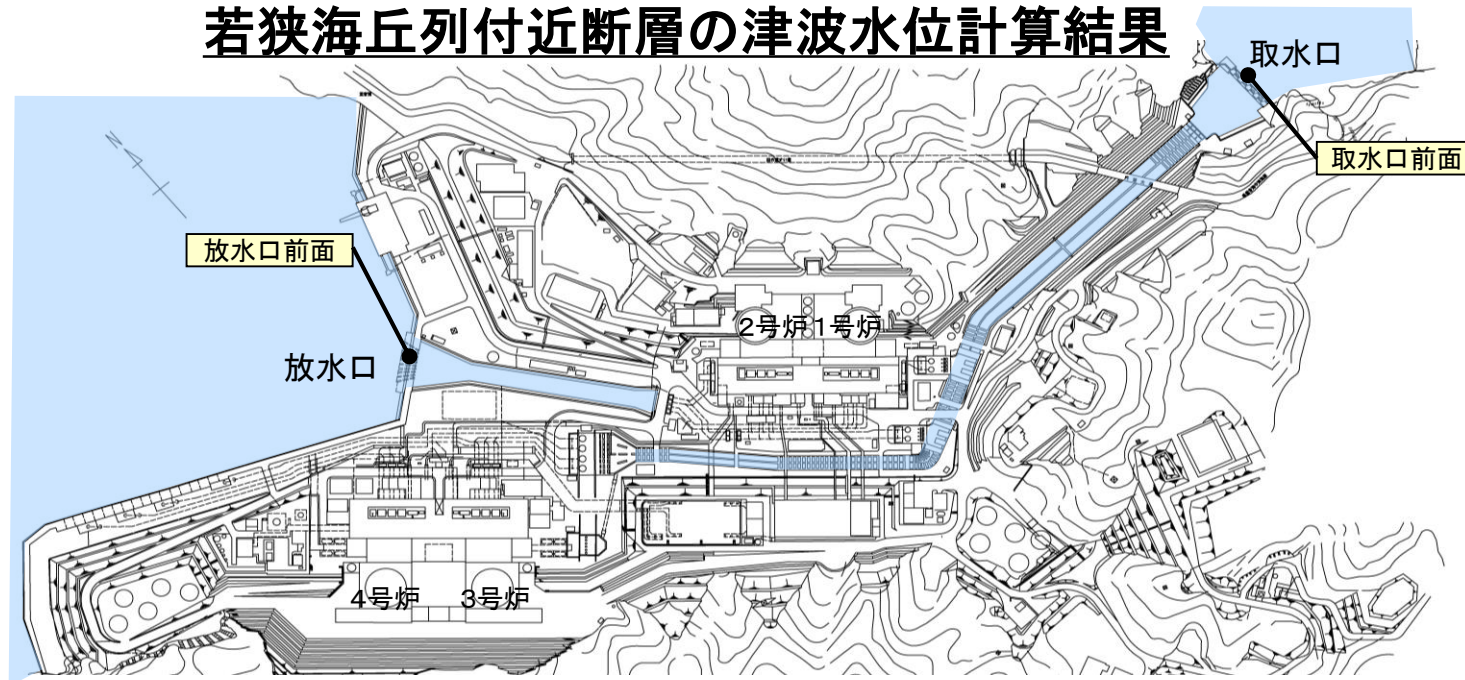


関西電力モデル

検討会モデル

3-3-2. 概略計算モデルを用いた検討

3-3-2. 概略計算モデルを用いた検討 若狭海丘列付近断層の津波水位計算結果



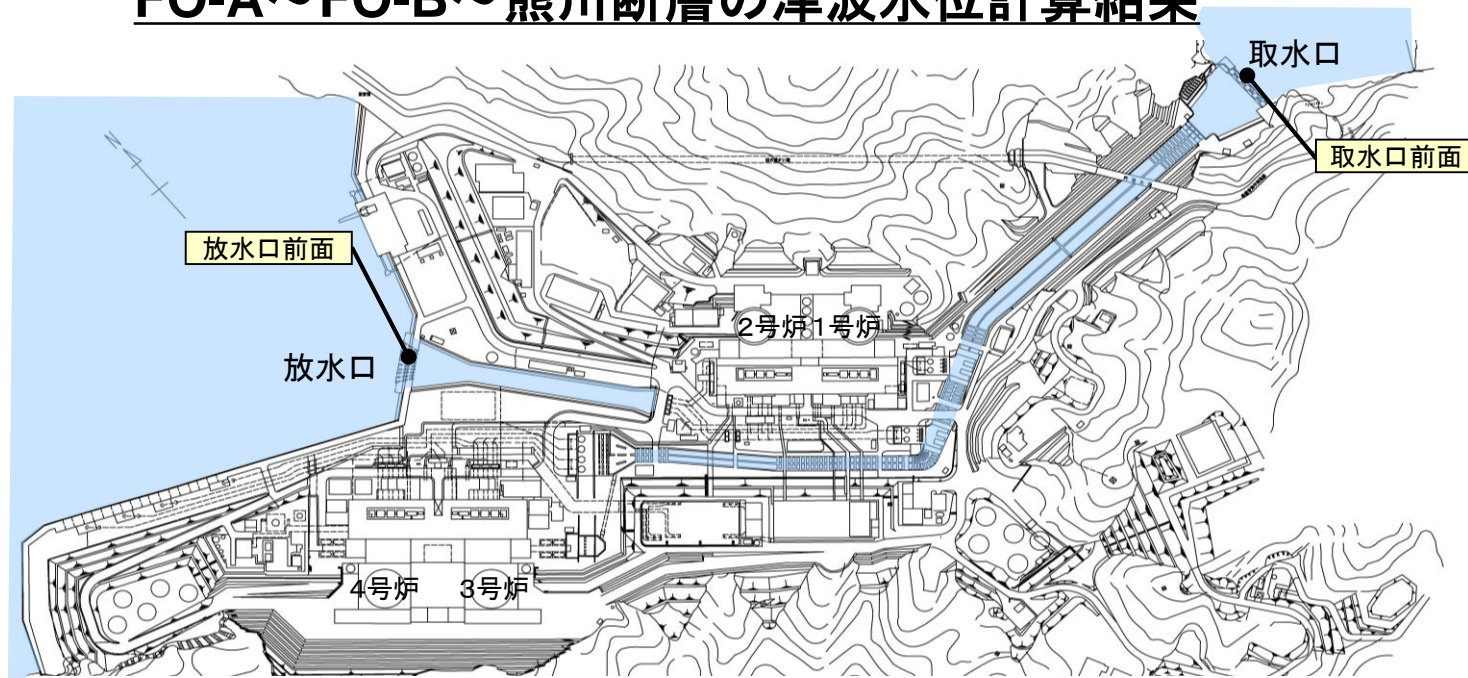
数字は、T.P.(m)

波源	モデル		水位上昇		水位下降	備考
			取水口前面	放水口前面	取水口前面	
若狭海丘列 付近断層	福井県モデル	一様すべり	3.4	<u>4.0</u>	-3.5	
	検討会モデル	大すべり中央	<u>3.5</u>	2.1	-2.3	詳細計算へ
		大すべり左側	3.3	1.8	-2.1	
		大すべり右側	3.3	2.0	-2.2	
		大すべり隣接LRR	<u>3.5</u>	1.9	-2.2	詳細計算へ
		大すべり隣接LLR	<u>3.6</u>	1.9	-2.1	詳細計算へ

検討会モデルを用いて概略計算を行った結果、水位上昇側において、これまでの一様モデルによる計算結果と同程度もしくはそれ以上の津波水位となった波源を3ケース確認したため、詳細計算を実施する。

3-3-2. 概略計算モデルを用いた検討

FO-A~FO-B~熊川断層の津波水位計算結果



数字は、T.P.(m)

波源	モデル		水位上昇		水位下降	備考 (取水口前面における地盤変動量)
			取水口前面	放水口前面	取水口前面	
FO-A~ FO-B~ 熊川断層	関西電力モデル	一様すべり	1.7	2.7	-2.7	(0.25m隆起)
	検討会モデル	大すべり中央	1.2	2.1	-1.1	(0.06m隆起)
		大すべり左側	1.1	1.8	-0.8	(0.11m隆起)
		大すべり右側	1.4	1.7	-1.1	(0.03m隆起)
		大すべり隣接LRR	1.4	1.7	-1.1	(0.03m隆起)
		大すべり隣接LLR	1.4	1.7	-1.1	(0.03m隆起)

検討会波源モデルを用いて概略計算を行った結果、いずれの波源においても、これまでの一様モデルによる計算結果より小さい値であることを確認した。

概略計算結果のまとめ

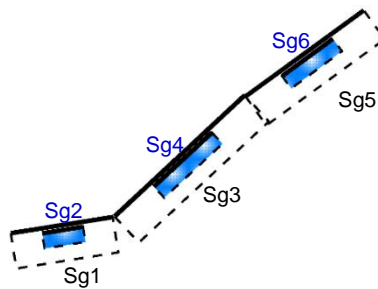
○若狭海丘列付近断層(F-49)については、検討会モデルを用いて概略計算を行った結果、水位上昇側において、これまでの一様モデルによる計算結果と同程度もしくはそれ以上の津波水位となった波源を3ケース確認したため、詳細計算を実施する。

○FO-A～FO-B～熊川断層(F-53)については、検討会波源モデルを用いて概略計算を行った結果、いずれの波源においても、これまでの一様モデルによる計算結果より小さい値であることを確認した。

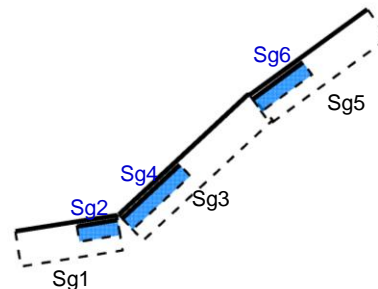


以上より、検討会が設定した若狭海丘列付近断層の以下3波源については、詳細計算を実施する(水位上昇側)。

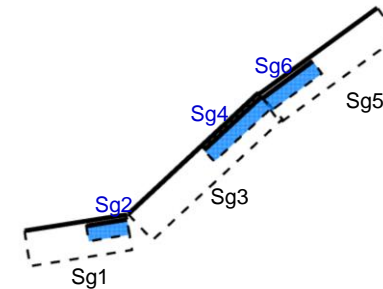
大すべり中央



大すべり隣接LRR



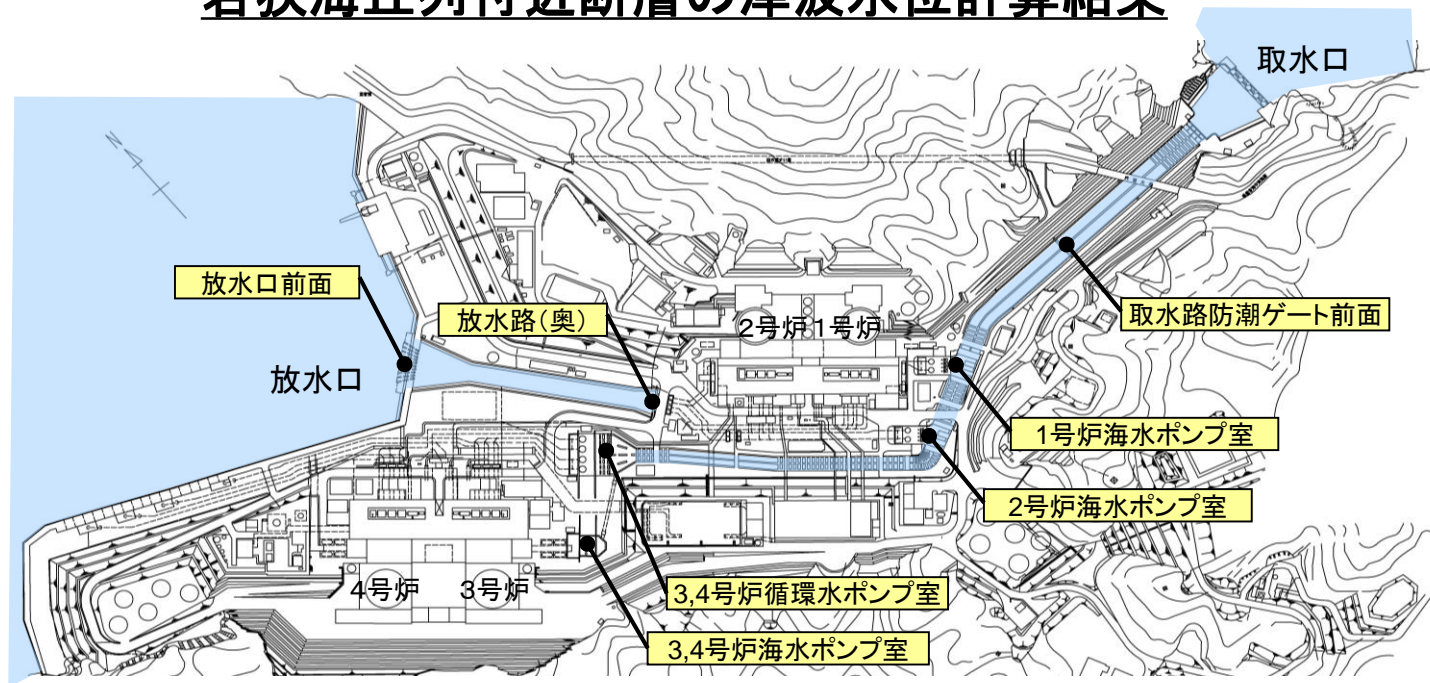
大すべり隣接LLR



—: 断層面上端
- - -: 断層面
※地表に投影

3-3-3. 詳細計算モデルを用いた検討

3-3-3. 詳細計算モデルを用いた検討 若狭海丘列付近断層の津波水位計算結果



数字は、T.P.(m)

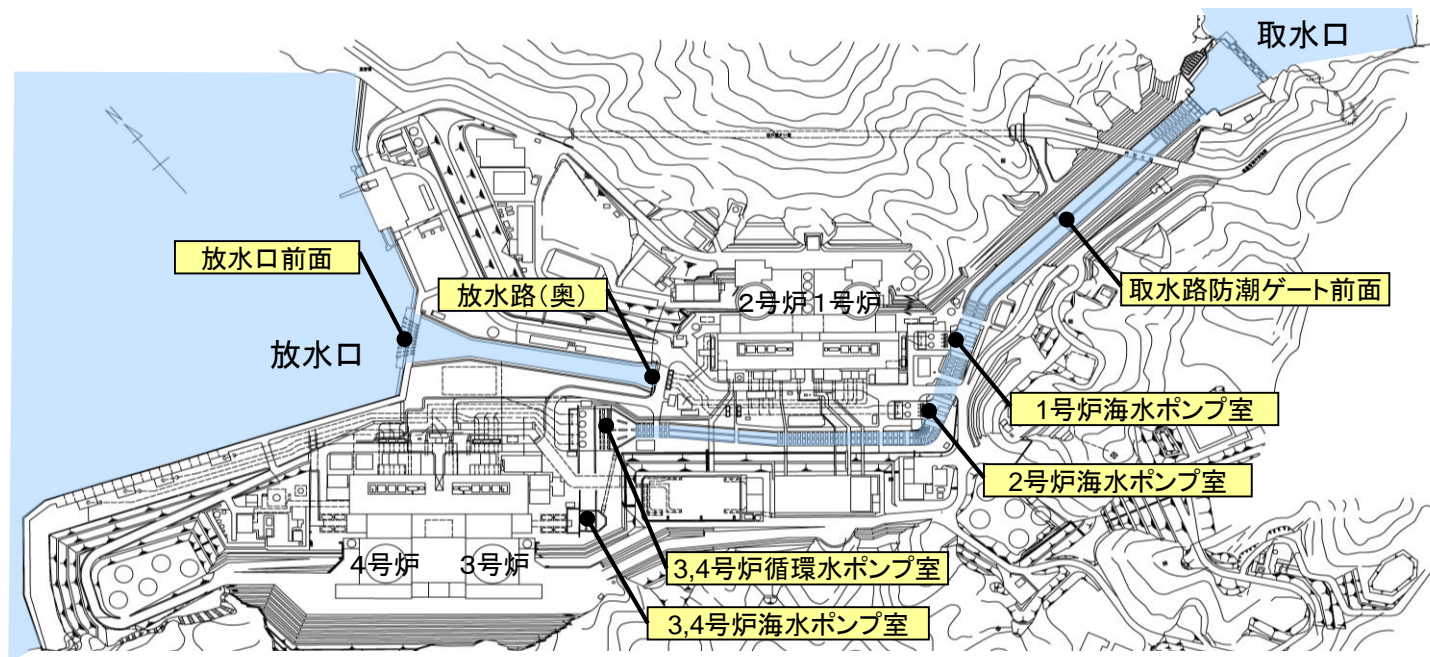
波源モデル	取水路 防潮 ゲート	※1 水位上昇							
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	
福井県モデル	一様モデル	閉	4.5	1.1	1.1	1.1	1.4	3.6	3.8
検討会モデル	大すべり中央	閉	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	2.1	2.1
	大すべり隣接LRR	閉	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	1.9
	大すべり隣接LLR	閉	3.7	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	2.0

※1 閉: 取水路防潮ゲート天端T.P.+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(T.P.±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

検討会波源モデルを用いて詳細計算を行った結果、いずれの波源においても、これまでの一様モデルによる計算結果よりも小さい値であることを確認した。

3. 地震に起因する津波(行政機関の波源モデル)

行政機関の波源モデルによる津波水位の評価結果



数字は、T.P.(m)

波源モデル (行政機関の想定)	※1 取水路 防潮ゲート	水位上昇							水位下降			
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	
福井県モデル(若狭海丘列付近断層)	閉	4.5	1.1	1.1	1.1	1.4	3.6	3.8	-0.8	-0.8	-1.0	
秋田県モデル(日本海東縁部付近の断層)	閉	4.4	1.7	1.7	1.7	1.7	2.9	3.0	-1.4	-1.4	-1.6	
検討会モデル (若狭海丘列付近断層)	大すべり中央	閉	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	2.1	2.1	-	-	-
	大すべり隣接LRR	閉	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	1.9	-	-	-
	大すべり隣接LLR	閉	3.7	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	2.0	-	-	-

※1 閉: 取水路防潮ゲート天端T.P.+8.5mで全閉、開: 両系列のゲートが開いた状態(T.P.±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

詳細計算モデルによる検討を行った、上記の行政機関の波源モデルについて、基準津波の選定に考慮する。

4. 地震以外に起因する津波

4-1. 海底地すべりに起因する津波評価

海底地すべりの評価フロー

以下のフローに従い、若狭湾周辺海域の海底地すべりについて調査を実施し、津波水位の検討を行った。

①文献調査

・文献の整理・検討を行い、海底地すべりの分布を確認。

②地すべり地形の確認

- ・M7000シリーズ※等を用いて海底地形図を作成し、海底地すべりの可能性のある地形を判読。
- ・音波探査記録を用いて、池原他(1990)を参考に層相の区分・追記及び海底地すべりの有無を確認。

※(一財)日本水路協会発行の海底地形デジタルデータ

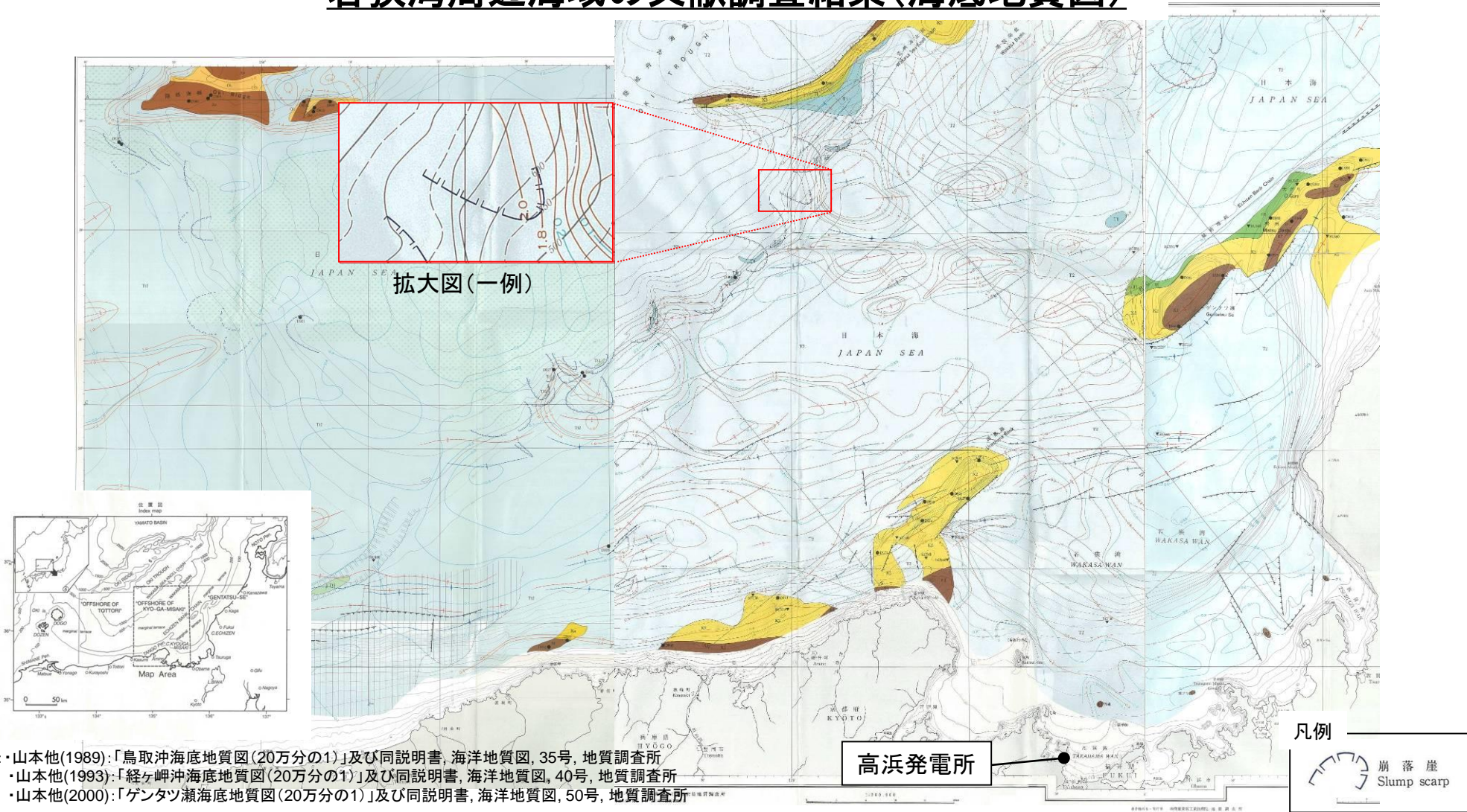
③規模評価

- ・抽出された海底地すべりについて、位置及び向きよりエリア区分を実施し、断面積等による概略評価を実施。
- ・各エリアで最大規模となった地すべりに対し、当該海域の音波探査記録の再解析により崩壊部・堆積部を判読し、詳細な地形変化を算出。

④モデル計算

- ・複数の手法により初期水位波形を算出し、それぞれの手法で津波水位計算を実施。

4-1. 海底地すべりに起因する津波評価 若狭湾周辺海域の文献調査結果(海底地質図)



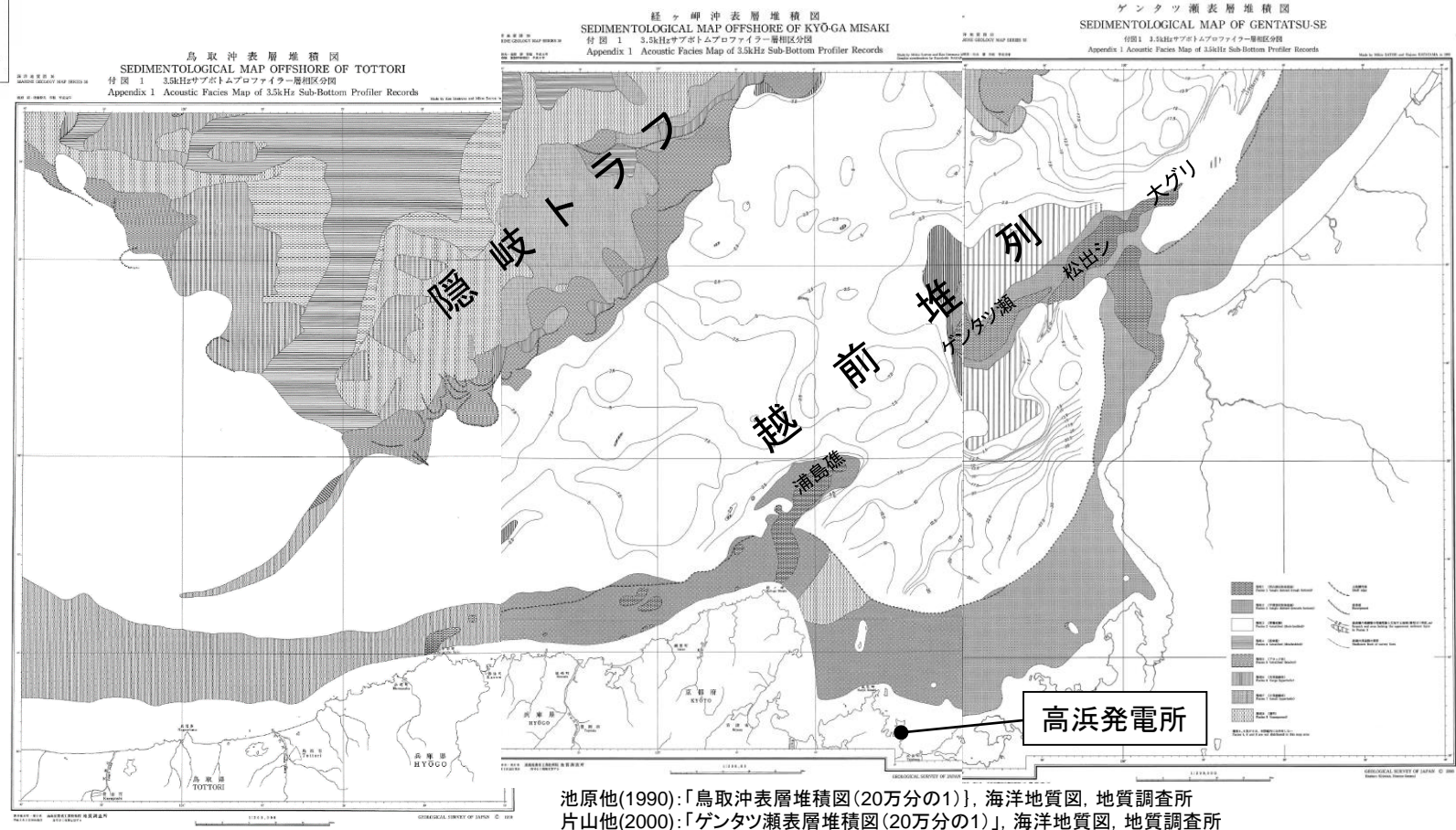
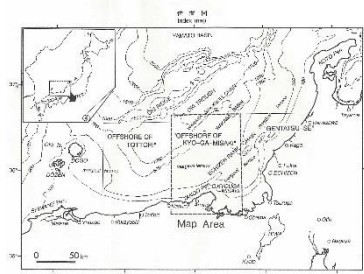
- ※ : ・山本他(1989):「鳥取沖海底地質図(20万分の1)」及び同説明書, 海洋地質図, 35号, 地質調査所
- ・山本他(1993):「経ヶ岬沖海底地質図(20万分の1)」及び同説明書, 海洋地質図, 40号, 地質調査所
- ・山本他(2000):「ゲンタツ瀬海底地質図(20万分の1)」及び同説明書, 海洋地質図, 50号, 地質調査所

○旧地質調査所(現(独)産業技術総合研究所・地質調査総合センター)が作成した海底地質図※では、隠岐トラフ付近に広範囲に海底地すべり跡と考えられる地形(崩落崖)が示されている。

○その他の海域には、海底地すべりを示唆するような崩落崖等は図示されていない。

4-1. 海底地すべりに起因する津波評価 若狭湾周辺海域の文献調査結果(表層堆積図)

※凡例は次ページに掲載

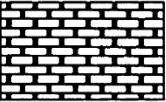


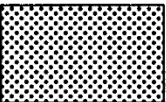
池原他(1990):「鳥取沖表層堆積図(20万分の1)」, 海洋地質図, 地質調査所
 片山他(2000):「ゲンタツ瀬表層堆積図(20万分の1)」, 海洋地質図, 地質調査所
 佐藤他(1993):「経ヶ岬沖表層堆積図(20万分の1)」, 海洋地質図, 地質調査所

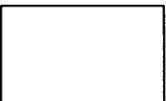
- 表層堆積図によると、隠岐トラフ周辺には海底地すべりを示唆する層相(層相5, 6及び7)が図示されている。
- その他の海域には、海底地すべりを示唆する層相は図示されていない。

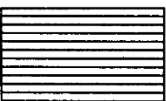
層相区分の考え方

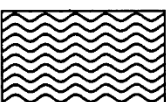
【層相の凡例】


- 


層相 1 (凹凸強反射海底面)
Facies 1 <single distinct (rough bottom)>
- 


層相 2 (平滑強反射海底面)
Facies 2 <single distinct (smooth bottom)>
- 

層相 3 (厚層成層)
Facies 3 <stratified (thick-bedded)>
- 

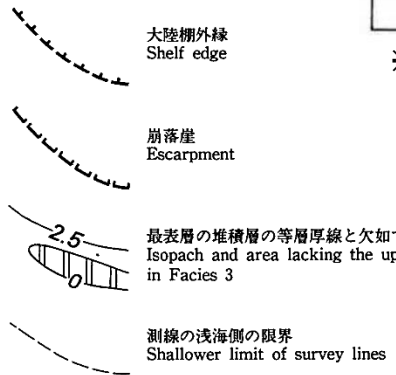
層相 4 (密成層)
Facies 4 <stratified (thin-bedded)>
- 

層相 5 (ブロック状)
Facies 5 <stratified (blocky)>
- 

層相 6 (大双曲線状)
Facies 6 <large hyperbolic>
- 

層相 7 (小双曲線状)
Facies 7 <small hyperbolic>
- 

層相 8 (透明)
Facies 8 <transparent>



【層相の区分詳細および特徴】

(池原他(1990)*から抜粋)

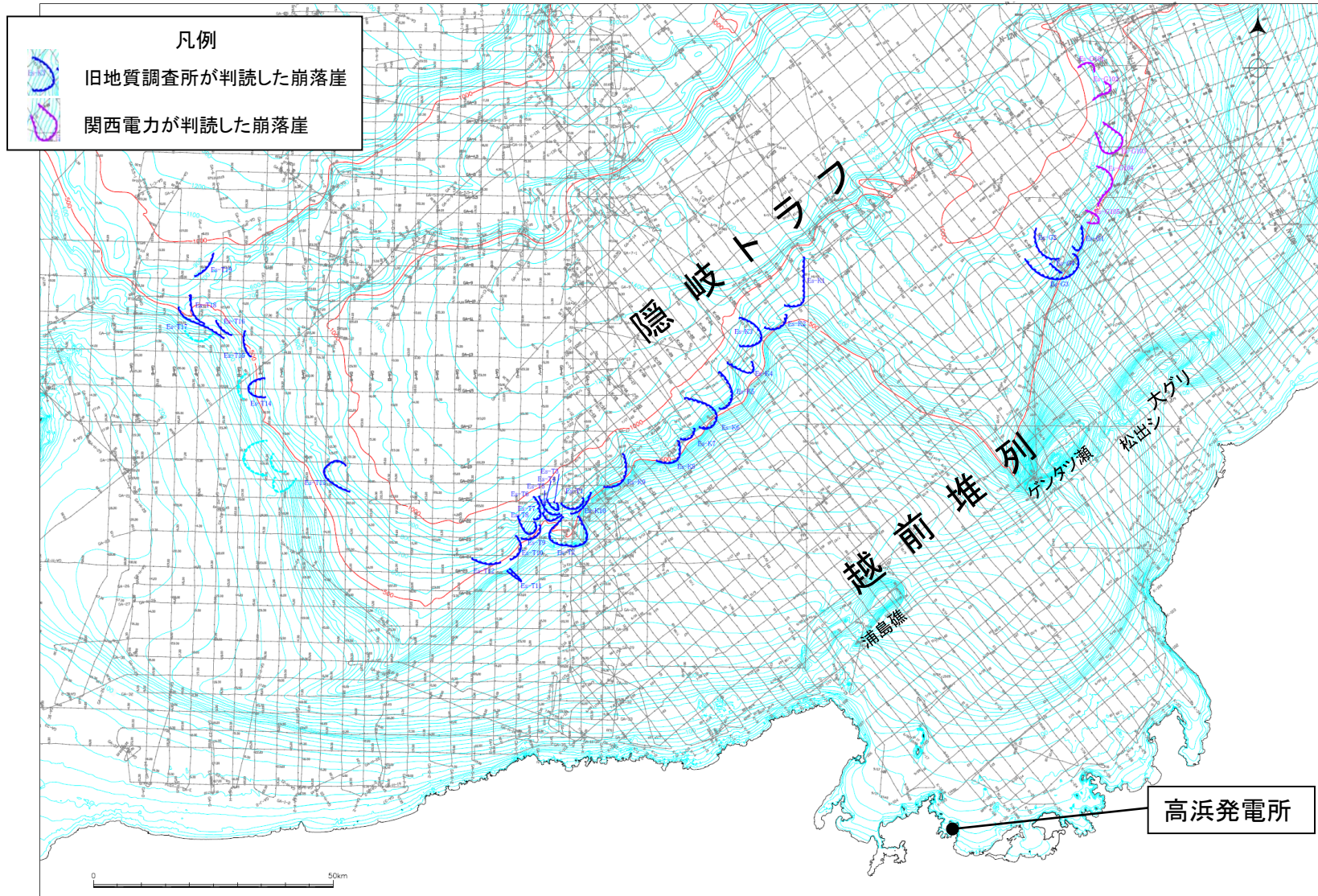
Table 1. Classification and characteristics of eight acoustic facies.
* See text for description.

FACIES	ACOUSTIC CHARACTERS (combination of sea floor and internal reflector pattern*)	SEDIMENTS	INTERPRETATION	DISTRIBUTION
1 DISTINCT -single & rough	Strong bottom return, no or very poor internal return, rough bottom. (A&III)	Gravelly, rocky	Gravelly or rocky bottom	Oki Ridge N of Dogo
2 DISTINCT -single & smooth	Strong bottom return, no or very poor internal return, smooth bottom. (B&III)	Sandy	Sandy bottom	Oki Ridge Wakasa Sea Knoll Chain
3 STRATIFIED -thick-bedded	Internal reflectors continuous and undeformed, stratified, smooth bottom. (B&I)	Muddy (clayey silt- silty clay) massive	Muddy bottom -hemipelagic	Marginal terrace
4 STRATIFIED -thin-bedded	Internal reflectors continuous and undeformed, finely stratified, smooth bottom. (B&I)	Muddy tephra and/or sand layers interbedded	Muddy bottom -hemipelagic, (turbidite)	Central part of SW Trough most of NE Trough
5 STRATIFIED -blocky	Internal reflectors essentially continuous and undeformed, stratified, basal shear surface reflectors, smooth bottom, stepped topography. (B&I)	Muddy massive	Muddy bottom -slide, (hemipelagic)	Edge of marginal terrace
6 HYPERBOLIC -large	Sea floor reflectors largely hyperbolic or irregular and prolonged, internal reflectors poorly observed. (D&III)	Muddy massive	Muddy bottom -slump	Lower part of slope
7 HYPERBOLIC -small	Sea floor and/or internal reflectors hyperbolic or irregular and prolonged, mounded or lens-shaped, blunt distal termination. (C&I,II)	Muddy occurrence of mud clasts	Muddy bottom -debris flow	SW Trough
8 TRANSPARENT	No or very poor internal reflectors, lens or mounded-shaped or layered. (B&II)	Muddy occurrence of mud clasts massive	Muddy bottom -debris flow, hemipelagic	SW Trough

※: 池原研・佐藤幹夫・山本博文(1990): 高分解能音波探査記録からみた隠岐トラフの堆積作用, 地質学雑誌, 96巻, pp.37-49.

層相 4, 6 及び 8 は, 本図幅内には分布しない
Facies 4, 6 and 8 are not distributed in this map area

4-1. 海底地すべりに起因する津波評価 若狭湾周辺海域における海底地形



若狭湾周辺海域では、隠岐トラフ周辺に多数の海底地すべり地形が認められるものの、それ以外の海域には海底地すべりが疑われる地形は認められなかった。

海底地形の判読

- M7000シリーズ等を用いて海底地形図を作成し、海底地すべりの可能性のある地形を判読した。
- 海底地形図の判読にあたっては、以下の基準等に従って海底地すべりの可能性のある地形を抽出した。

○海底地形判読における地すべり抽出の判断基準・留意点

ポイント	典型的特徴
全体	<ul style="list-style-type: none"> ・地すべり地形としては滑落崖とその基部にある地すべり土塊（滑落土塊）が対をなす。陸上の地すべりに比べて、大規模、薄く広がる傾向がある。薄く広がるケースでは土塊は認定しにくいので滑落崖だけを認定する。
崩壊部 （滑落崖）	<ul style="list-style-type: none"> ・馬蹄形、半円形、コの字形の平面形で、斜面下方へ開く急斜面。 ・急斜面は平面的に出入りがなくスムーズな形状で、傾斜も一定傾向。また、地すべり土塊を囲んで側方にも連続することがある。 ・下方に地すべり土塊が対をなして存在することが重要。
堆積部 （地すべり土塊）	<ul style="list-style-type: none"> ・滑落崖の基部にある扇状地状あるいは舌状の高まり。 ・細長い舌状の場合や台地状を呈することもある。 ・典型的な場合には、土塊の表面に不規則な凸凹、低崖、凹地があり、凸形縦断の斜面形を示す。

4-1. 海底地すべりに起因する津波評価 海上音波探査記録による地すべり地形の判読

海底地すべりの判読にあたっては、山本(1991)^{※1}による手法に準じて、海上音波探査記録(3.5kHzサブボトムプロファイラー: SBP)の再解析を実施し、池原他(1990)^{※2}による層相の特徴等から、海底地すべり地形として崩壊部や堆積部を判読する。

【層相の凡例】 (池原他(1990)から抜粋)

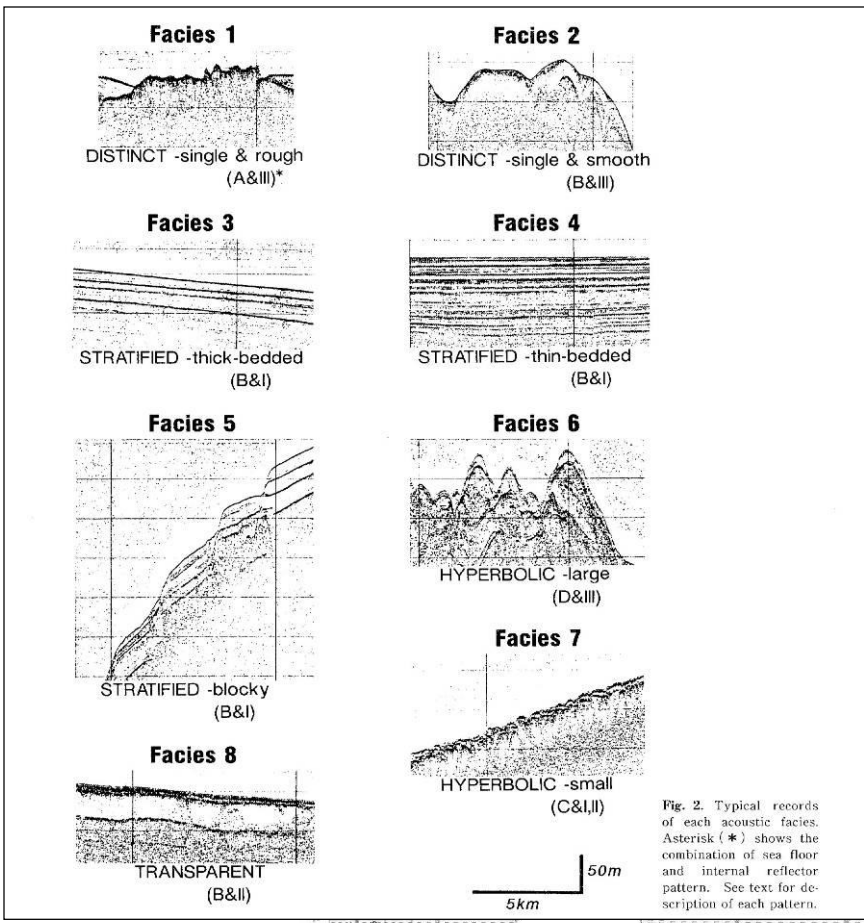
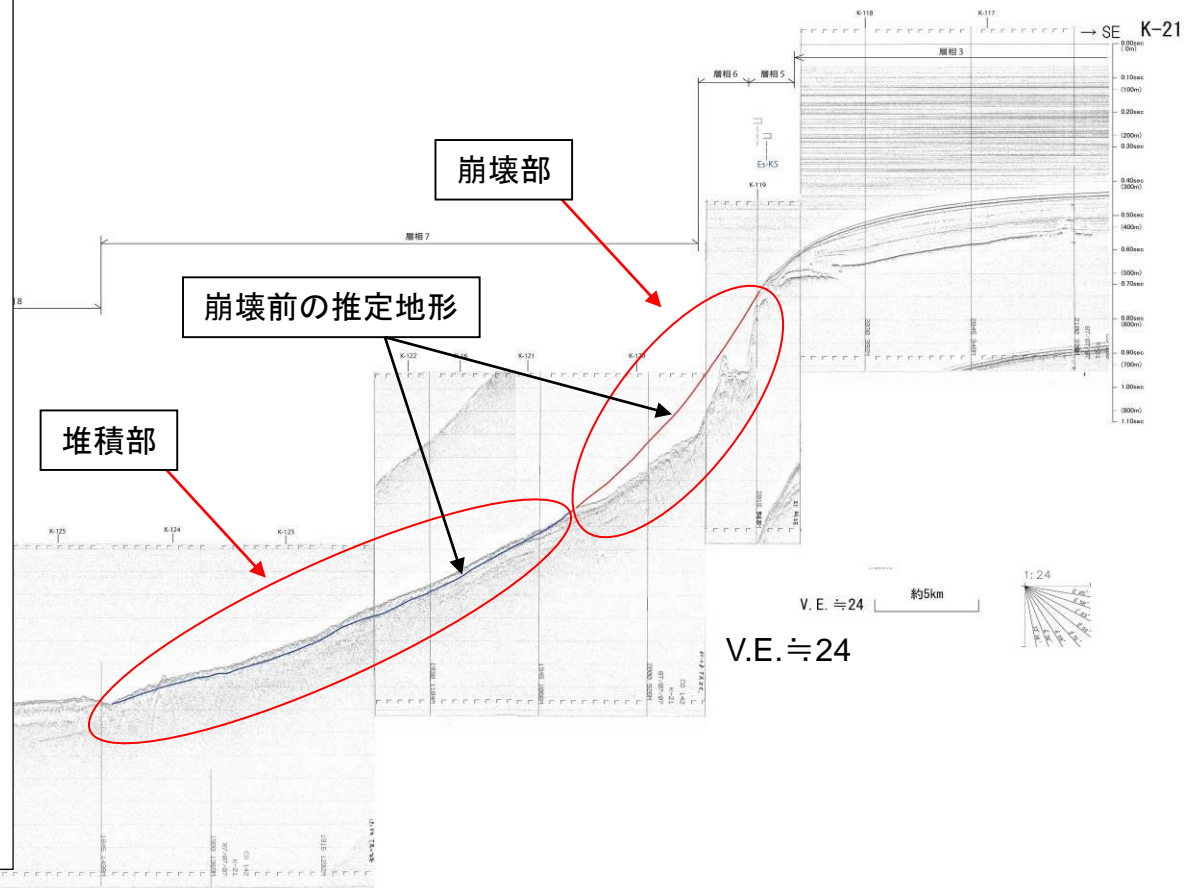


Fig. 2. Typical records of each acoustic facies. Asterisk (*) shows the combination of sea floor pattern and internal reflector pattern. See text for description of each pattern.

【SBPの再解析結果から海底地すべり地形の判読例】



※1: 山本博文(1991):「福井沖大陸斜面の海底地すべり」, 地質調査所月報, 第42巻第5号, pp.221-232.
 ※2: 池原研・佐藤幹夫・山本博文(1990): 高分解能音波探査記録からみた隠岐トラフの堆積作用, 地質学雑誌, 96巻, pp.37-49.

4-1. 海底地すべりに起因する津波評価

層相区分図の作成及び地すべり地形の抽出

(旧地質調査所の海底地質図および表層堆積図に基づき作成)

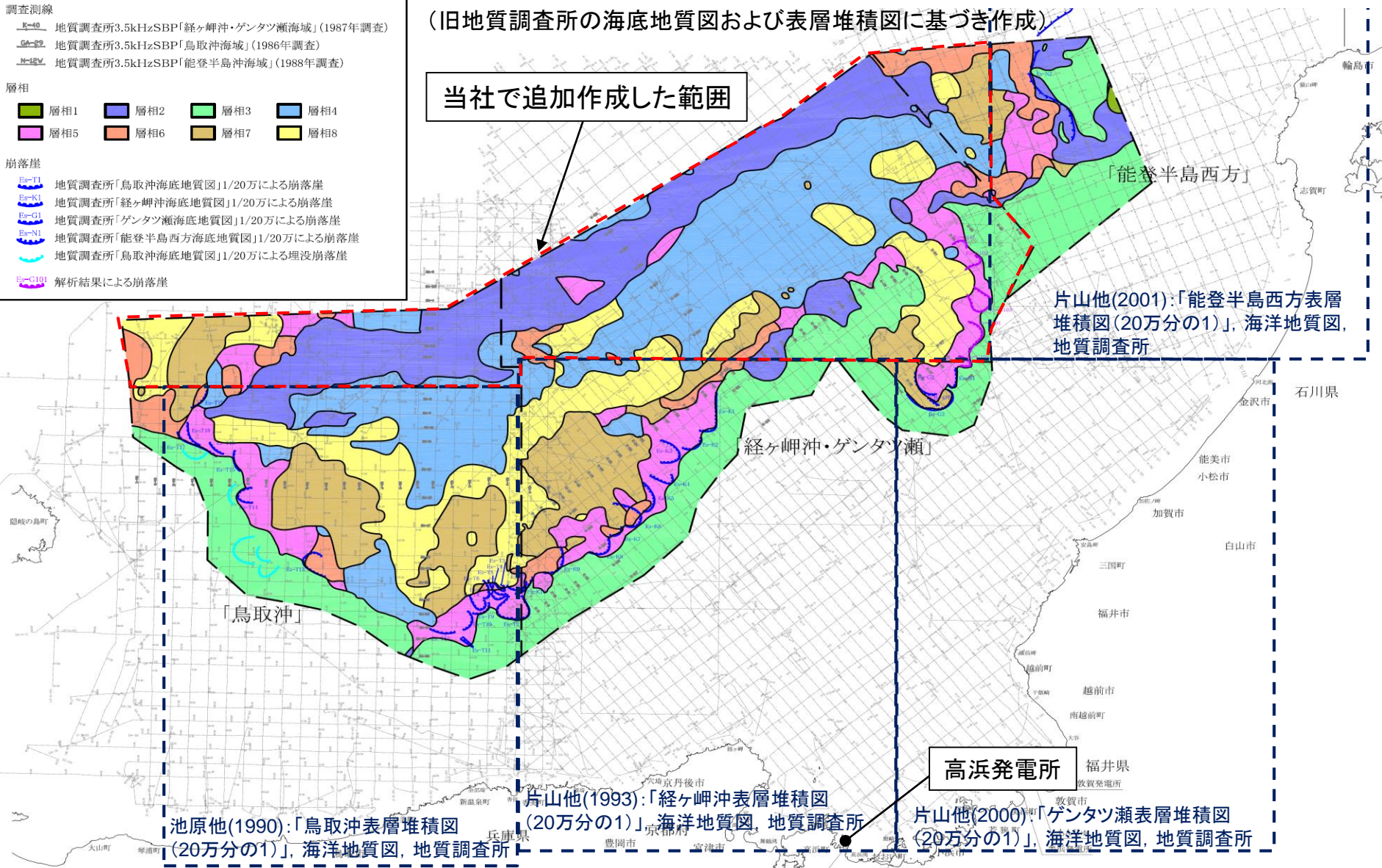
凡 例

- 調査測線
 E-40 地質調査所3.5kHzSBP「経ヶ岬沖・ゲンタツ瀬海域」(1987年調査)
 G-22 地質調査所3.5kHzSBP「鳥取沖海域」(1986年調査)
 H-124 地質調査所3.5kHzSBP「能登半島沖海域」(1988年調査)

- 層相
 層相1 層相2 層相3 層相4
 層相5 層相6 層相7 層相8

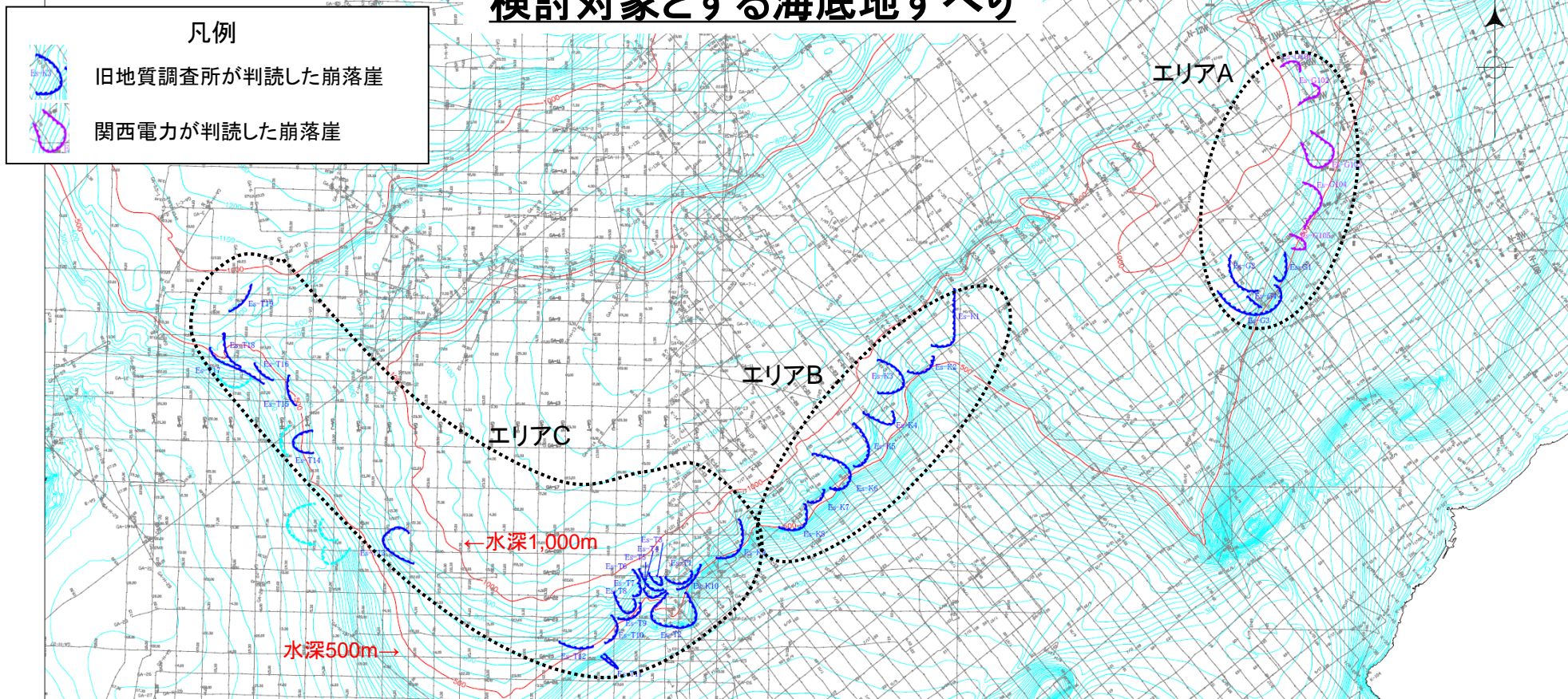
- 崩落崖
 Es-N1 地質調査所「鳥取沖海底地質図」1/20万による崩落崖
 Es-K1 地質調査所「経ヶ岬沖海底地質図」1/20万による崩落崖
 Es-G1 地質調査所「ゲンタツ瀬海底地質図」1/20万による崩落崖
 Es-N1 地質調査所「能登半島西方海底地質図」1/20万による崩落崖
 Es-N1 地質調査所「鳥取沖海底地質図」1/20万による埋没崩落崖
 Es-G101 解析結果による崩落崖

当社で追加作成した範囲



○敷地周辺海域において、旧地質調査所が作成した海底地質図の崩落崖跡と表層堆積図の層相区分図を元に、海底地すべり地形の抽出を実施した。
 ○地すべり地形の抽出にあたり、地質調査所の表層部音波探査記録の再解析を実施し、図面間の整合性の確認や足りない部分の追記を行い、上記の図面を作成した。

検討対象とする海底地すべり



○海底地すべりの評価フローに従って、若狭湾周辺海域について地すべり地形の有無を詳細に確認した結果、隠岐トラフの南東側及び南西側の水深約500m～1,000m付近の大陸斜面に馬蹄形をした38の海底地すべり跡を抽出した。さらに、これらの海底地すべりについて、位置及び向きより、大きく3つのエリアに分けた。

○ゲンタツ瀬北方の海底地すべりに関する文献(山本(1991)※)によると、「この海底地すべりは2度の斜面崩壊により形成された。また崩壊時期は最終氷期の海面低下時であり、崩壊の原因としては背斜による傾斜角の増大と堆積物の斜面域への供給増加が考えられる。」とされている。

○現在の環境を踏まえると、この地域で将来発生する海底地すべりの想定は困難であることから、上記の海底地すべり跡のうち、最大規模を考慮することとした。

※：山本博文(1991)：「福井沖大陸斜面の海底地すべり」, 地質調査所月報, 第42巻第5号, pp.221-232.

4-1-1. 海底地すべりの規模の評価

4-1-1. 海底地すべりの規模の評価

海底地すべりの規模の評価(概要)

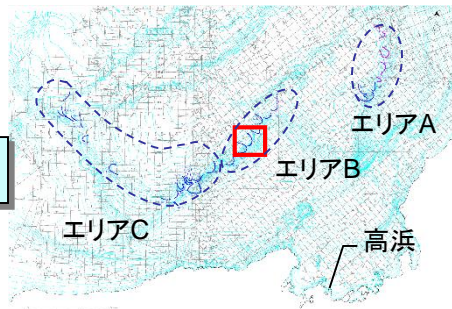
【断面積による海底地すべりの規模評価】

〔検討方法〕

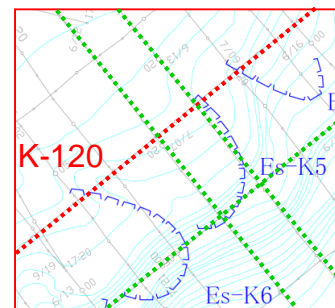
津波水位評価においては、鉛直方向の水位変動による影響が大きいと考え、海底地すべりを横断する海上音波探査記録より、崩壊部の鉛直断面積(概算)を算出し、各エリアごとに最も断面積が大きい海底地すべりを抽出。

〔評価指標①〕

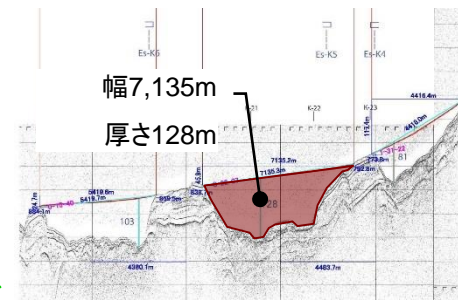
崩壊部の鉛直断面積(概算) = 幅 × 厚さ



全体平面図



地すべり一例 (Es-k5)



測線一例 (K-120)



断面積による規模評価の妥当性の確認

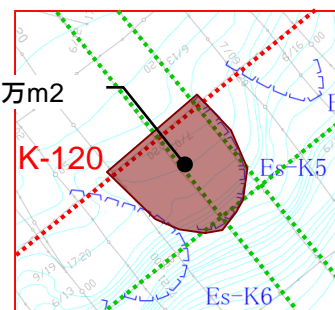
【体積による海底地すべりの規模評価】

〔検討方法〕

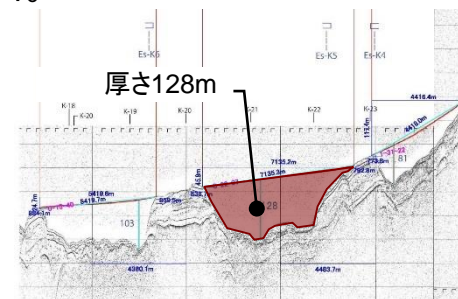
旧地質調査所等の海底地質図に示されている崩落崖から投影面積を算出し、厚さについては海上音波探査記録より最大の厚さを設定し、崩壊部の体積(概算)を算出し、各エリアごとに最も体積の大きい海底地すべりを抽出。

〔評価指標②〕

崩壊部の体積(概算) = 投影面積 × 最大厚さ



地すべり一例 (Es-k5)



測線一例 (K-120)

4-1-1. 海底地すべりの規模の評価 断面積による海底地すべりの規模評価

〔検討方法〕

津波水位評価においては、鉛直方向の水位変動による影響が大きいと考え、海底地すべりを横断する海上音波探査記録より、崩壊部の鉛直断面積(概算)を算出し、各エリアごとに最も断面積が大きい海底地すべりを抽出。

〔崩壊部の海底地形の復元〕

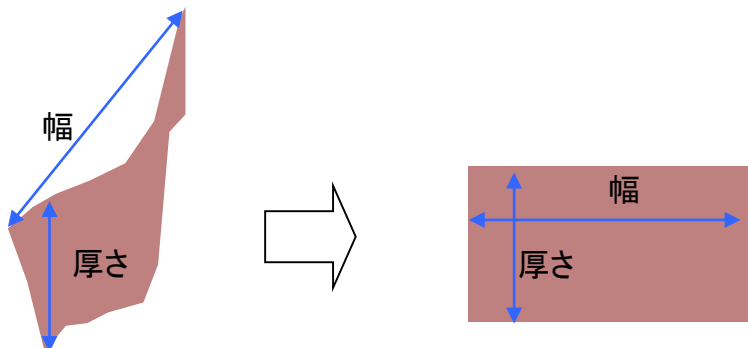
海上音波探査記録より、以下のとおり、崩壊部の海底地形を復元する。

- ①復元に当たっては、崩壊部両端の現地形を延長し、滑らかに接続する。
- ②厚さについては、鉛直断面において最も厚い箇所を図読する。
- ③幅については、崩壊部両端を直線でつないだ長さとする。

〔崩壊部の面積〕

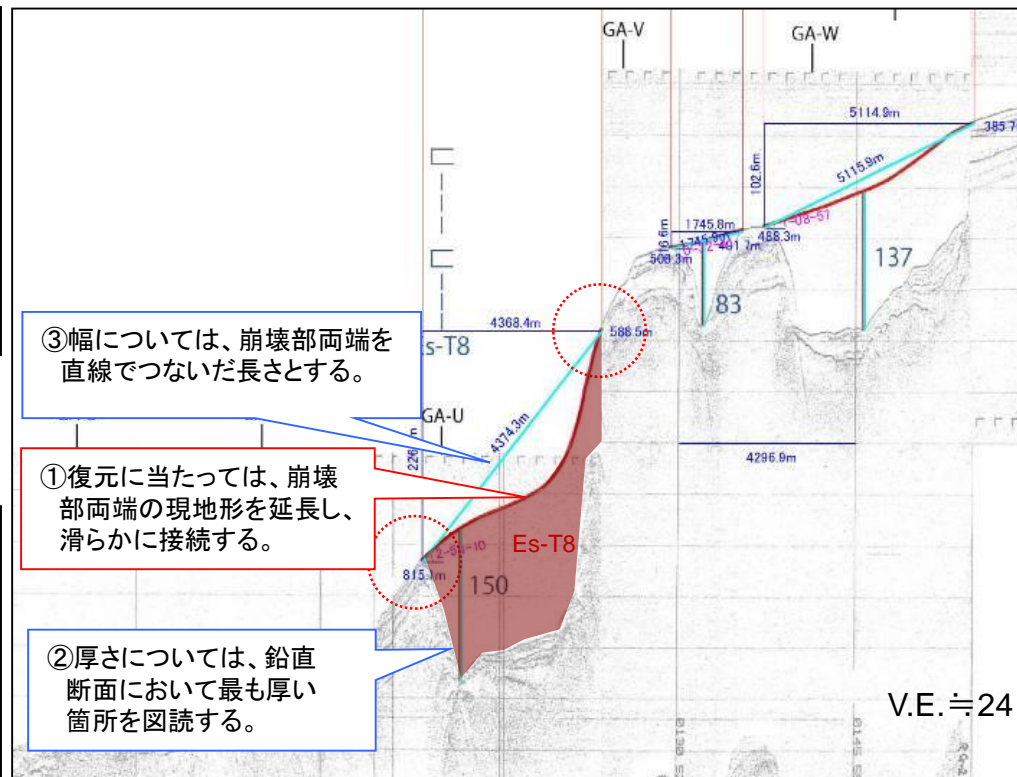
崩壊部の鉛直断面積(概算) = 幅 × 厚さ

※) 複数測線ある場合は、最も面積が大きいものを採用する。



復元した崩壊部の鉛直断面積

評価時の鉛直断面積(概算)



Es-T8(GA-22測線)

4-1-1. 海底地すべりの規模の評価

断面積による海底地すべりの規模の検討結果(1/2)

○海底地すべり地形について、音波探査記録を基に規模を算出した結果を以下に示す。
○海底地すべり地形を横断する測線が複数ある場合には、より規模が大きくなる方の値(赤字)を用いた。

地すべり地形	エリア	測線	地すべり長さ(m)	地すべり厚さ(m)	地すべり長さ×厚さ(m ²)
Es-G1	A	K-48	3,079	23	70,808
Es-G2	A	K-46	1,079	14	15,111
		K-46	1,846	33	60,902
		K-116	1,034	30	31,020
Es-G3	A	K-46	2,043	26	53,122
		K-47	3,323	26	86,394
		K-115	6,856	29	198,822
		K-116	2,773	8	22,183
Es-G4	A	K-47	3,323	26	86,394
		K-115	2,247	26	58,416
Es-G101	A	K-115	2,379	26	61,862
		K-120	1,473	23	33,887
Es-G102	A	K-56	1,882	22	41,401
		K-119	4,413	36	158,864
Es-G103	A	K-54	1,829	11	20,115
		K-118	6,172	30	185,161
Es-G104	A	K-51	3,584	46	164,876
		K-52	4,039	31	125,218
		K-116	1,274	8	10,191
		K-117	4,993	18	89,877
Es-G105	A	K-50	2,893	25	72,315
		K-116	2,758	32	88,253

地すべり地形	エリア	測線	地すべり長さ(m)	地すべり厚さ(m)	地すべり長さ×厚さ(m ²)
Es-K1	B	K-29	1,470	32	47,049
		K-30	1,650	77	127,074
		K-31	1,455	34	49,475
		K-32	1,064	16	17,018
		K-121	5,198	52	270,276
Es-K2	B	K-27	2,972	48	142,669
		K-28	1,890	52	98,300
		K-120	4,462	67	298,932
Es-K3	B	K-25	1,218	26	31,681
		K-26	6,534	51	333,230
		K-120	1,850	36	66,613
Es-K4	B	K-121	7,596	45	341,839
		K-23	4,467	35	156,335
		K-24	6,185	29	179,352
Es-K5	B	K-120	4,418	81	357,855
		K-21	1,323	121	160,075
		K-22	3,399	22	74,785
Es-K6	B	K-119	6,557	25	163,913
		K-120	7,135	128	913,324
		K-19	890	15	13,343
		K-20	3,699	89	329,212
Es-K7	B	K-119	5,008	66	330,538
		K-120	5,420	103	558,225
		K-18	1,065	11	11,711
Es-K7	B	K-119	3,618	160	578,850

凡例 赤字 : 各測線で「地すべり長さ×厚さ」が最も大きなものを地すべりの評価面積とする。
塗りつぶし : 海底地すべり規模が上位20個に該当するもの

4-1-1. 海底地すべりの規模の評価

断面積による海底地すべりの規模の検討結果(2/2)

地すべり 地形	エリア	測線	地すべり 長さ(m)	地すべり 厚さ(m)	地すべり長さ ×厚さ(m ²)
Es-K8	B	K-15	2,336	16	37,377
		K-16	5,141	36	185,065
		K-119	6,557	76	498,312
Es-K9	B	K-11	1,155	33	38,106
		K-12	1,859	62	115,233
		GA-Y	982	21	20,620
Es-K10	B	K-8	959	69	66,168
		GA-X	744	54	40,158
Es-T1	C	K-8	2,082	49	102,018
		GA-W	1,861	84	156,298
Es-T2	C	K-119	5,805	122	708,237
		GA-22	5,116	137	700,882
		GA-23	8,592	97	833,402
		GA-W	6,206	106	657,818
		GA-X	3,791	88	333,575
Es-T3	C	GA-21	1,784	48	85,648
Es-T4	C	GA-21	1,362	107	145,702
Es-T5	C	GA-22	1,746	83	144,908
Es-T6	C	GA-21	5,343	62	331,267
Es-T7	C	GA-V	780	73	56,944
Es-T8	C	GA-22	4,374	150	656,141
Es-T9	C	GA-23	2,159	43	92,824
		GA-V	1,304	35	45,639

地すべり 地形	エリア	測線	地すべり 長さ(m)	地すべり 厚さ(m)	地すべり長さ ×厚さ(m ²)
Es-T10	C	GA-23	1,567	18	28,203
		GA-24	3,857	29	111,851
		GA-U	3,807	38	144,669
Es-T11	C	GA-25	1,737	75	130,273
		GA-U	2,184	56	122,291
Es-T12	C	GA-S	4,105	18	73,894
		GA-T	6,284	29	182,237
Es-T13	C	GA-19	2,581	109	281,308
		GA-20	4,966	116	576,038
		GA-L	2,973	140	416,259
Es-T14	C	GA-M	639	22	14,053
		GA-15	8,970	61	547,200
Es-T15	C	GA-I	5,150	79	406,864
		GA-12	5,180	49	253,844
Es-T16	C	GA-13	8,326	33	274,765
		GA-12	2,732	21	57,377
Es-T17	C	GA-G	1,587	33	52,384
		GA-11	1,979	158	312,678
		GA-12	1,028	38	39,078
Es-T18	C	GA-F	678	68	46,132
		GA-G	1,309	10	13,093
		GA-10	1,854	42	77,866
Es-T19	C	GA-11	844	138	116,467
		GA-F	405	68	27,550
Es-T19	C	GA-8	349	14	4,891
		GA-F	739	13	9,610

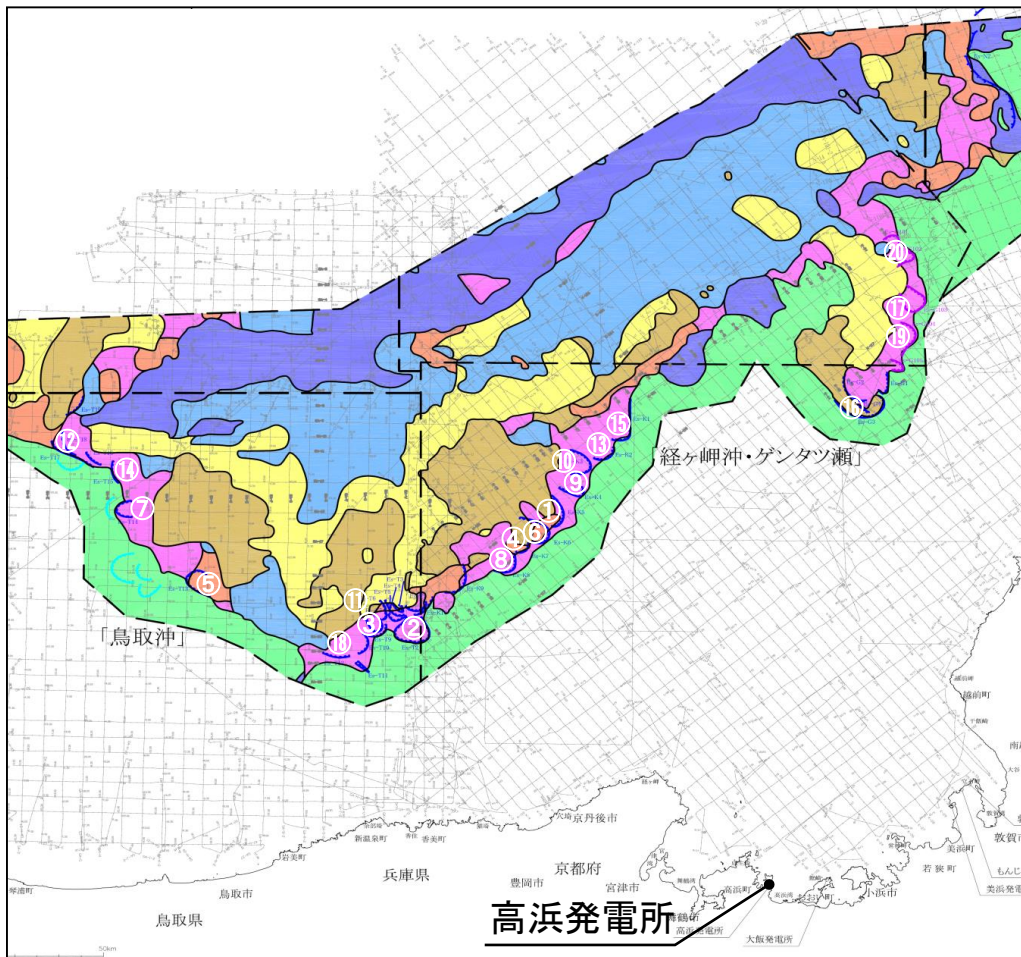
凡例 赤字 : 各測線で「地すべり長さ×厚さ」が最も大きなものを地すべりの評価面積とする。

塗りつぶし : 海底地すべり規模が上位20個に該当するもの

4-1-1. 海底地すべりの規模の評価

断面積による評価対象とする海底地すべり地形の抽出結果

【地すべり地形の位置図】



【地すべり地形の規模の算出結果】(上位20個)

規模の順位	地すべり地形	エリア	測線	地すべり長さ(m)	地すべり厚さ(m)	地すべり長さ×厚さ(m ²)
①	Es-K5	B	K-120	7135.348	128	913,324
②	Es-T2	C	GA-23	8591.775	97	833,402
③	Es-T8	C	GA-22	4374.273	150	656,141
④	Es-K7	B	K-119	3617.814	160	578,850
⑤	Es-T13	C	GA-20	4965.848	116	576,038
⑥	Es-K6	B	K-120	5419.656	103	558,225
⑦	Es-T14	C	GA-15	8970.487	61	547,200
⑧	Es-K8	B	K-119	6556.731	76	498,312
⑨	Es-K4	B	K-120	4417.960	81	357,855
⑩	Es-K3	B	K-121	7596.432	45	341,839
⑪	Es-T6	C	GA-21	5343.015	62	331,267
⑫	Es-T17	C	GA-11	1978.977	158	312,678
⑬	Es-K2	B	K-120	4461.678	67	298,932
⑭	Es-T15	C	GA-13	8326.213	33	274,765
⑮	Es-K1	B	K-121	5197.613	52	270,276
⑯	Es-G3	A	K-115	6855.938	29	198,822
⑰	Es-G103	A	K-118	6172.026	30	185,161
⑱	Es-T12	C	GA-T	6284.037	29	182,237
⑲	Es-G104	A	K-51	3584.265	46	164,876
⑳	Es-G102	A	K-119	4412.882	36	158,864

エリア毎に最大規模となる海底地すべり地形として、エリアAのEs-G3、エリアBのEs-K5、エリアCのEs-T2を抽出した。

4-1-1. 海底地すべりの規模の評価

体積による海底地すべりの規模評価

〔検討方法〕

旧地質調査所等の海底地質図に示されている崩落崖から投影面積を算出し、厚さについては海上音波探査記録より最大の厚さを設定し、崩壊部の体積(概算)を算出し、各エリア毎の最も体積の大きい海底地すべりを抽出。

- ・海底地形から崩落崖を正確に推定することは困難であったため、旧地質調査所等が示す崩落崖を用いる。

〔崩壊部の平面形状及び投影面積〕

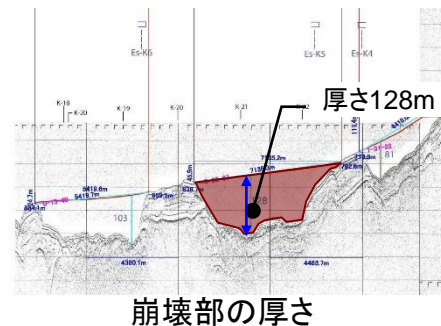
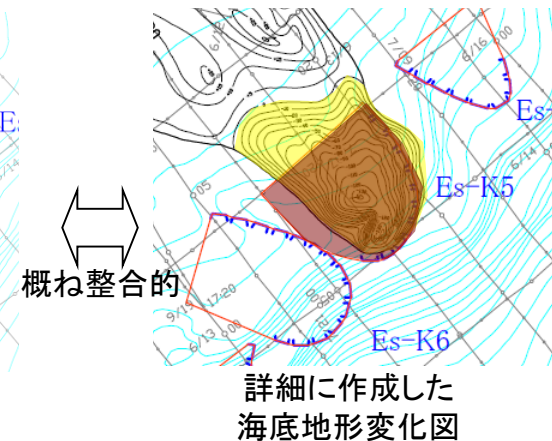
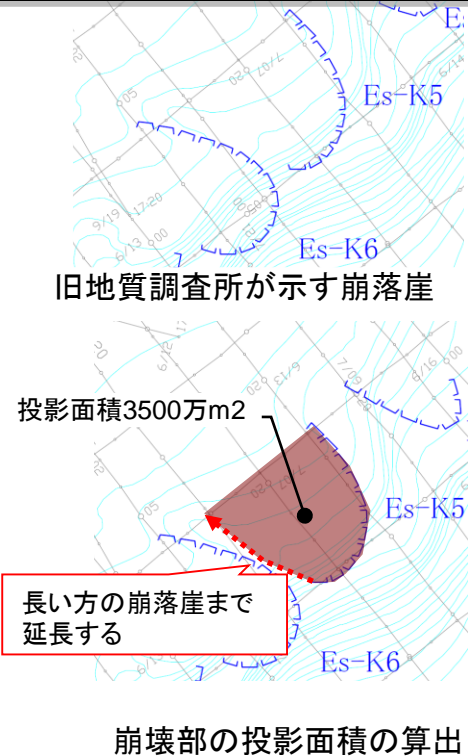
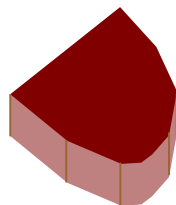
- ・崩落崖で囲まれた投影面積を算出する。
 - ・形状が非対称の場合には、端部を延長し、崩落崖の形状が概ね対称となるよう設定する。
- ※Es-K5において、詳細に作成した海底地形変化図の崩壊部と概ね整合的であることを確認した。

〔崩壊部の厚さ〕

- ・厚さについては、海上音波探査記録より復元した鉛直断面において最も厚い箇所を図読する。
- ・複数測線がある場合は、最も厚いものを採用する。

〔崩壊部の体積〕

崩壊部の体積(概算) = 投影面積 × 最大厚さ



4-1-1. 海底地すべりの規模の評価

体積による海底地すべりの規模評価結果

No.	地すべり地形	エリア	投影面積 (m ²)	最大地すべり厚さ(m)	崩壊体積(概算) (km ³)
1	Es-T2	C	37,846,065	137	5.2
2	Es-K5	B	35,126,230	128	4.5
3	Es-K1	B	55,734,810	77	4.3
4	Es-T13	C	28,114,842	140	3.9
5	Es-K6	B	34,300,190	103	3.5
6	Es-T8	C	11,942,137	150	1.8
7	Es-K9	B	28,374,261	62	1.8
8	Es-G3	A	56,722,517	29	1.6
9	Es-K4	B	16,133,016	81	1.3
10	Es-K3	B	24,732,714	51	1.3
11	Es-G104	A	23,284,618	46	1.1
12	Es-T17	C	6,150,309	158	1.0
13	Es-K8	B	12,425,060	76	0.9
14	Es-T14	C	10,979,949	79	0.9
15	Es-G103	A	24,234,201	30	0.7
16	Es-T18	C	4,228,490	138	0.6
17	Es-T4	C	5,293,731	107	0.6
18	Es-T1	C	6,484,158	84	0.5
19	Es-K7	B	3,130,450	160	0.5
20	Es-K2	B	6,632,408	67	0.4

No.	地すべり地形	エリア	投影面積 (m ²)	最大地すべり厚さ(m)	崩壊体積(概算) (km ³)
21	Es-G102	A	11,745,711	36	0.4
22	Es-T5	C	4,037,368	83	0.3
23	Es-K10	B	4,704,447	69	0.3
24	Es-G1	A	12,314,721	23	0.3
25	Es-T10	C	6,054,713	38	0.2
26	Es-T9	C	5,280,448	43	0.2
27	Es-G105	A	6,542,003	32	0.2
28	Es-T15	C	3,836,673	49	0.2
29	Es-G101	A	7,200,918	26	0.2
30	Es-T3	C	3,762,455	48	0.2
31	Es-T7	C	1,982,305	73	0.1
32	Es-T11	C	1,858,549	75	0.1
33	Es-T12	C	3,652,942	29	0.1
34	Es-G2	A	2,708,935	33	0.1
35	Es-T16	C	2,089,051	33	0.1
36	Es-T19	C	4,548,366	14	0.1
37	Es-T6	C	652,313	62	0.0
38	Es-G4	A	1,168,804	26	0.0

崩壊体積(概算)を算出した結果、各エリア毎の最大規模の海底地すべり(エリアA:Es-G3、エリアB:Es-K5、エリアC:Es-T2)は、崩壊部の鉛直断面積より選定した結果と同じであることを確認した。

4-1-2. 海底地すべりによる地形変化の算出

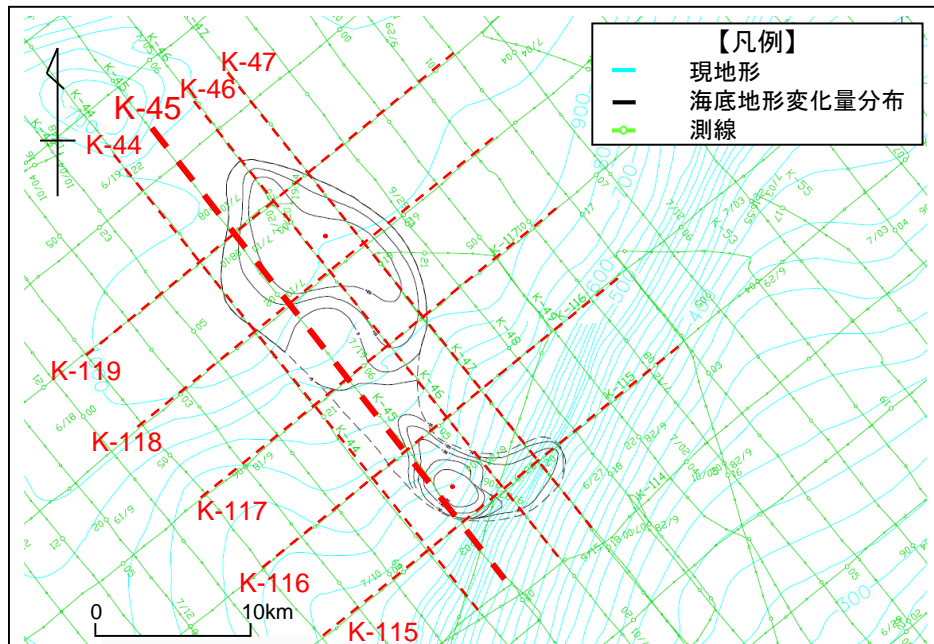
海底地形変化の算出方法

○ 地すべりによる海底地形変化については、津波水位に直接影響することから精度よく算出する必要があり、山本(1991)*に準じて、高分解能音波探査記録(3.5kHzサブボトムプロファイラー:SBP)を用いて、下記の手順で海底地形変化を算出した。

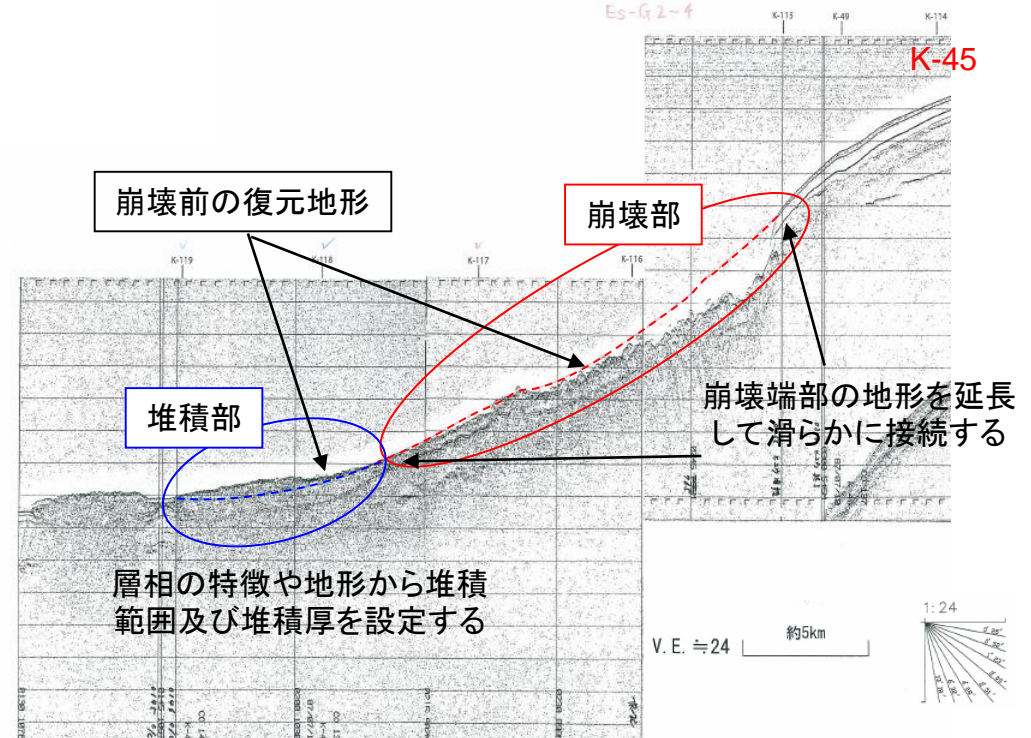
- 海底地形変化の算出に当たっては海上音波探査記録の再解析を実施し、層相の特徴等から海底地すべり地形として崩壊部や堆積部を判読した。
- 崩壊前の地形の復元に当たっては、崩壊端部の地形を延長して滑らかに接続させ、測線同士でのクロスチェックを行い、復元した地形が3次元的に不自然でないことを確認した。
- さらに、崩壊量と堆積量のバランスも確認しながら海底地形変化量分布図を作成した。

○ 山本(1991)が判読した海底地すべりエリアA(Es-G3)について上記手順を適用したところ、崩壊前地形の復元形状や崩壊体積が論文とほぼ一致し、手順が妥当であることを確認したことから、エリアB、Cについても上記手順を適用して海底地形変化を算出した。

【SBPの再解析結果から海底地すべり地形の判読例】



海底地形変化量分布図(エリアA、Es-G3)

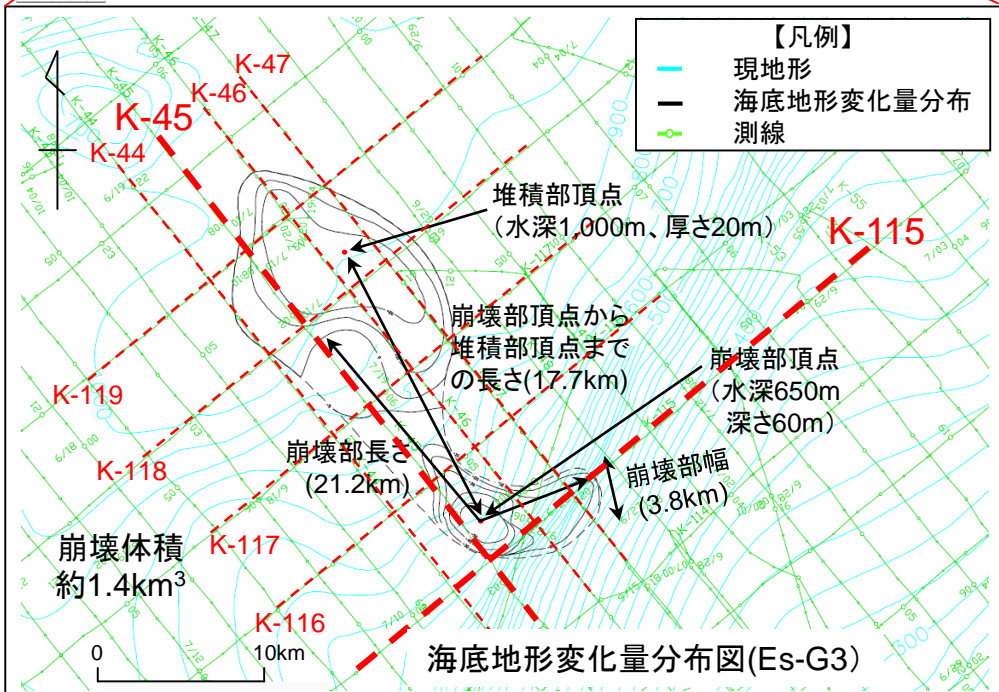
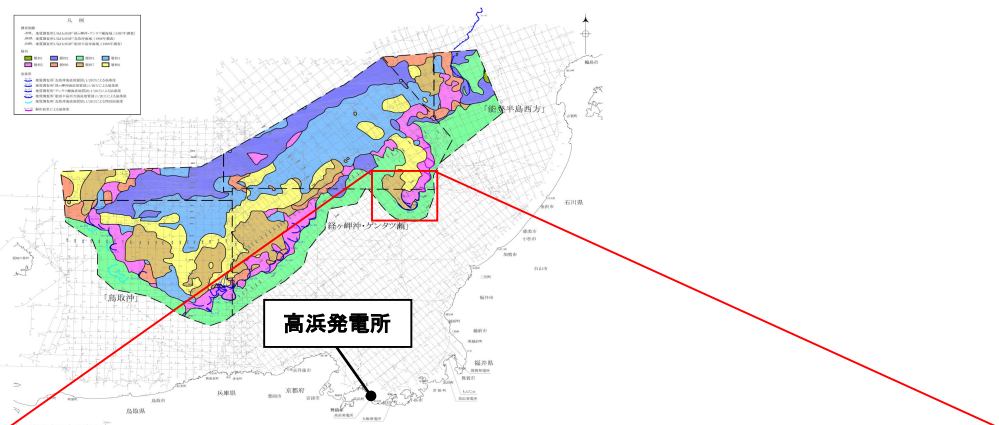


* :山本博文(1991):「福井沖大陸斜面の海底地すべり」, 地質調査所月報, 第42巻第5号, pp.221-232.

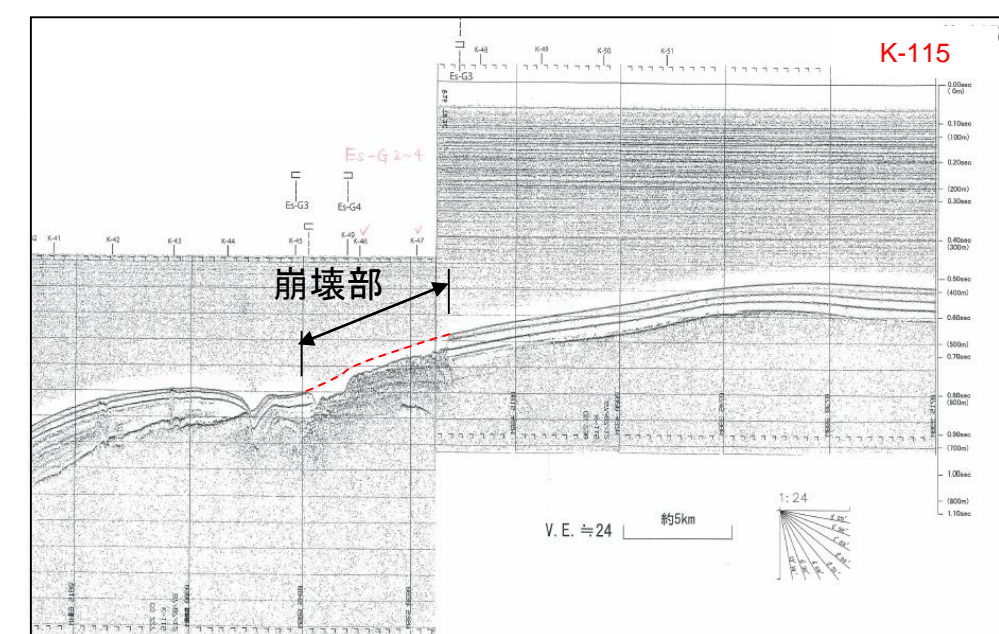
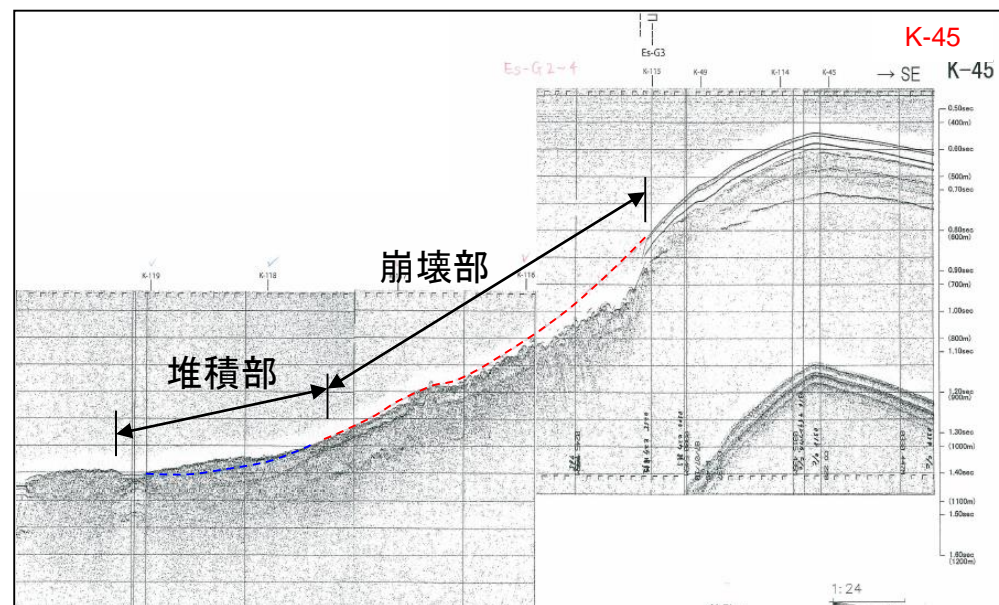
4-1-2. 海底地すべりによる地形変化の算出

評価対象とする海底地すべり地形変化の算出(エリアA)

※測線は代表例



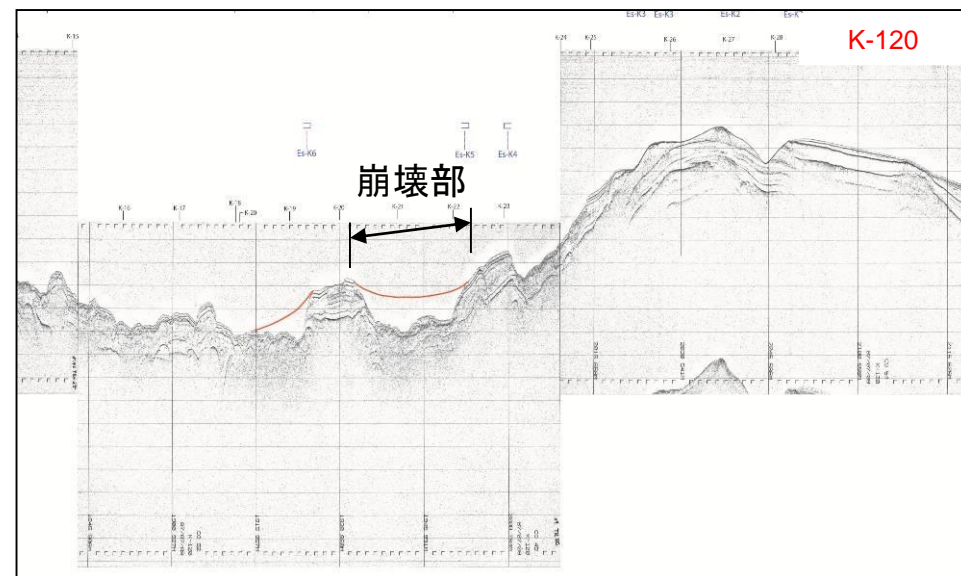
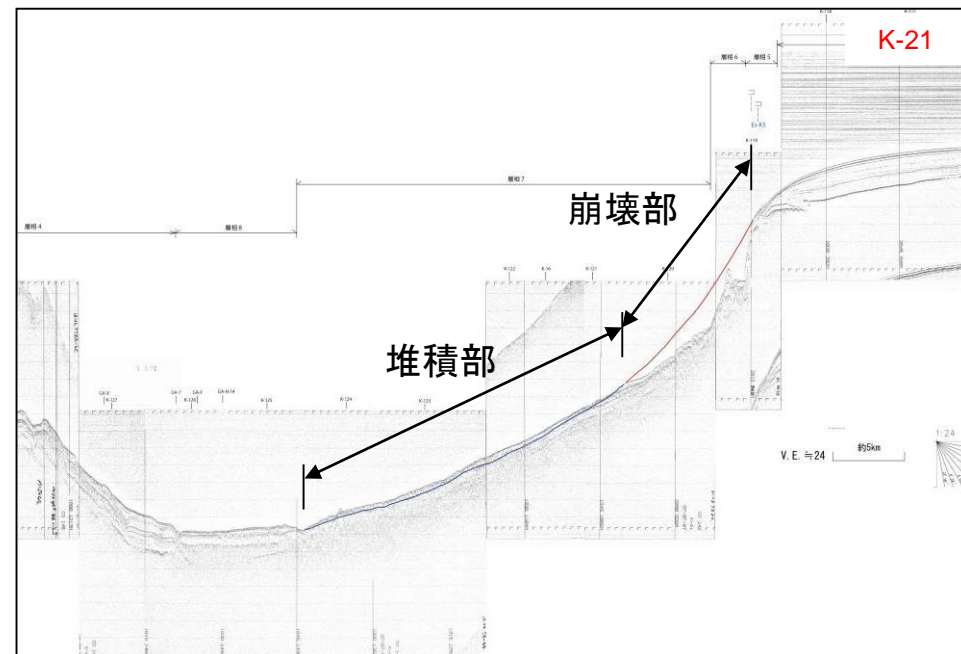
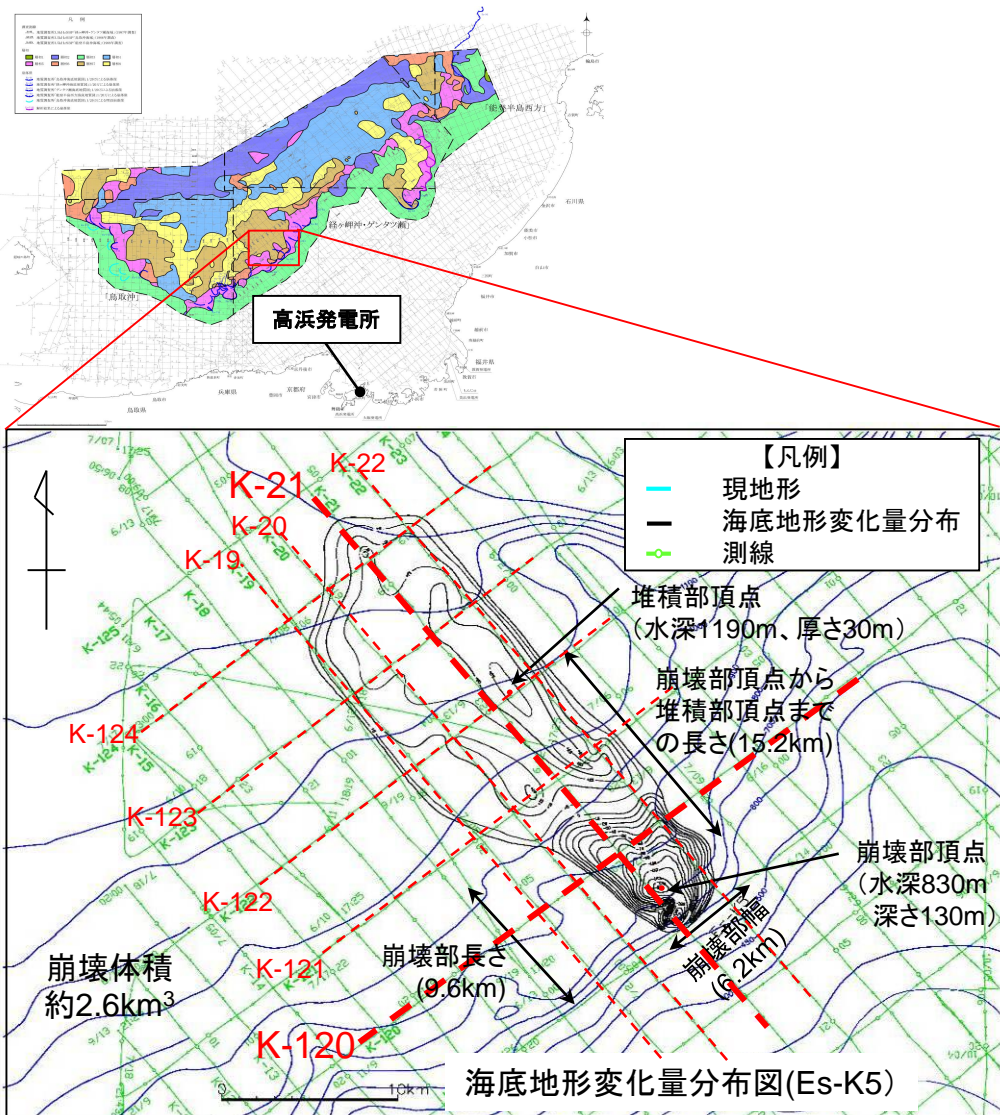
地すべり地形Es-G3を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。



4-1-2. 海底地すべりによる地形変化の算出

評価対象とする海底地すべり地形変化の算出(エリアB)

※測線は代表例

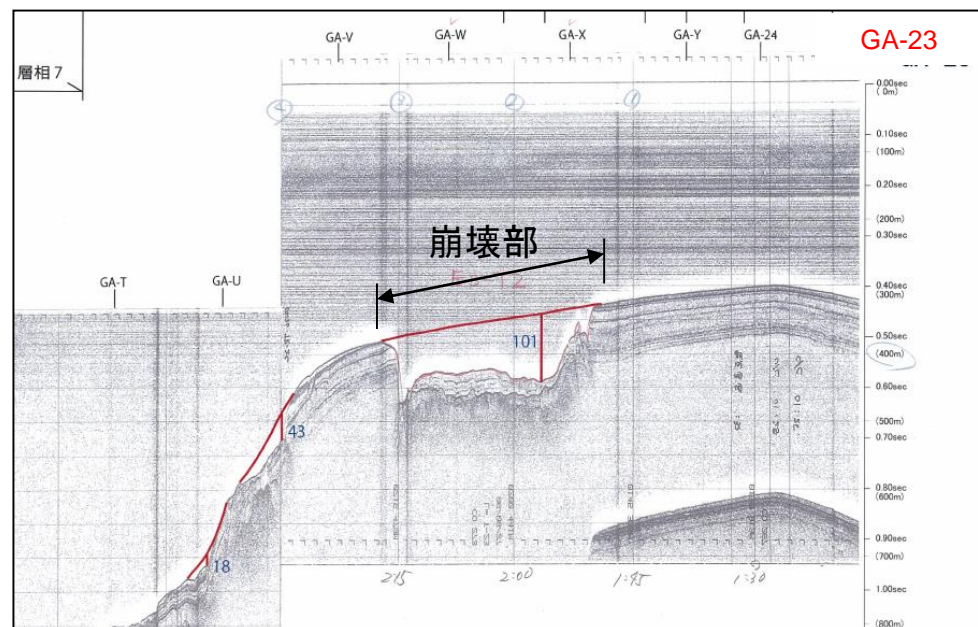
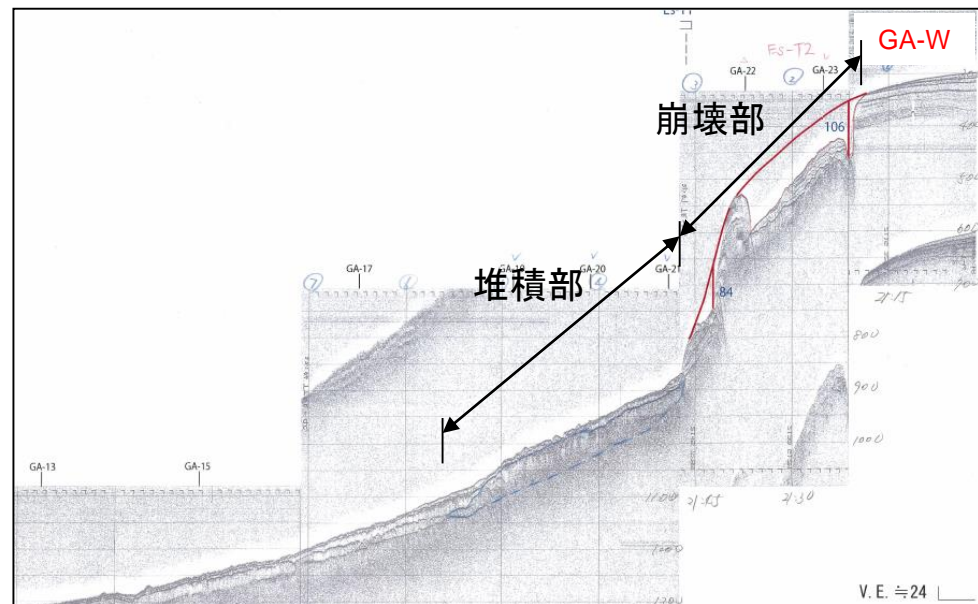
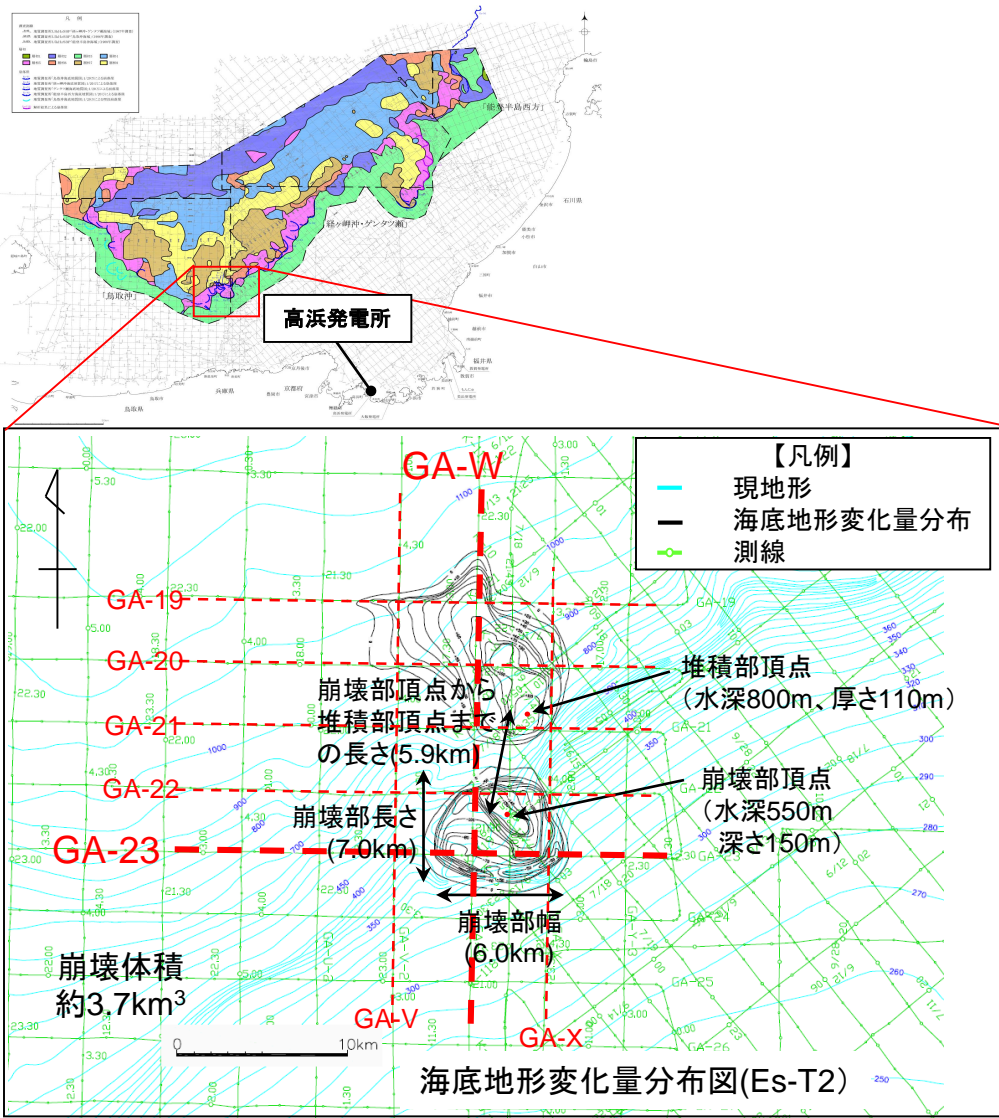


地すべり地形Es-K5を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。

4-1-2. 海底地すべりによる地形変化の算出

評価対象とする海底地すべり地形変化の算出(エリアC)

※測線は代表例



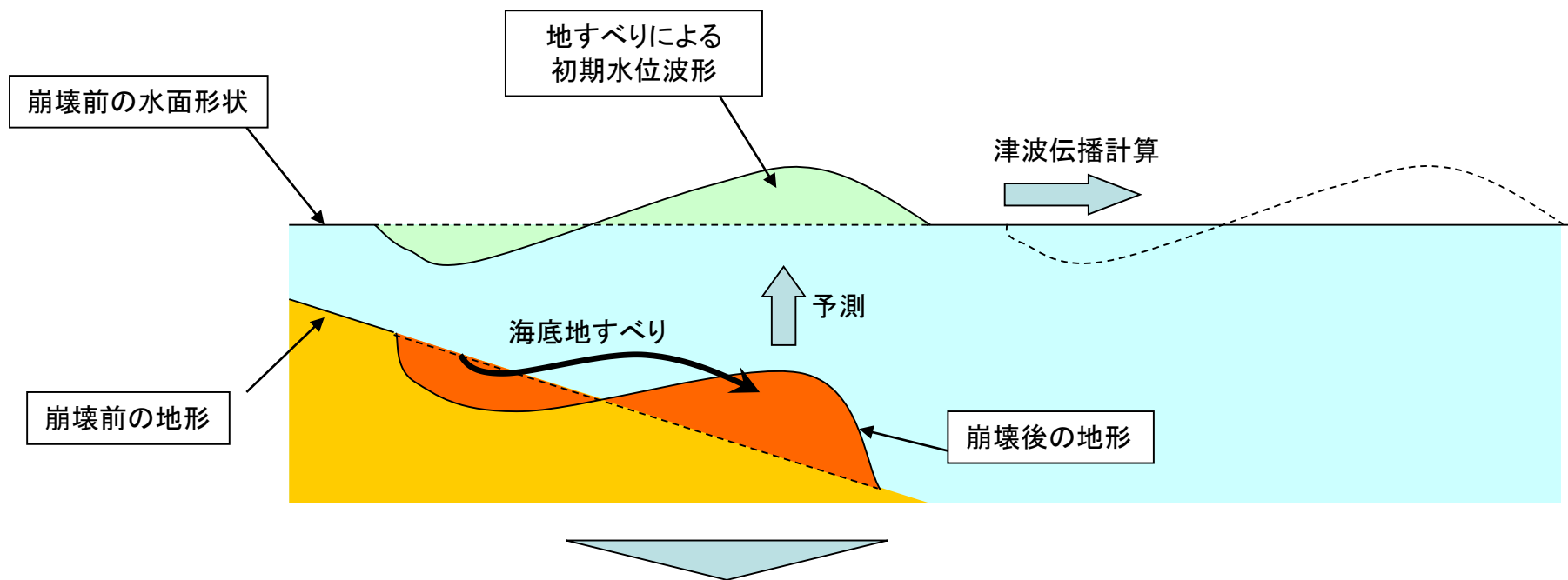
地すべり地形Es-T2を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。

4-1-3. 海底地すべりによる津波評価

4-1-3. 海底地すべりによる津波評価

海底地すべりによる津波評価における解析の流れ

- 海底地すべりによる津波の評価では、崩壊前後の海底地すべり地形を元に初期水位波形を設定(予測)し、伝播計算を行う。
- 初期水位波形の設定には、以下の2つの予測手法を用いる。



- ①実験や海底地すべりの数値解析モデルの再現性を確認しているWatts他(2005)^{※1}による予測式 (Watts他の予測式)
- ②佐竹他(2002)^{※2}が用いた運動学的海底地すべりモデルによる予測方法 (Kinematicモデルによる方法)

※1: Watts, P., S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer (2005) : Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.298-310.

※2: 佐竹健治・加藤幸弘(2002):「1741年寛保津波は渡島大島の山体崩壊によって生じた」, 月刊海洋/号外, No.28, pp.150-160.

Watts他の予測式(初期水位波形の予測1/2)

Watts他(2005)^{*}が提案する初期水位波形の予測式は、次式で表される。

$$\eta(x, y) = -\frac{\eta_{0,3D}}{\eta_{\min}} \operatorname{sech}^2\left(\kappa \frac{y - y_0}{w + \lambda_0}\right) \left(\exp\left\{-\left(\frac{x - x_0}{\lambda_0}\right)^2\right\} - \kappa' \exp\left\{-\left(\frac{x - \Delta x - x_0}{\lambda_0}\right)^2\right\} \right)$$

$$\eta_{0,3D} = \eta_{0,2D} \left(\frac{w}{w + \lambda_0} \right)$$

ここで、 $\eta_{0,3D}$:現象が3次元的な場合の最大水位低下、 w :地すべり塊の幅、 η_{\min} :振幅を除く第1式右辺の最小値、 κ, κ' :形状パラメータ(ただし、 $\kappa = 3$ としてよい)

上式に必要なパラメータ($w, \eta_{0,2D}, \lambda_0$:特性津波波長、 $\Delta x(=\lambda_0/2)$)は、崩壊後の地形から図読、もしくは津波振幅等の予測式から別途算出する。

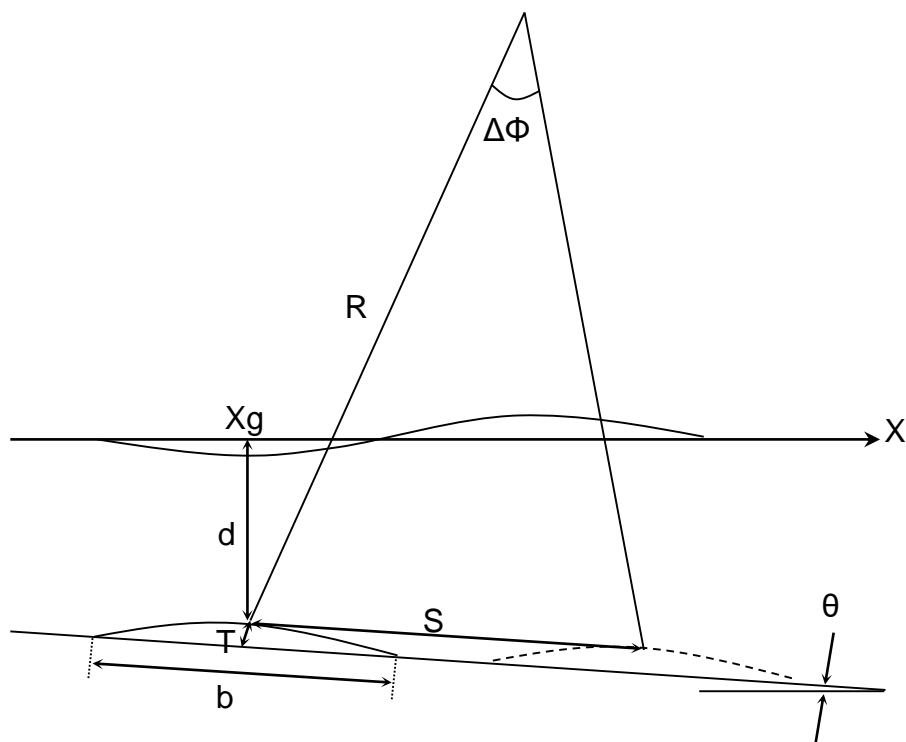
^{*}: Watts, P., S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer (2005) : Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.298-310.

4-1-3. 海底地すべりによる津波評価

Watts他の予測式(初期水位波形の予測2/2)

津波振幅等は、Grilli他(2005)^{※1}及びWatts他(2005)^{※2}が提案している実験の再現性に優れた予測式を適用する。

【津波振幅予測式の概念図および推定式】



SMF: Submarine mass failure

b: SMF長さ

d: 初期のSMF最小没水深

T: SMFの厚さ

w: SMFの幅

θ : 斜面勾配

γ : SMFの比重

X_g : 初期水深がdとなる位置の座標

C_m : 付加質量係数(=1)

C_d : 抗力係数(=0)

S: 移動距離

S_0 : 特性距離(=S/2)

C_n : 底面摩擦係数(= $S_0/(R \cos \theta)$)

R: 曲率半径(= $b^2/8T$)

$\Delta \Phi$: 回転角(= $2S_0/R$)

a_0 : 初期加速度(= S_0/t_0^2)

u_{max} : 最大速度(= S_0/t_0)

t_0 : 特性時間

$$t_0 = \sqrt{\frac{R}{g}} \sqrt{\frac{\gamma + C_m}{\gamma - 1}}$$

λ_0 : 特性津波波長(= $t_0 \sqrt{gd}$)

$\eta_{0,2D}$: $X=X_g$ における最大水位低下量

$$\eta_{0,2D} = S_0 \left[\frac{0.131}{\sin \theta} \right] \left[\frac{T}{b} \right] \left[\frac{b \sin \theta}{d} \right]^{1.25} \left[\frac{b}{R} \right]^{0.63} \times (\Delta \Phi)^{0.39} (1.47 - 0.35(\gamma - 1))(\gamma - 1)$$

※1: Grilli, S.T., and P. Watts (2005) : Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I : Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analysis, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.283-297.

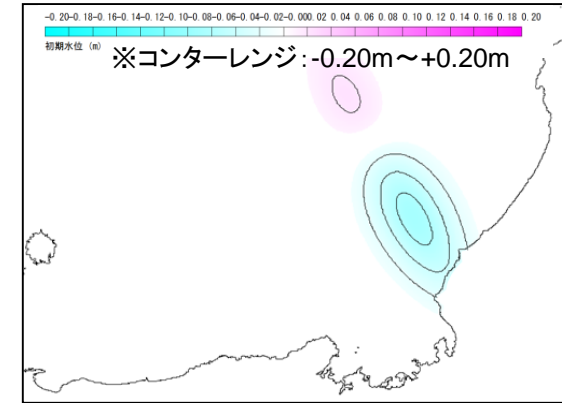
※2: Watts, P., S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer (2005) : Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.298-310.

Watts他の予測式による初期水位波形(エリアA~C)

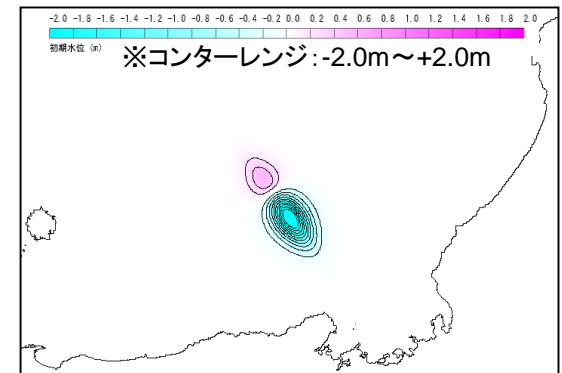
項目	エリア			備考
	エリアA Es-G3	エリアB Es-K5	エリアC Es-T2	
$\gamma(-)$	1.4	1.4	1.4	地質調査所・海洋地質図説明書※1
b (m)	21,200	9,600	7,000	崩壊部長さ※2
T (m)	60	130	150	崩壊部の頂点における崩壊深さ※2
w (m)	3,800	6,200	6,000	崩壊部幅※2
d (m)	590	700	400	崩壊部頂点の水深-崩壊深さ※2
$\theta(\text{deg.})$	1.1	1.7	1.4	崩壊部頂点から堆積部頂点の距離と、崩壊高さと崩壊前における堆積部頂点の水深から算出※2
g (m/s ²)	9.8	9.8	9.8	
Cd	0	0	0	
Cm	1	1	1	
S	17,700	15,200	5,900	崩壊部頂点から堆積部頂点の距離※2
S ₀	8,850	7,600	2,950	S/2
Cn	0.009	0.086	0.072	=S ₀ / (Rcos θ)
R(m)	936,333	88,615	40,833	=b ² / 8T
a ₀ (m ² /s)	0.015	0.140	0.118	=S ₀ / t ₀ ²
t ₀ (sec)	757	233	158	= $\sqrt{(R/g)}\sqrt{(\gamma+Cm)/(\gamma-1)}$
λ_0 (m)	57,573	19,292	9,899	=t ₀ \sqrt{gd}
$\Delta\Phi$ (rad)	0.019	0.172	0.144	2S ₀ / R
u _{max} (m/s)	11.69	32.63	18.66	=S ₀ / t ₀
ΔX (m)	28,786	9,646	4,950	= $\lambda_0/ 2$
κ'	0.687	0.625	0.898	

項目	波源振幅の推定値		
	エリアA Es-G3	エリアB Es-K5	エリアC Es-T2
$\eta_{0,2D}$ (m)	1.12	9.79	9.65
$\eta_{0,3D}$ (m)	0.07	2.38	3.64

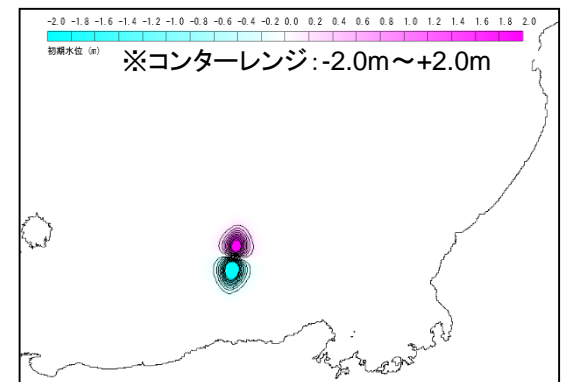
※1 : 片山肇、佐藤幹夫、池原研「海洋地質図 38 経ヶ岬沖表層堆積図説明書 1:200,000」平成5年 地質調査所
 ※2 : 地すべり地形からの図読による値



エリアA (Es-G3)



エリアB (Es-K5)

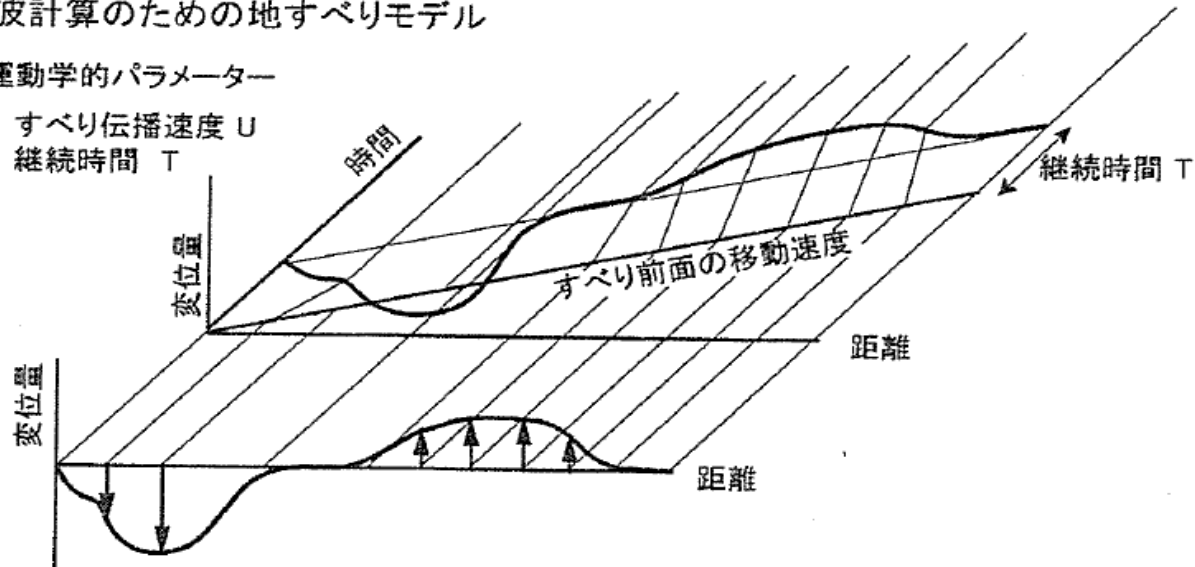


エリアC (Es-T2)

Kinematicモデルによる方法(初期水位波形の予測)

津波計算のための地すべりモデル

運動学的パラメーター

すべり伝播速度 U
継続時間 T 

運動学的地すべりモデルの概念図(佐竹他(2002)※)

▶地すべり発生箇所における海面変化

- ・海底地形変化はすべり伝播速度 U (破壊伝播速度)と各地点での継続時間 T (破壊継続時間)で規定される。
- ・地すべりの前面は速度 U で移動する。 U には鉛直成分 U_z を与条件とした。
- ・各地点の比高変化は継続時間 T で完了する。
- ・ここで求めた時間刻みあたりの地形変化量が海面水位と海底地形にそのまま反映されるものとして、その時点での水位と海底地形に上積みする。

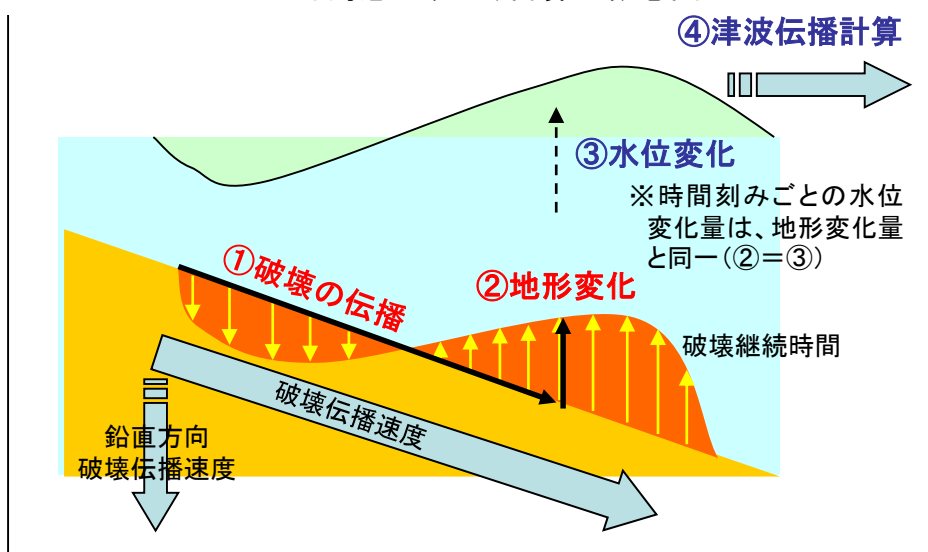
▶津波伝播計算

- ・非線形長波理論に基づく、通常津波解析に用いられる平面二次元モデルを適用。

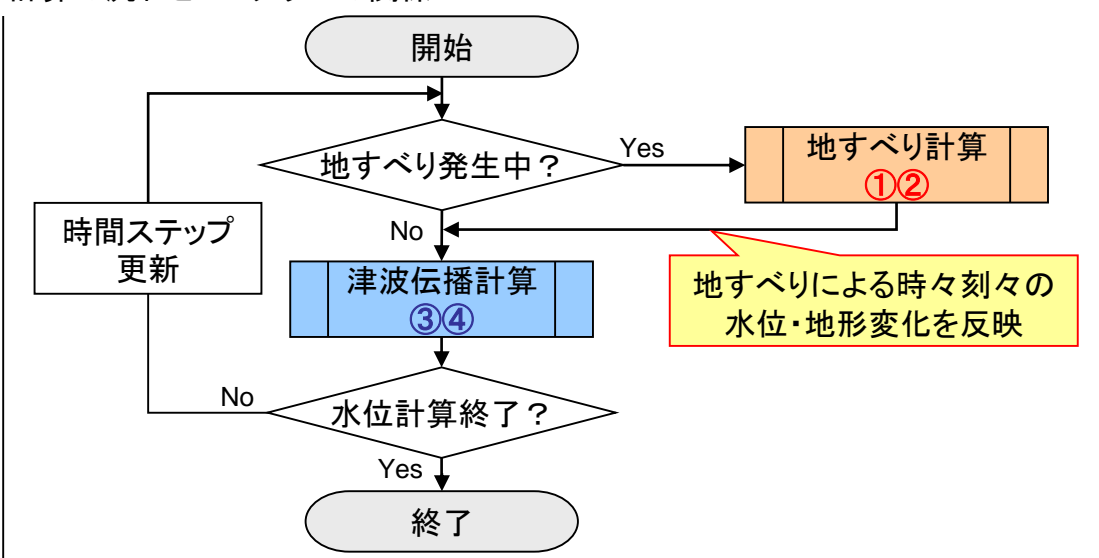
※: 佐竹健治・加藤幸弘(2002): 「1741年寛保津波は渡島大島の山体崩壊によって生じた」, 月刊海洋/号外, No.28, pp.150-160.

Kinematicモデルによる方法(海底地すべり計算の概要)

Kinematicモデルによる海底地すべり計算の概念図

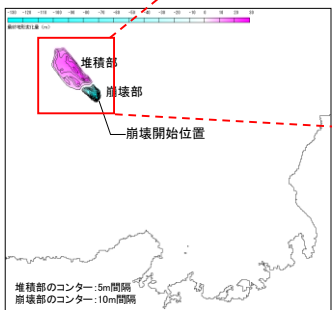


計算の流れとプログラムの関係

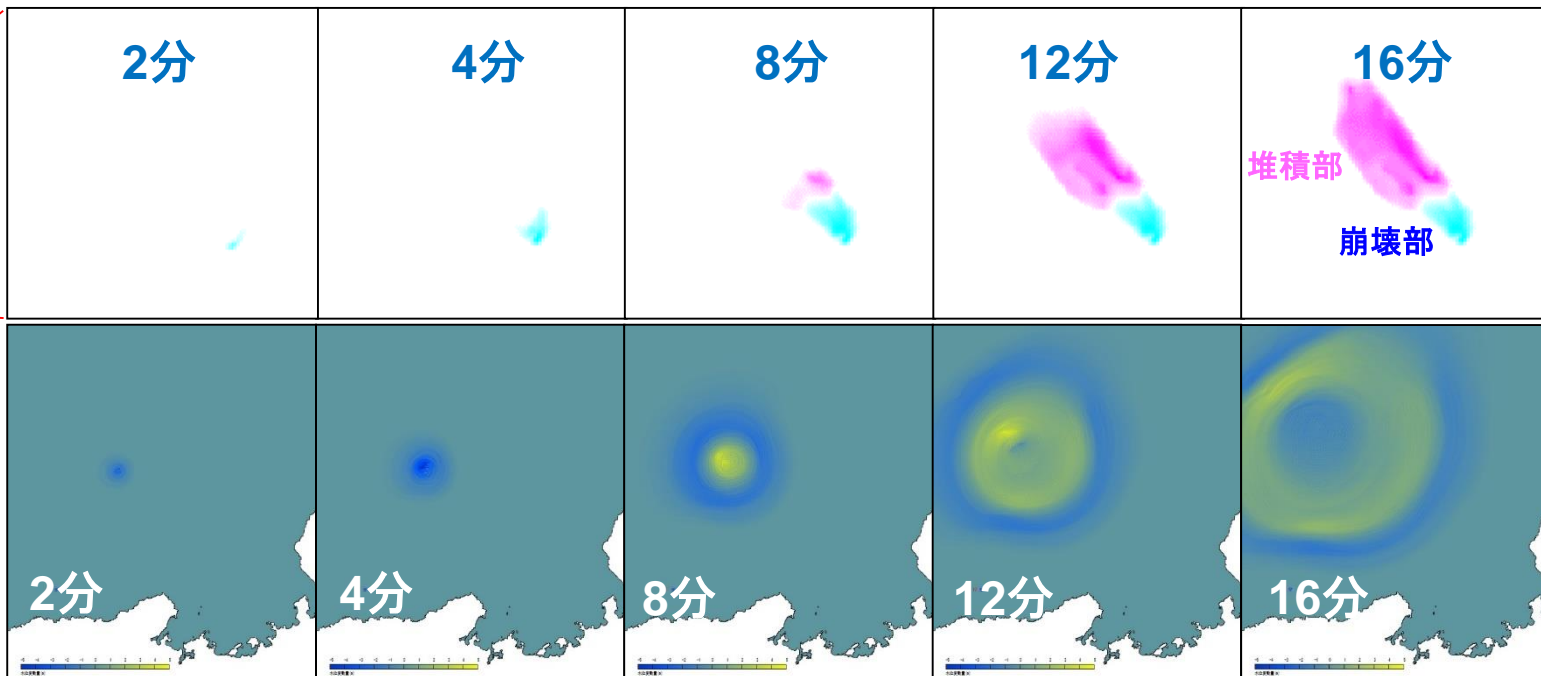


地すべりによる時々刻々の水位・地形変化を反映

累積地形変化量
スナップショット
(地すべり計算)

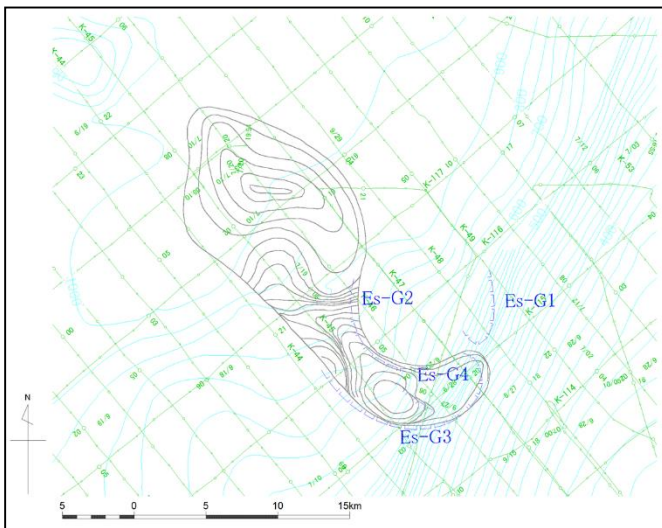


水位変化
スナップショット
(津波伝播計算)

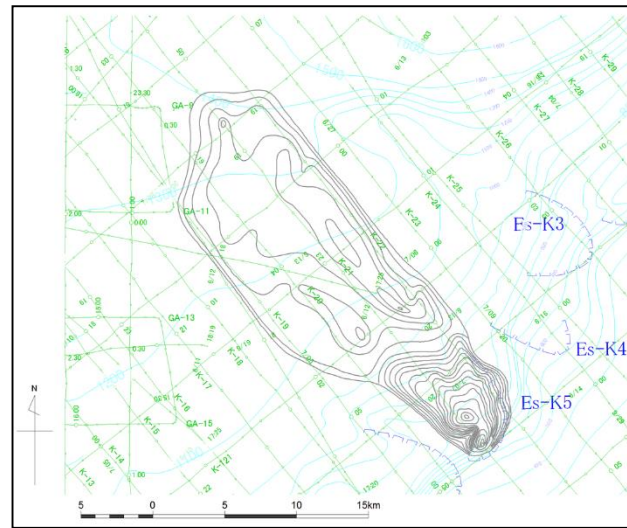


Kinematicモデルによる方法(海底地すべり計算に用いる地形データについて)

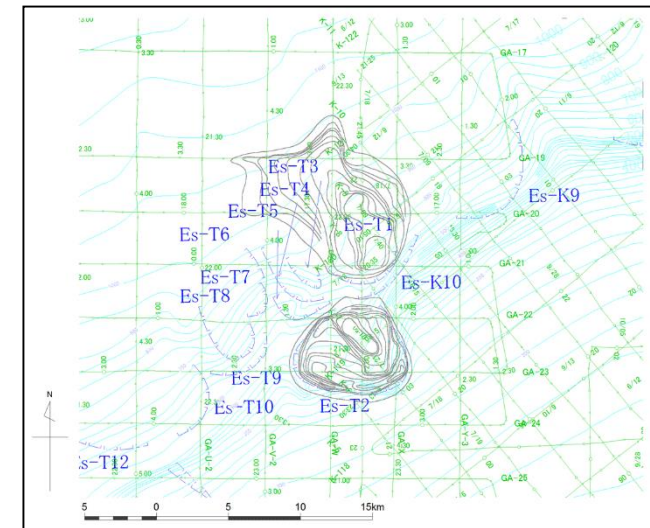
- 地すべりによる海底地形変化については、津波水位に直接影響することから精度よく算出する必要があり、高分解能音波探査記録を用いて海底地形変化を算出した。
- 一方、隠岐トラフ周辺の海底地形図としてM7000シリーズがあるが、場所によって精度が大きく異なり、隠岐トラフ周辺においては海底地すべり地形は十分に表現されていない(下図のとおり、地すべり地形が読み取れない)。
- 上記のように、海底地形図と海底地形変化量分布の算出に用いた元データの精度が異なるため、海底地形図に海底地形変化量分布を加えても復元地形(崩壊前の地形)とは一致せず、むしろ現行の海底地形図が復元地形と一致していることから、現行の地形図を崩壊前の地形とみなすこととした。



エリアA(Es-G3)

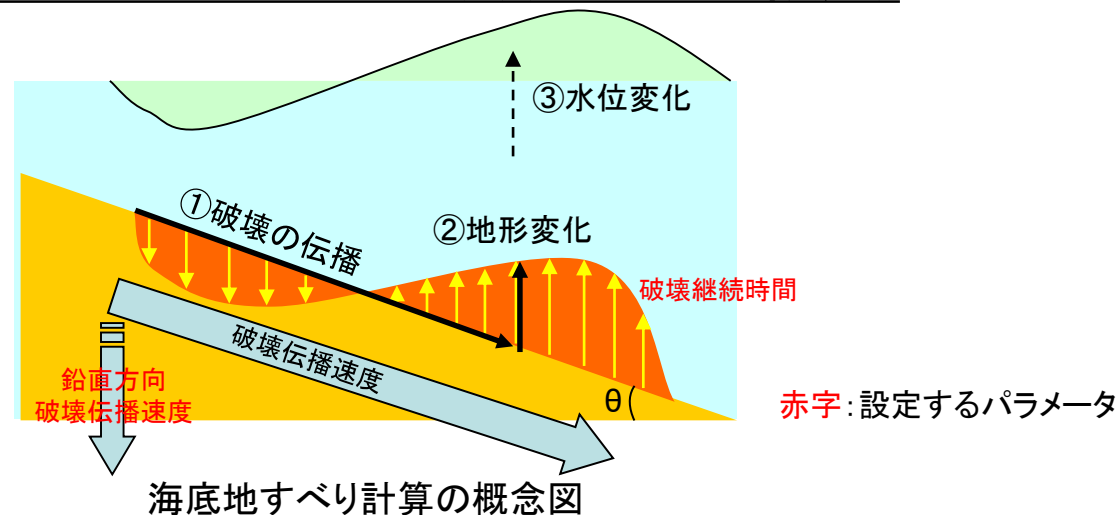


エリアB(Es-K5)



エリアC(Es-T2)

4-1-3. 海底地すべりによる津波評価 Kinematicモデルによる方法(パラメータ設定)



○海底地すべりの速度に関する文献

- ・Voight(1981)^{※1}によると、セントヘレンズ噴火の際の連続写真の解析から、陸上の岩層なだれの速度として50~70m/sが示されている。
- ・Arai他(2013)^{※2}によると、東北地方太平洋沖地震津波に伴う海底地すべり(混濁流)の速度として、2.3~8.0m/sが示されている。
- ・大草(1984)^{※3}によると、オランダで発生した流動すべりの速度として、傾斜15°前後で15km/h(4.2m/s)程度、ノルウェーのフィヨルドで発生した流動すべりの速度として、勾配5~10%で10~26km/h(2.8~7.2m/s)程度が示されている。

○海底地すべりの速度(破壊伝播速度)や破壊継続時間を明確に定めることができる知見はまだ十分ではない。

○本検討においては、破壊伝播速度について、Watts他の予測式から求まる海底地すべりの速度の最大値(U_{max})を採用する。また、破壊継続時間については、合理的と考えられる範囲で地形変化が最速となるように設定する。

○なお、殿最他(2015)^{※4}によると、模型実験の再現計算に本設定を用いたKinematicモデルを適用した場合、実験結果やWatts他の手法と比べて保守的な水位評価結果が得られることが報告されている。

○周期特性が変化することによる影響を検討するため、破壊伝播速度、破壊継続時間についてパラメータスタディを実施し、評価結果に影響がないことを確認した。(詳細は参考資料に示す)

※1 : Voight, B.(1981) : Time scale for the first moments of the May 18 eruption, in P. W. Lipman and D. R. Mullineaux(ed.), The 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington, USGAS Professional Paper, 1280, pp.69-86.

※2 : Arai, K., Naruse, H., Miura, R., Kawamura, K., Hino, R., Ito, Y., Inazu, D., Yokokawa, M., Izumi, N. and Murayama, M.(2013) : Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, Geology, Geological Society of America.

※3 : 大草重康(1984):「海底地盤の土質力学」, 土木学会論文集, No.346, pp.13-21.

※4 : 殿最浩司・志方建仁・村上嘉謙(2015):「海底地すべりに伴う津波の各種計算モデルの再現性検討」, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.71, No.2, pp.I_557-I_562.

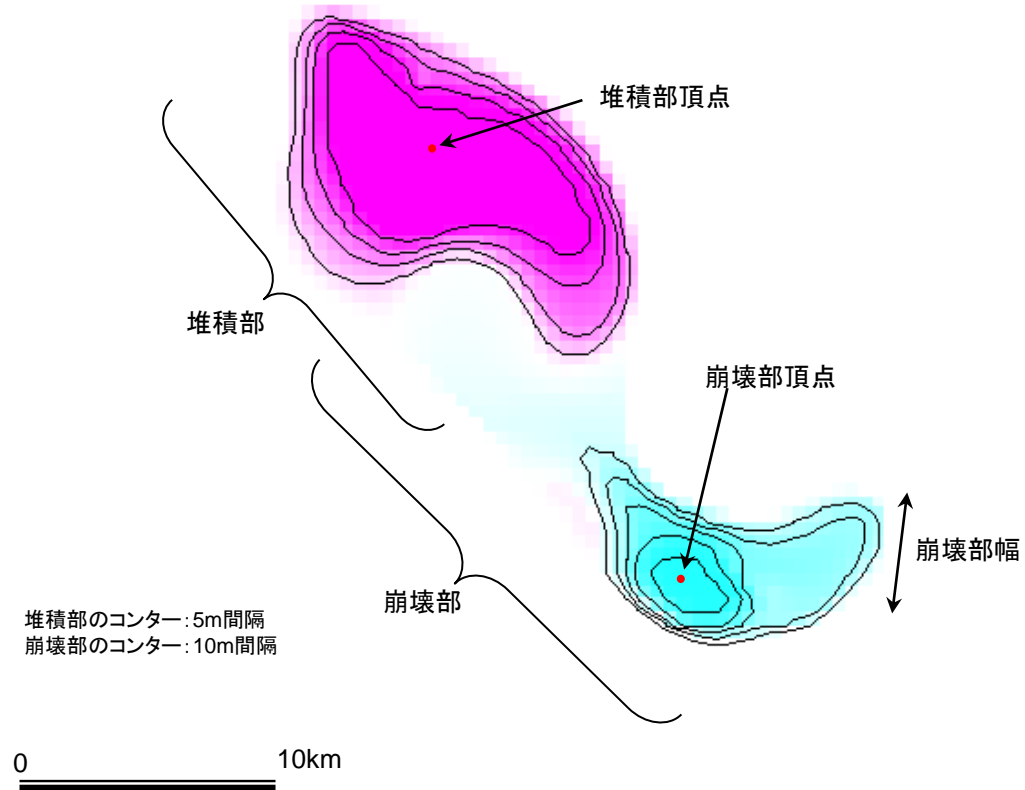
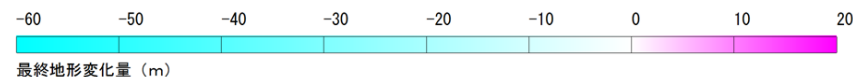
Kinematicモデルによる方法(計算条件(エリアA))

【計算条件】

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度 (基本ケース)	0.3m/s※1
破壊継続時間 (基本ケース)	3分※2
(参考) 地すべり終了時間	2,082秒※3



【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)



※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

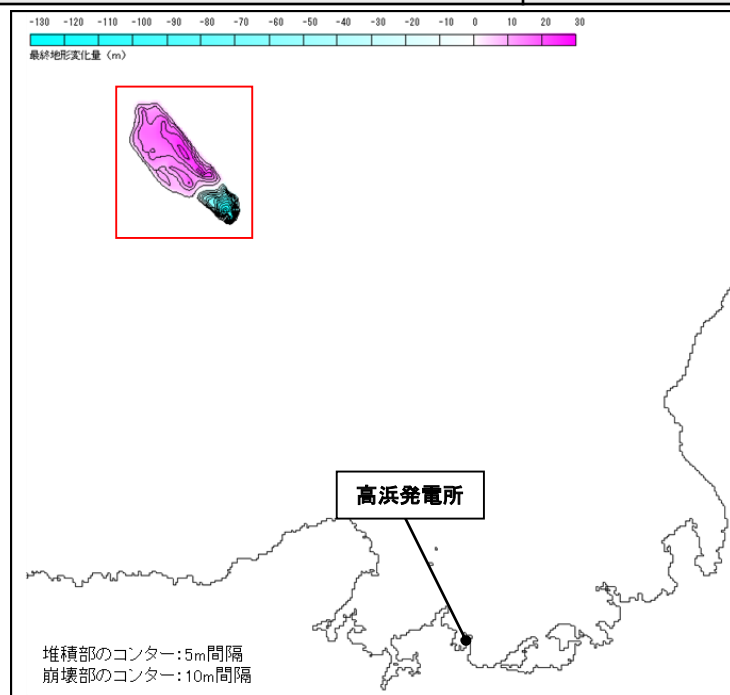
※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

※3 地すべり終了時間=地すべり伝播到達時間1,902秒(地すべりの標高差570.7m÷鉛直方向破壊伝播速度0.3m/s)+破壊継続時間3分(180秒)=2,082秒

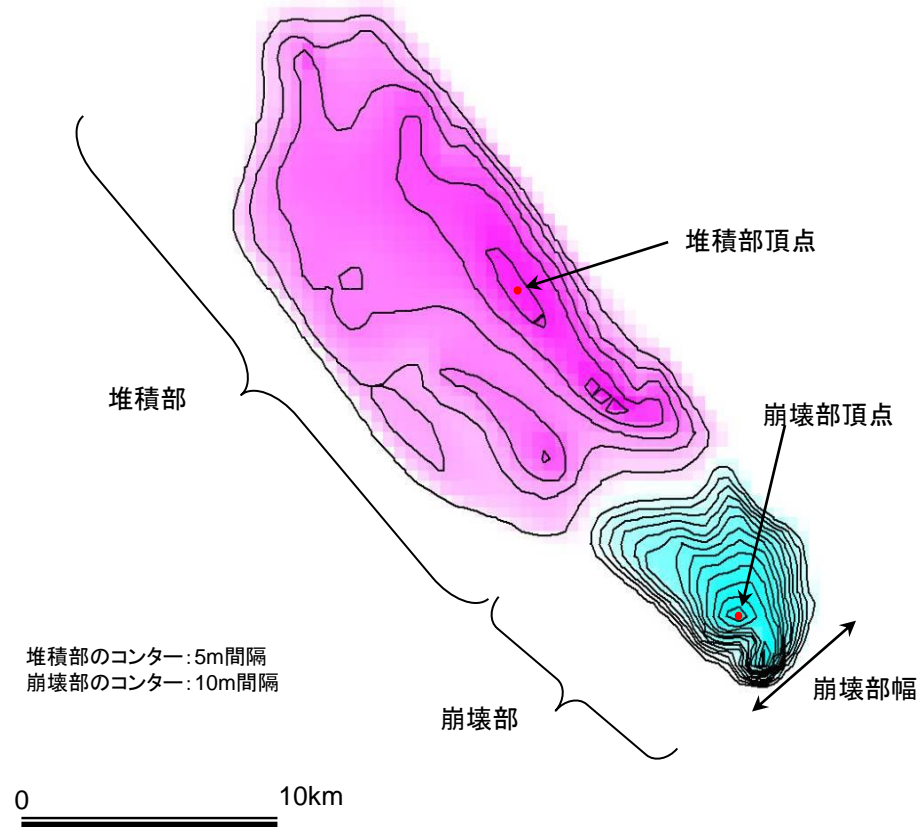
Kinematicモデルによる方法(計算条件(エリアB))

【計算条件】

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度(基本ケース)	1.0m/s※1
破壊継続時間(基本ケース)	2分※2
(参考)地すべり終了時間	951秒※3



【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)



※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

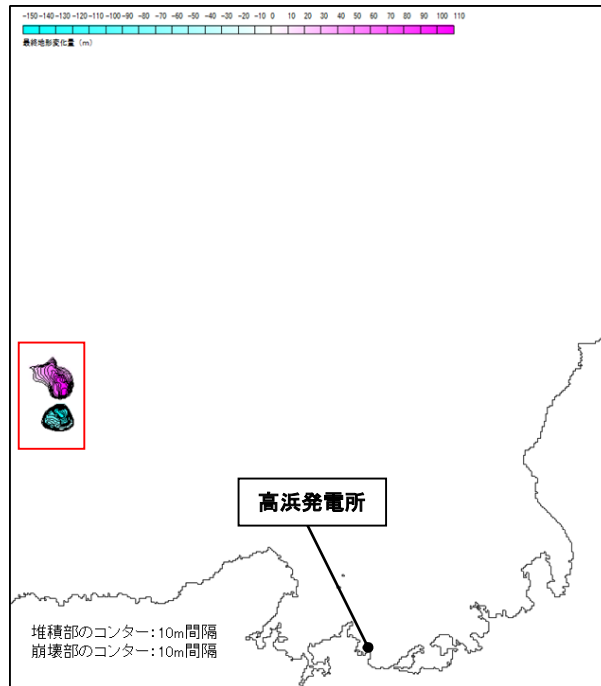
※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

※3 地すべり終了時間=地すべり伝播到達時間831秒(地すべりの標高差831.1m÷鉛直方向破壊伝播速度1m/s)+破壊継続時間2分(120秒)=951秒

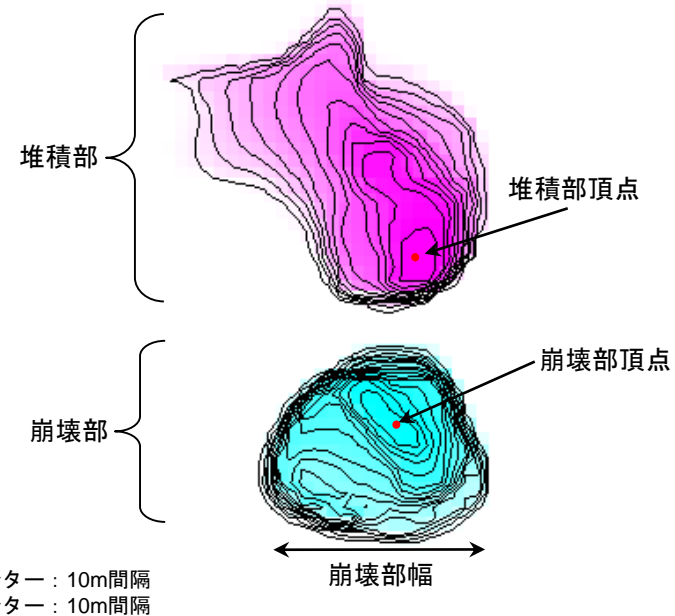
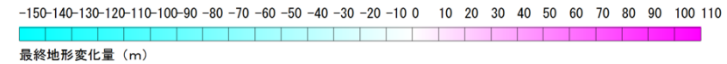
Kinematicモデルによる方法(計算条件(エリアC))

【計算条件】

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度 (基本ケース)	0.5m/s※1
破壊継続時間 (基本ケース)	5分※2
(参考) 地すべり終了時間	1,748秒※3



【海底地形変化量分布図】 (Kinematicモデルへの入力コンター)



0 10km

※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

※3 地すべり終了時間=地すべり伝播到達時間1,448秒(地すべりの標高差723.9m÷鉛直方向破壊伝播速度0.5m/s)+破壊継続時間5分(300秒)=1,748秒

4-1-3. 海底地すべりによる津波評価

津波伝播計算条件

設定項目		設定値	
津波計算	基礎方程式	非線形長波理論式及び連続式(後藤他(1982)※1)	
	変数配置および差分スキーム	Staggered Leap-frog法	
計算条件等	計算領域	対馬海峡から間宮海峡に至る東西方向約1,500km, 南北方向約2,000km	
	空間格子間隔	1,350m→450m→150m→50m→25m→12.5m→6.25m→3.125m	
	時間格子間隔	0.05秒 ※安定条件(CFL条件)を満足するように設定	
	初期条件	(Watts他の予測式)Watts他の予測式により計算される初期水位分布を初期条件とする。 ----- (Kinematicモデルによる方法)Kinematicモデルによる方法を用いて算出される時間刻みあたりの地形変化量が、海面水位と海底地形にそのまま反映されるものとする。	
	境界条件	沖側境界	特性曲線法をもとに誘導される自由透過の条件(後藤他(1982)※1)
		陸域境界	完全反射条件(発電所敷地については遡上境界とする)
	海底摩擦	マンニングの粗度係数 $n=0.030$ (土木学会(2016)※2)	
	水平渦動粘性係数	$0\text{m}^2/\text{s}$	
	計算時間	3.0時間	
	計算潮位	水位上昇側T.P.+0.49m、水位下降側T.P.0.00m	
評価潮位	水位上昇側T.P.+0.49m、水位下降側T.P.-0.01m	※国土交通省・舞鶴検潮所のデータによる (2007年1月～2011年12月の5箇年)	
津波防護対策	取水路防潮ゲート、放水口側防潮堤を考慮		
津波水位評価	cmを切り上げ、10cm単位で評価する。		

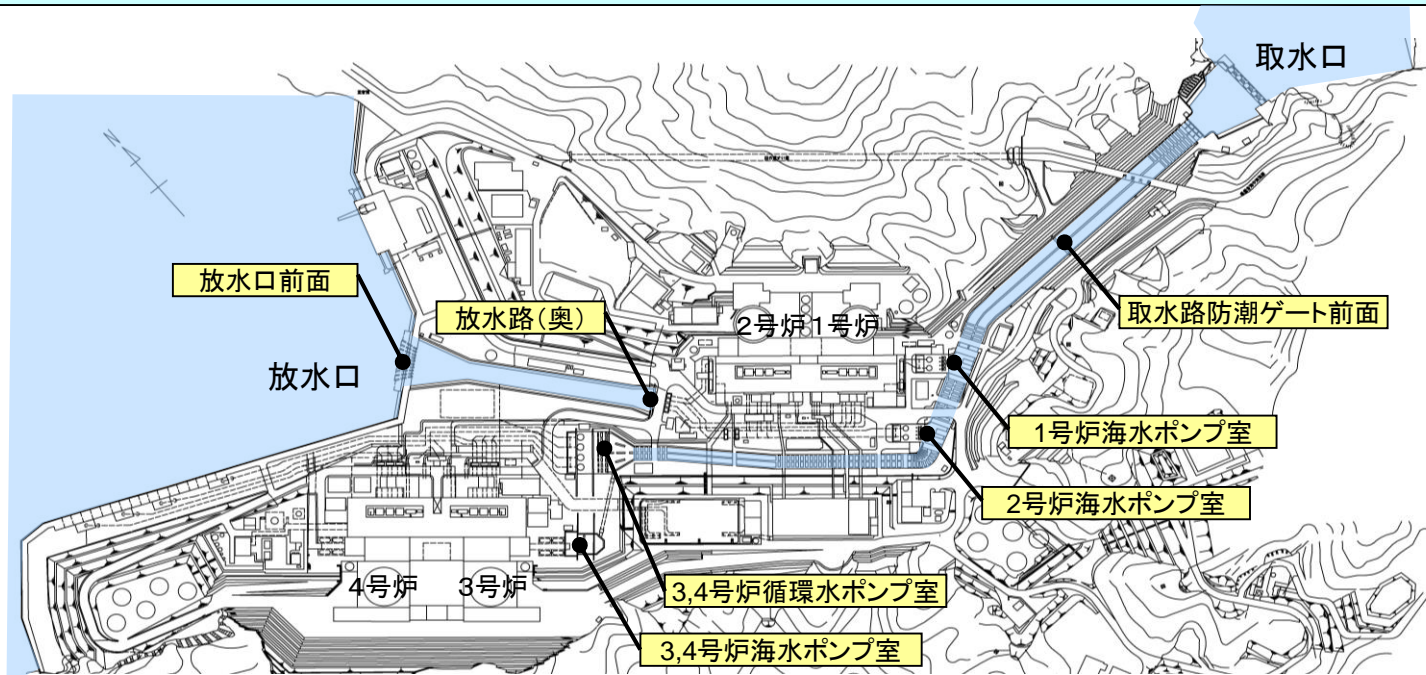
※1 : 後藤智明・小川由信(1982):Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学土木工学科資料, 1982

※2 : 土木学会(2016):原子力発電所の津波評価技術2016.

4-1-3. 海底地すべりによる津波評価

海底地すべりによる津波水位の評価結果

○Watts他の予測式及びKinematicモデルによる方法を用いた初期水位波形に基づき、津波伝播計算を実施した。
○その結果、Watts他の予測式に比べてKinematicモデルによる方法の方が水位が高い結果となった。



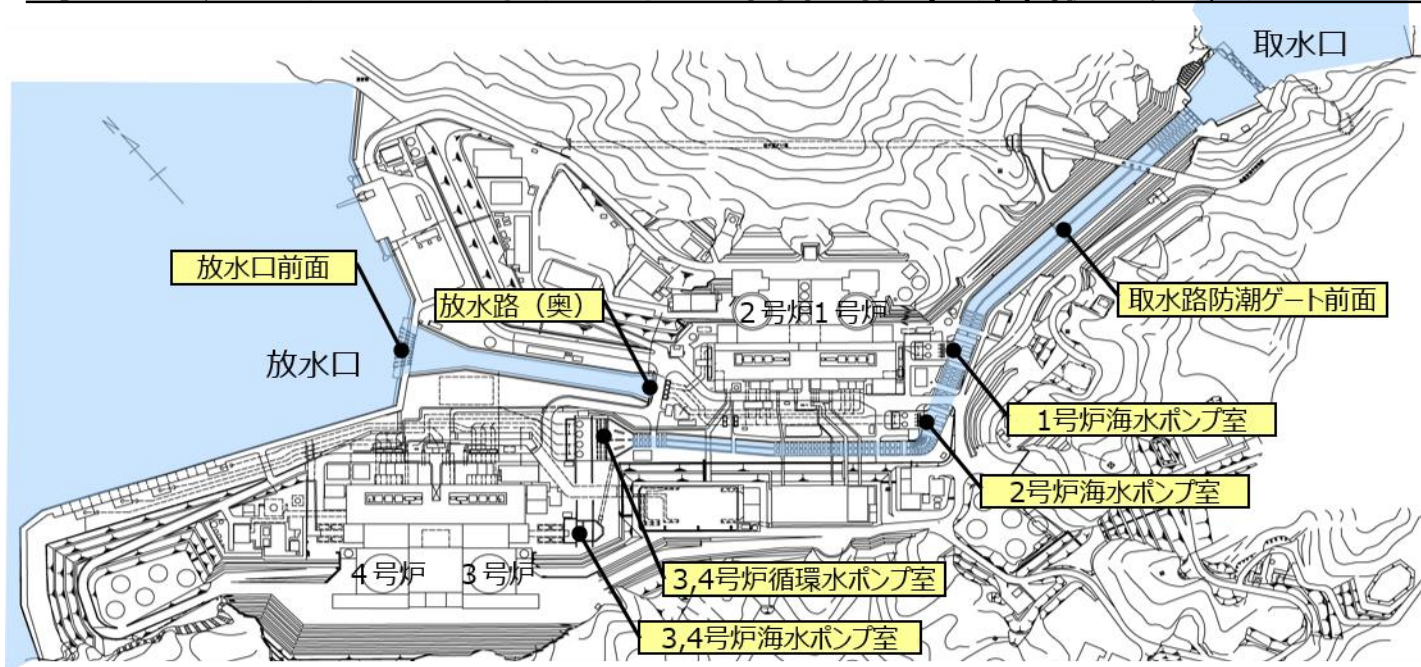
数字は、T.P.(m)

	※1 取水路 防潮ゲート	水位上昇							水位下降			
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	
エリアA	Watts他の予測式	閉	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.3	-0.3	-0.3
	Kinematicモデルによる方法	閉	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.6	1.8	-0.8	-0.8	-0.8
エリアB	Watts他の予測式	閉	2.0	0.8	0.8	0.8	1.0	1.9	2.1	-0.7	-0.7	-0.8
	Kinematicモデルによる方法	閉	<u>4.1</u>	<u>1.2</u>	<u>1.1</u>	<u>1.1</u>	<u>1.3</u>	<u>3.7</u>	<u>4.0</u>	<u>-1.1</u>	<u>-1.0</u>	-1.1
エリアC	Watts他の予測式	閉	2.4	0.8	0.7	0.7	1.1	1.1	1.3	-0.5	-0.5	-0.8
	Kinematicモデルによる方法	閉	3.3	1.1	<u>1.1</u>	<u>1.1</u>	1.2	<u>3.7</u>	3.9	-0.9	-0.9	<u>-1.2</u>

※1 閉: 取水路防潮ゲート天端T.P.+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(T.P.±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

4-1-3. 海底地すべりによる津波評価

海底地すべりによる津波水位の評価結果(警報が発表されない場合)



数字は、T.P.(m)

	取水路防潮ゲート	水位上昇							水位下降			
		取水路防潮ゲート前面	3,4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3,4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3,4号炉海水ポンプ室	
エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	開	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.5	-0.6	-1.1
	Kinematicモデルによる方法	開	2.0	2.3	2.1	2.2	2.6	1.6	1.8	-1.2	-1.4	-2.2
エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	開	2.2	2.5	2.3	2.4	2.5	1.9	2.1	-1.4	-1.5	-2.1
	Kinematicモデルによる方法	開	3.6	3.9	3.7	3.8	3.8	3.7	4.0	-3.6	-3.7	-3.7
エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	開	1.4	1.8	1.4	1.6	1.8	1.1	1.4	-1.3	-1.4	-2.2
	Kinematicモデルによる方法	開	3.2	3.7	3.3	3.5	3.6	3.7	3.9	-2.4	-2.5	-2.8

- 津波水位計算の結果、各評価点における水位変動は、海底地すべりエリアB(Kinematicモデル)による津波が最も大きい結果となった。
- エリアB(Kinematicモデル)では、各ポンプ室位置で、敷地高さ(T.P.+3.5m)を上回る水位、及び、海水ポンプの取水可能水位(1,2号炉海水ポンプ:T.P.-3.21m、3,4号炉海水ポンプ:T.P.-3.52m)を下回る水位となった。また、エリアC(Kinematicモデル)では、3,4号炉海水ポンプ室で敷地高さ(T.P.+3.5m)を上回る水位となった。

4-1-4. 海底地すべりのうち施設影響が生じる波源の確認

4-1-4. 海底地すべりのうち施設影響が生じる波源の確認

【検討の背景】

- 警報が発表されない場合では、エリアB及びエリアCの最大規模の波源として抽出した海底地すべりによる津波の水位が、敷地高さを上回る、または、海水ポンプの取水可能水位を下回る結果となった。このため、各エリアで規模が2位以下の海底地すべりでも、警報が発表されない場合において敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源がないか確認する。
- この確認では、耐津波設計で設定される潮位のばらつき(水位上昇側:+0.15m、水位下降側:-0.17m)と高潮の裕度(水位上昇側:+0.49m)を津波水位計算結果に加味した値を、敷地高さ及び取水可能水位と比較する。なお、以下では、「潮位のばらつき及び高潮の裕度を加味した値が敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源」のことを「施設影響が生じる波源」と記載する。

【検討内容・結果】

(1) 隠岐トラフ海底地すべりを位置・向きによりエリアA～Cに分類し、各エリアで規模が1位～3位のものを選定する。

⇒ エリアA～Cの最大規模の海底地すべりに加えて、エリアBで規模が2位及び3位の海底地すべりとしてEs-K7及びEs-K6を、エリアCで規模が2位及び3位の海底地すべりとしてEs-T8及びEs-T13を、それぞれ選定した。エリアAについては、最大規模のEs-G3による津波でも施設影響が生じないことから、規模が2位及び3位の海底地すべりは選定しない。

(2) 隠岐トラフ海底地すべりのうち、エリアに関わらず、発電所方向に崩壊するものを選定する。

⇒ 隠岐トラフの海底地すべりはほとんどが発電所から遠ざかる方向に崩壊する形状となっている中で、崩壊の傾向が異なる海底地すべりとして、崩壊方向が発電所方向に近いものを選定した。その結果、エリアAのEs-G101、エリアCのEs-T13及びEs-T14を選定した。

(3) これらの波源による津波の計算結果から、施設影響が生じる波源を確認する。

⇒ (1) 各エリアで規模が1位～3位の海底地すべり及び(2) 発電所方向に崩壊する海底地すべりによる津波水位計算の結果、各評価点における水位変動は、エリアBのEs-K5(Kinematicモデル)が最も大きく、規模が2位・3位の海底地すべりや発電所方向に崩壊する海底地すべりではこれを上回る水位変動は生じない。また、各波源の津波水位計算結果に潮位のばらつき及び高潮の裕度を加味した値と敷地高さ及び海水ポンプの取水可能水位を比較した結果、施設影響が生じる波源は、水位上昇側ではエリアBのEs-K5(Kinematicモデル)とエリアCのEs-T2(Kinematicモデル)、水位下降側ではエリアBのEs-K5(Kinematicモデル)のみであることを確認した。

(1) 各エリアで規模が1位～3位の地すべりの選定

●地すべり地形の規模の算出結果（断面積上位20個）

第314回審査会合
資料1-4-2、p.77抜粋

規模の順位	地すべり地形	エリア	測線	地すべり長さ(m)	地すべり厚さ(m)	地すべり長さ×厚さ(m ²)
1	Es-K5	B	K-120	7,135	128	913,324
2	Es-T2	C	GA-23	8,592	97	833,402
3	Es-T8	C	GA-22	4,374	150	656,141
4	Es-K7	B	K-119	3,618	160	578,850
5	Es-T13	C	GA-20	4,966	116	576,038
6	Es-K6	B	K-120	5,420	103	558,225
7	Es-T14	C	GA-15	8,970	61	547,200
8	Es-K8	B	K-119	6,557	76	498,312
9	Es-K4	B	K-120	4,418	81	357,855
10	Es-K3	B	K-121	7,596	45	341,839
11	Es-T6	C	GA-21	5,343	62	331,267
12	Es-T17	C	GA-11	1,979	158	312,678
13	Es-K2	B	K-120	4,462	67	298,932
14	Es-T15	C	GA-13	8,326	33	274,765
15	Es-K1	B	K-121	5,198	52	270,276
16	Es-G3	A	K-115	6,856	29	198,822
17	Es-G103	A	K-118	6,172	30	185,161
18	Es-T12	C	GA-T	6,284	29	182,237
19	Es-G104	A	K-51	3,584	46	164,876
20	Es-G102	A	K-119	4,413	36	158,864

←エリアBの1位(評価済み:施設影響あり)

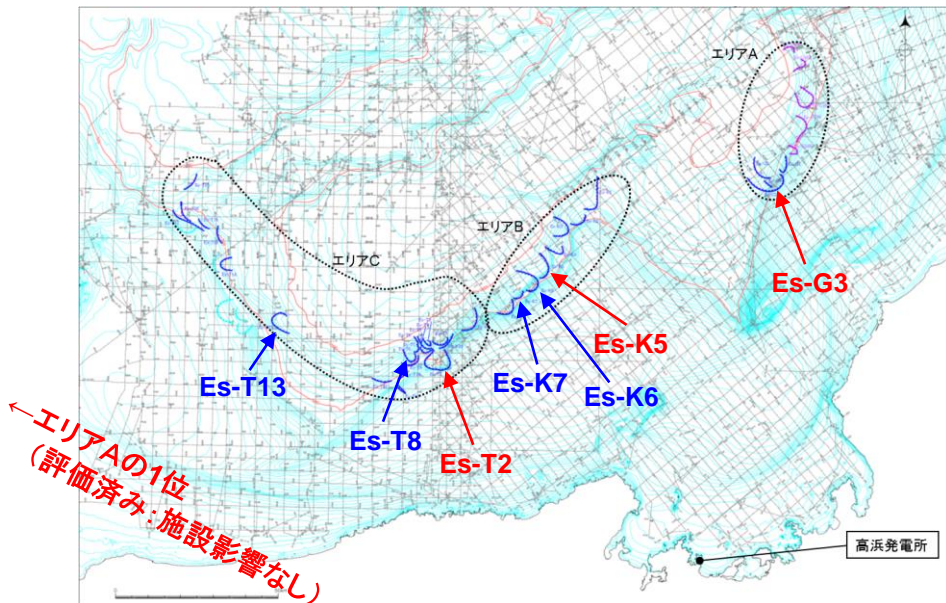
←エリアCの1位(評価済み:施設影響あり)

←エリアCの2位(追加評価:施設影響の有無を確認する)

←エリアBの2位(追加評価:施設影響の有無を確認する)

←エリアCの3位(追加評価:施設影響の有無を確認する)

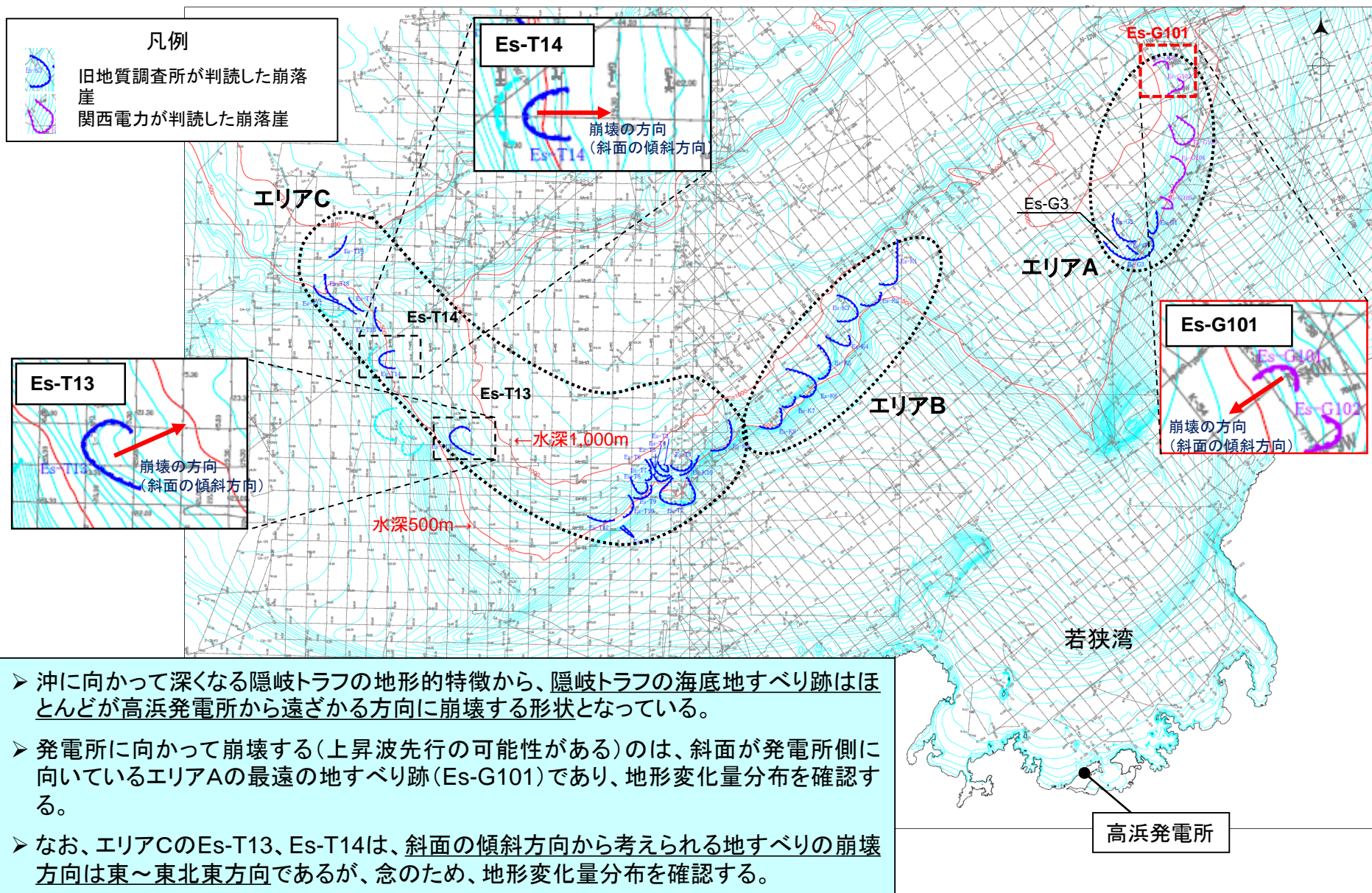
←エリアBの3位(追加評価:施設影響の有無を確認する)



←エリアAの1位
(評価済み:施設影響なし)

- エリアA～Cの最大規模であるEs-G3、Es-K5、Es-T2については評価済みであり、Es-K5及びEs-T2で施設影響が生じることを確認している。
- エリアBの規模2位・3位のEs-K7及びEs-K6、エリアCの規模の2位・3位のEs-T8及びEs-T13を選定し、施設影響の有無を確認する。
- エリアAは最大規模のEs-G3でも施設影響が生じないことから、規模の2位・3位の地すべりの評価は行わない。

(2) 発電所方向に崩壊する地すべりの選定

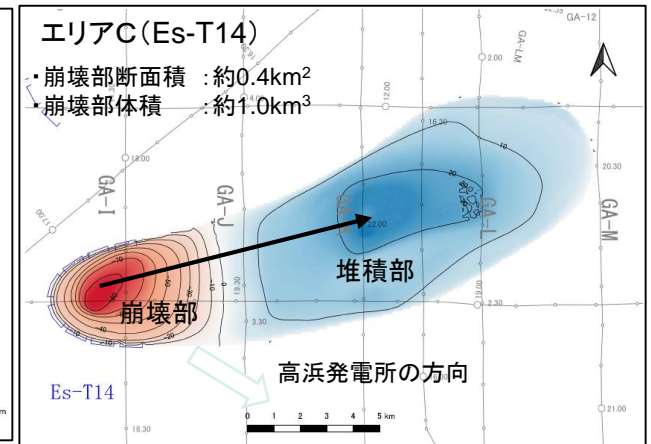
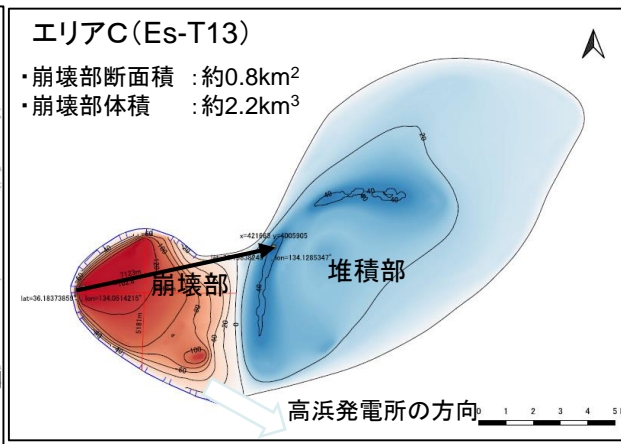
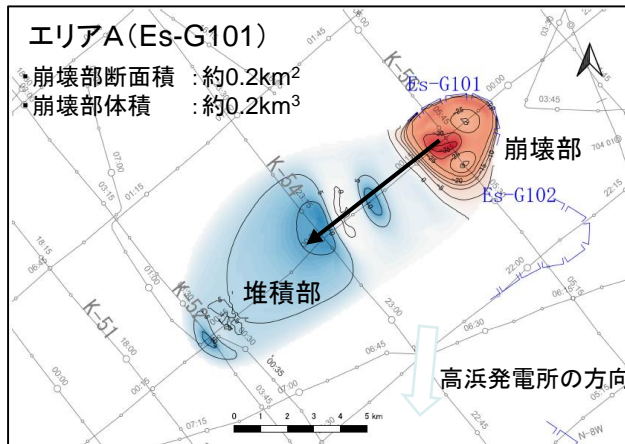


4-1-4. 海底地すべりのうち施設影響が生じる波源の確認

(2) 発電所方向に崩壊する地すべりの選定

● 隠岐トラフ海底地すべりの向き・位置

- 前頁で高浜発電所に向かって崩壊する地すべりとして確認したエリアAのEs-G101について、海上音波探査記録に基づく詳細な地形判読を行い、崩壊部・堆積部の地形変化量分布を確認する。
- また、東向きに崩壊と考えられるエリアCのEs-T13及びEs-T14についても同様に崩壊部・堆積部の地形変化量分布を確認する。



エリアAのEs-G101では、堆積部と崩壊部の位置関係から、南西向きに崩壊となっている。したがって、高浜発電所に向かって崩壊していることになるが、前述のとおり、規模が小さく最遠に位置することから施設影響はないと考えられる。

エリアCのEs-T13では、堆積部と崩壊部の位置関係から、東北東向きに崩壊となっている。したがって、高浜発電所に向かった崩壊にはなっていない。

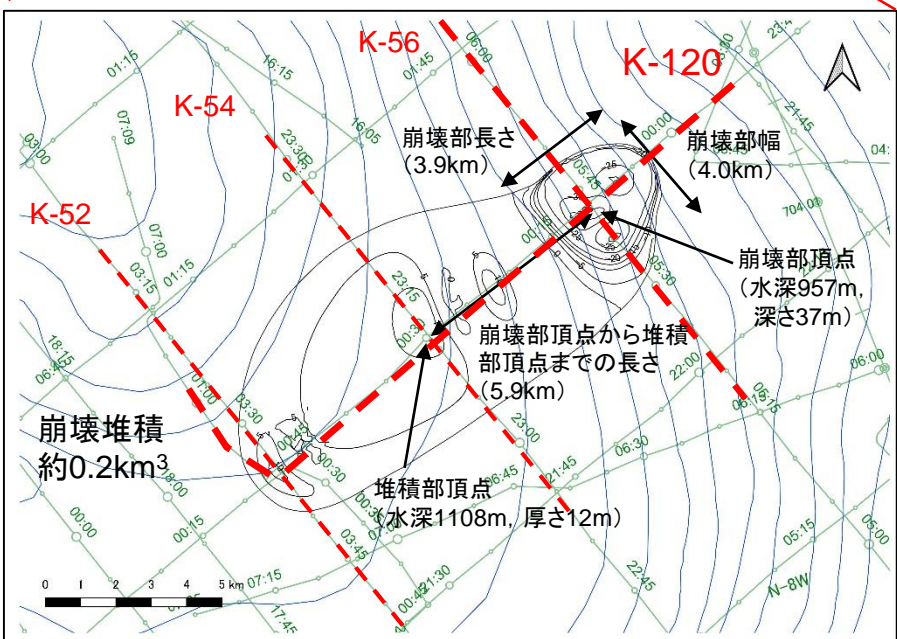
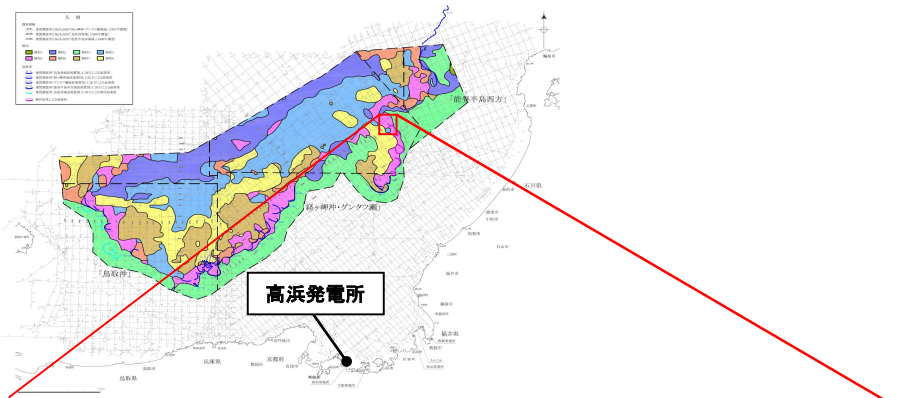
エリアCのEs-T14では、堆積部と崩壊部の位置関係から、東北東向きに崩壊となっている。したがって、高浜発電所に向かった崩壊にはなっていない。

地形変化量分布の確認結果から、発電所方向に崩壊する地すべりはEs-G101のみと考えられる。ただし、隠岐トラフ海底地すべりの網羅性を確認する観点から、今回着目したEs-G101、Es-T13、Es-T14の3か所について、施設影響の有無を確認する。

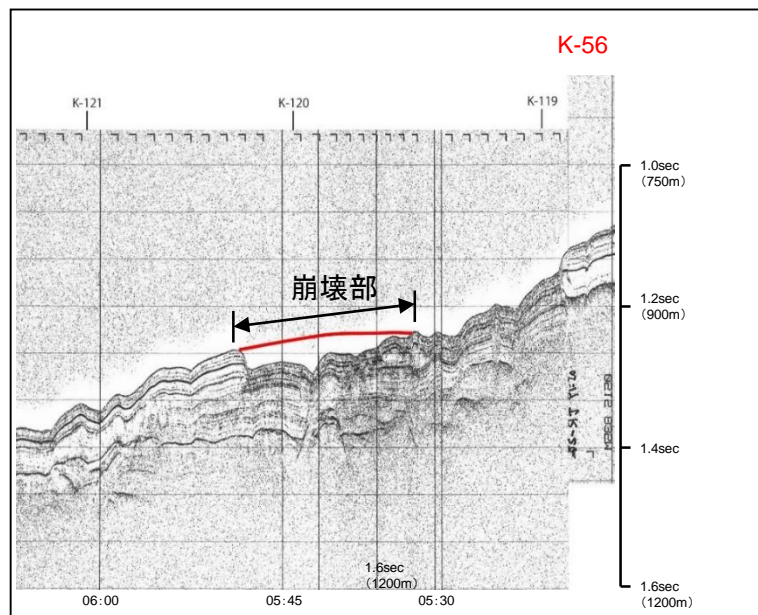
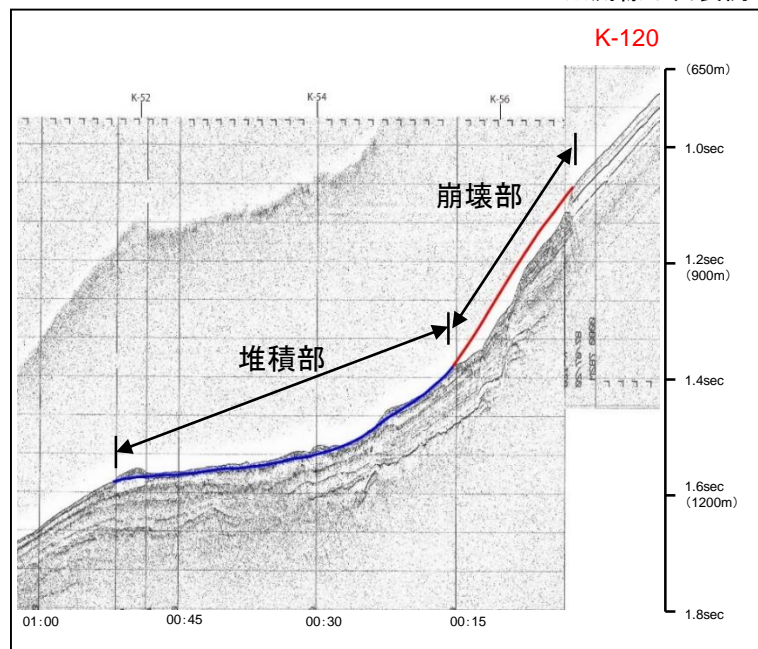
(3) 津波水位計算

●海底地すべり地形変化の算出(エリアA Es-G101)

地すべり地形を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。



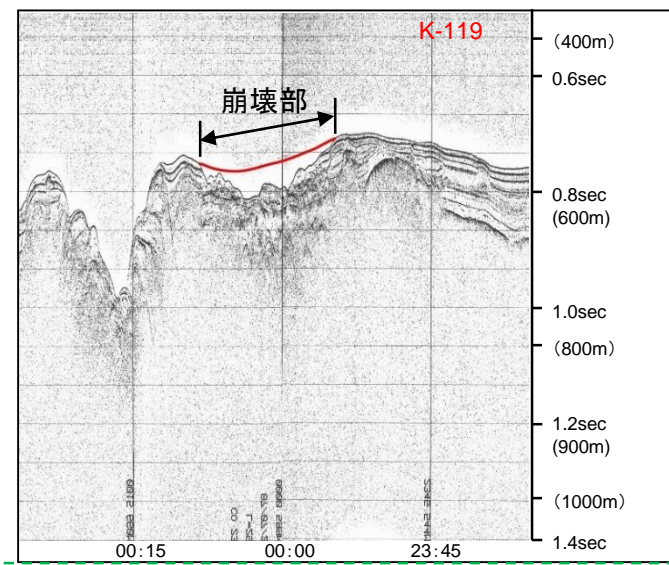
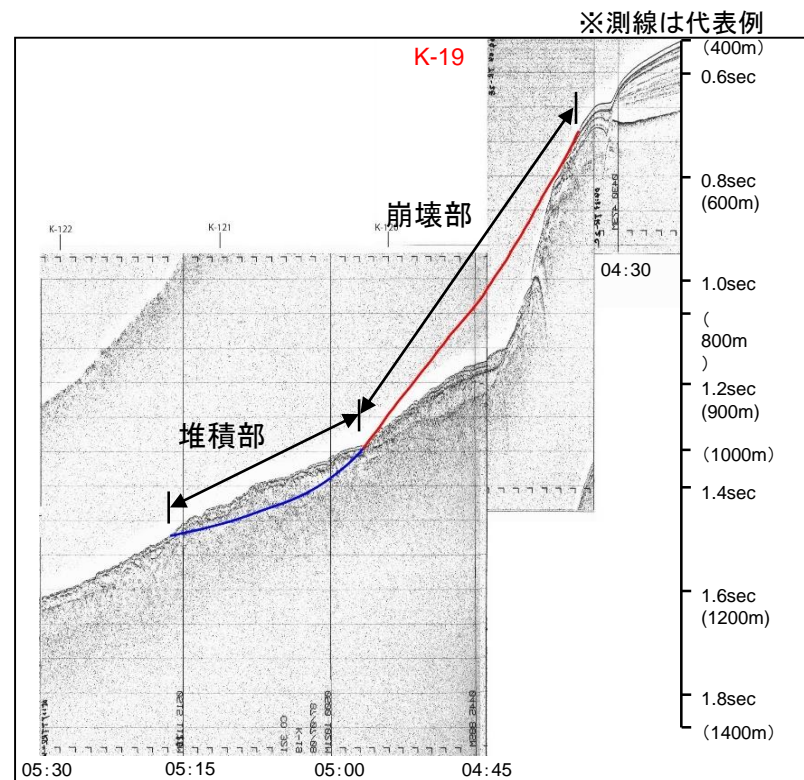
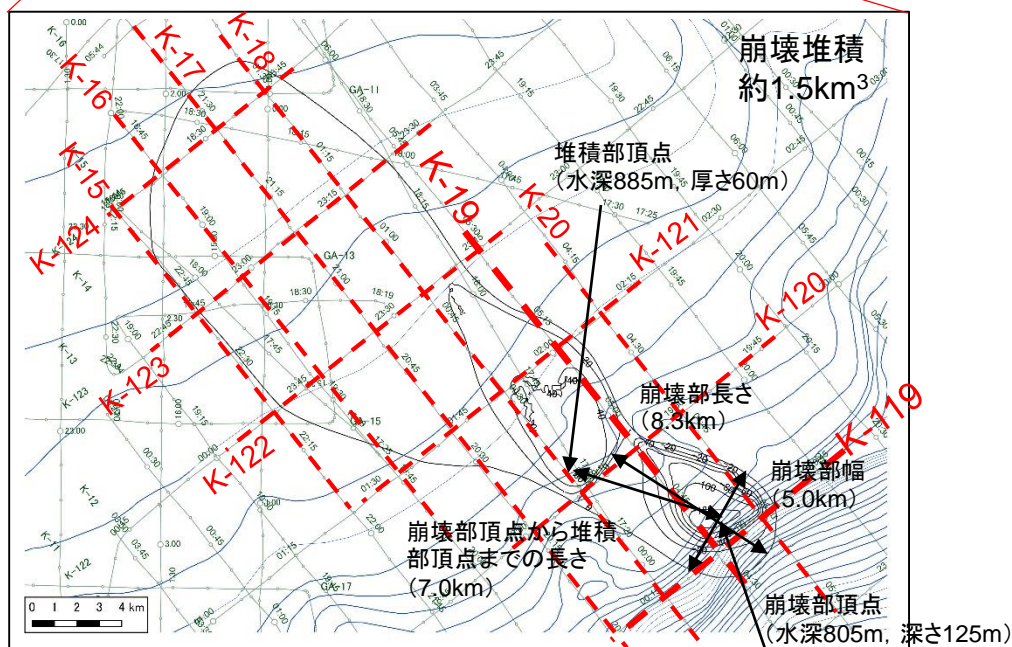
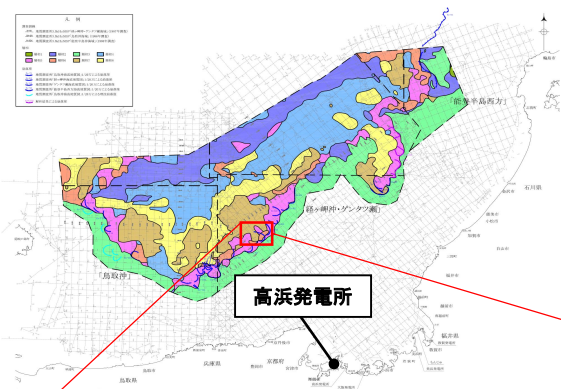
※測線は代表例



(3) 津波水位計算

●海底地すべり地形変化の算出(エリアB Es-K6)

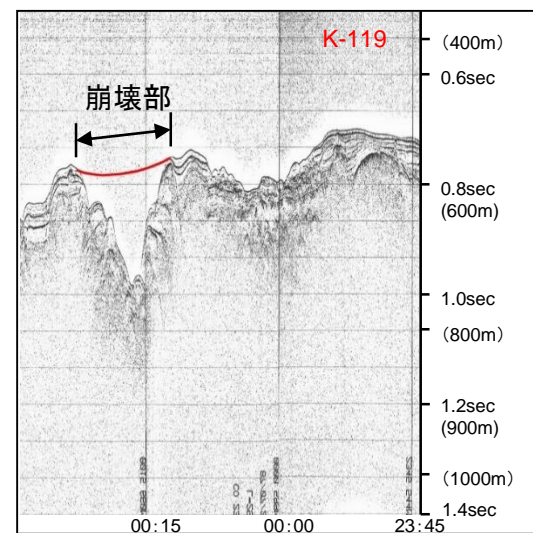
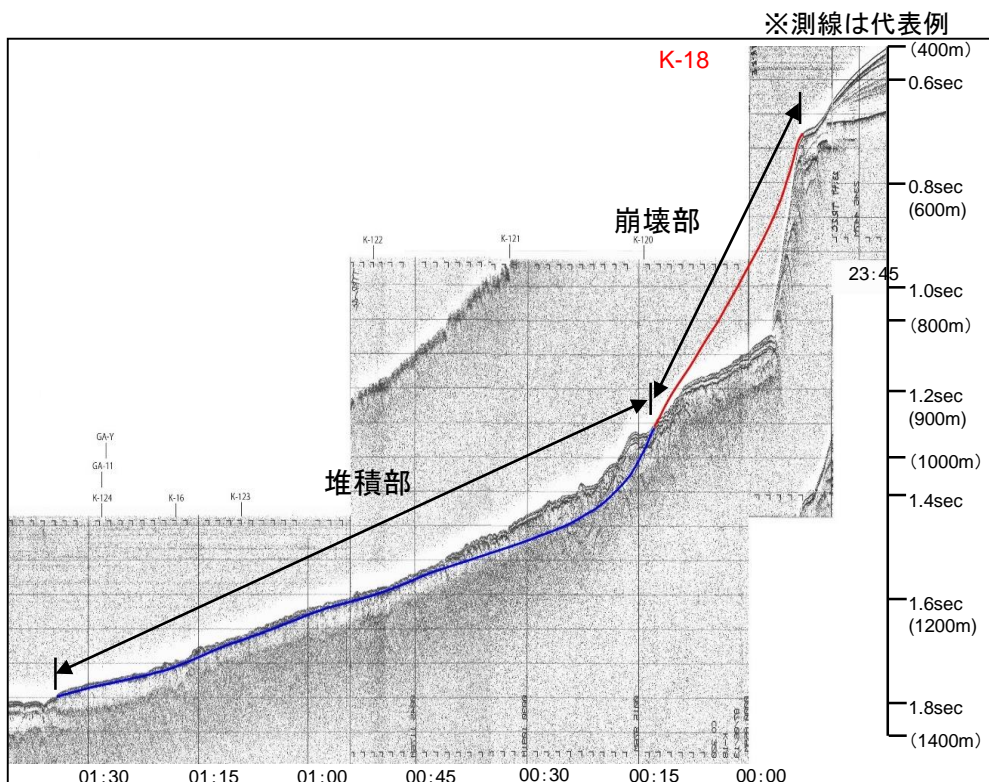
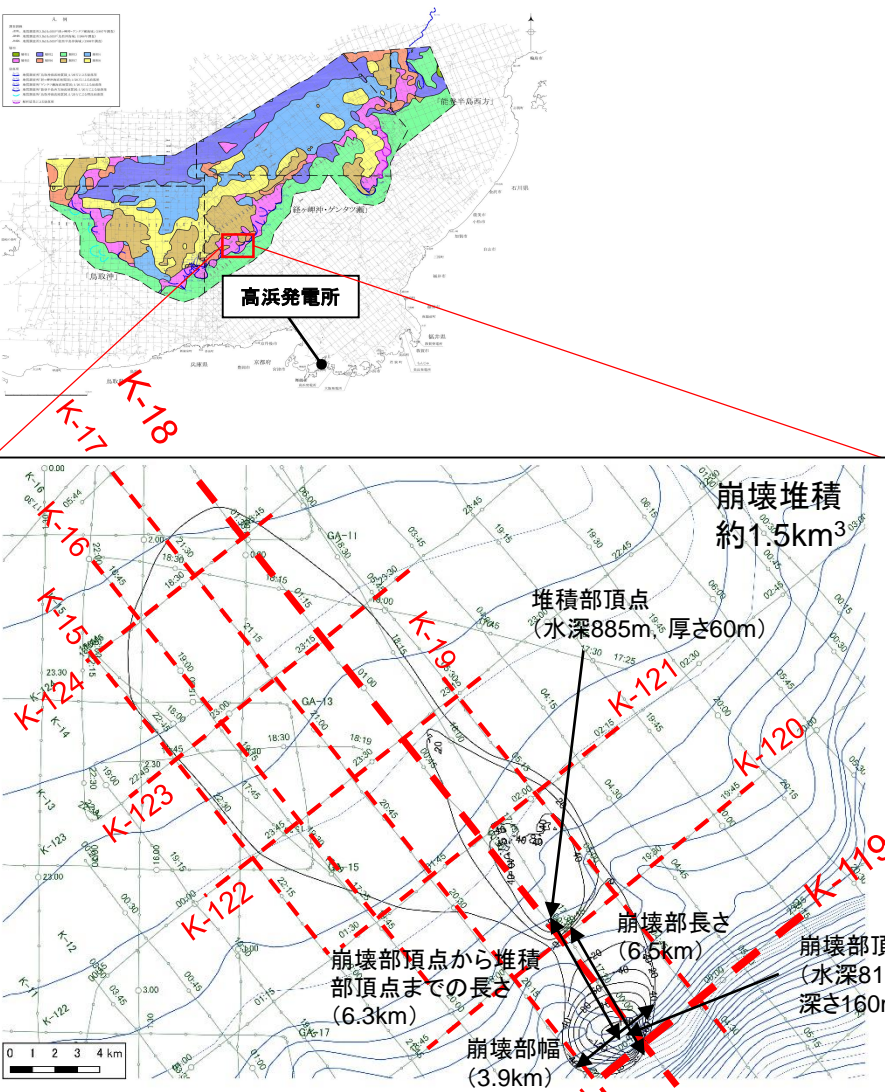
地すべり地形を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。



(3) 津波水位計算

● 海底地すべり地形変化の算出 (エリアB Es-K7)

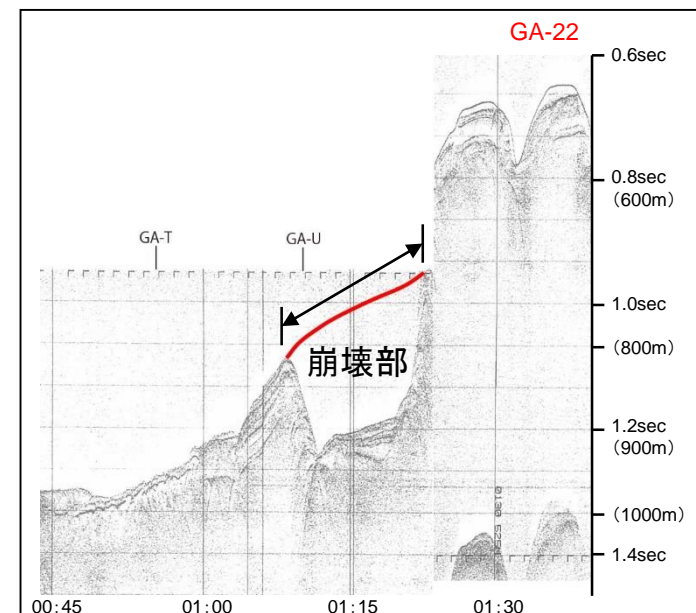
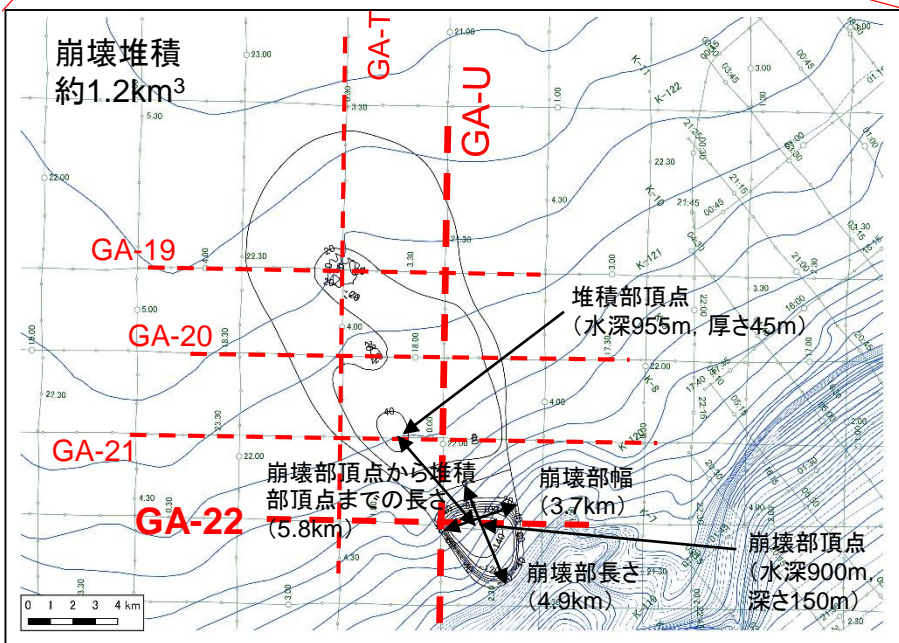
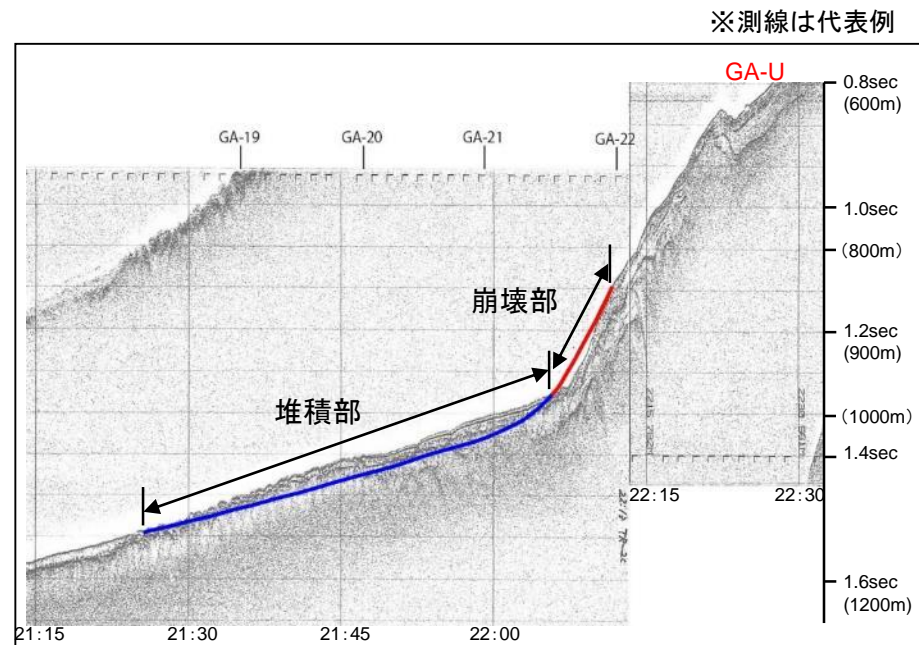
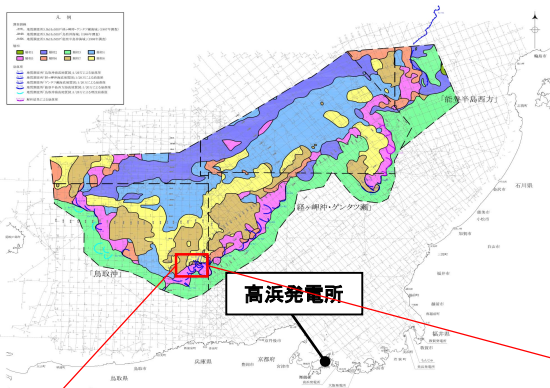
地すべり地形を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。



(3) 津波水位計算

●海底地すべり地形変化の算出(エリアC Es-T8)

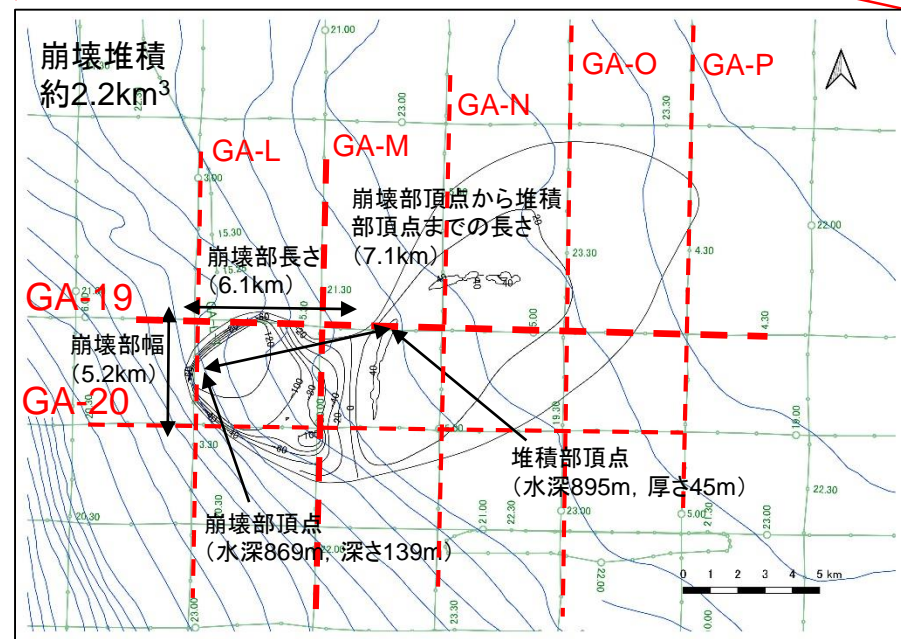
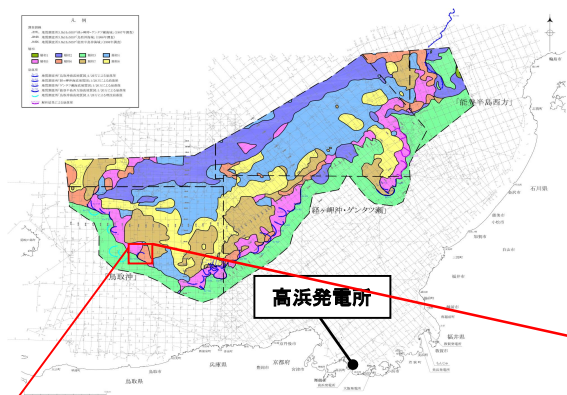
地すべり地形を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。



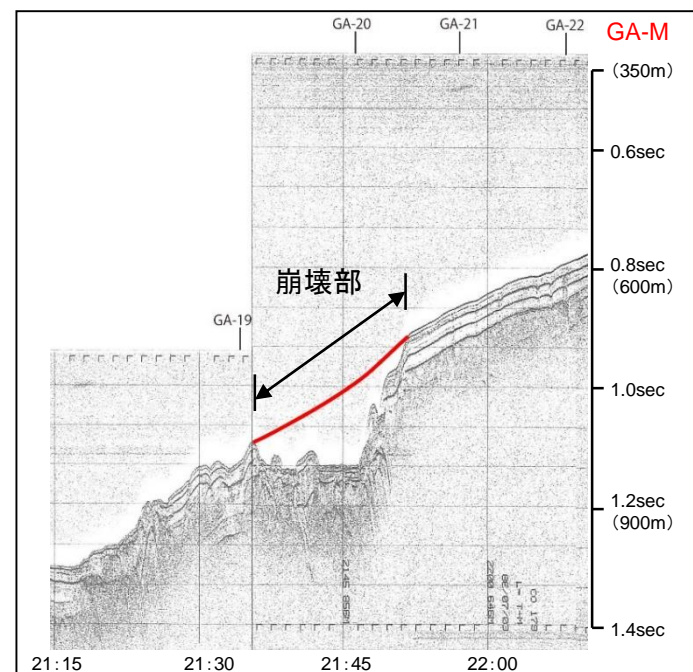
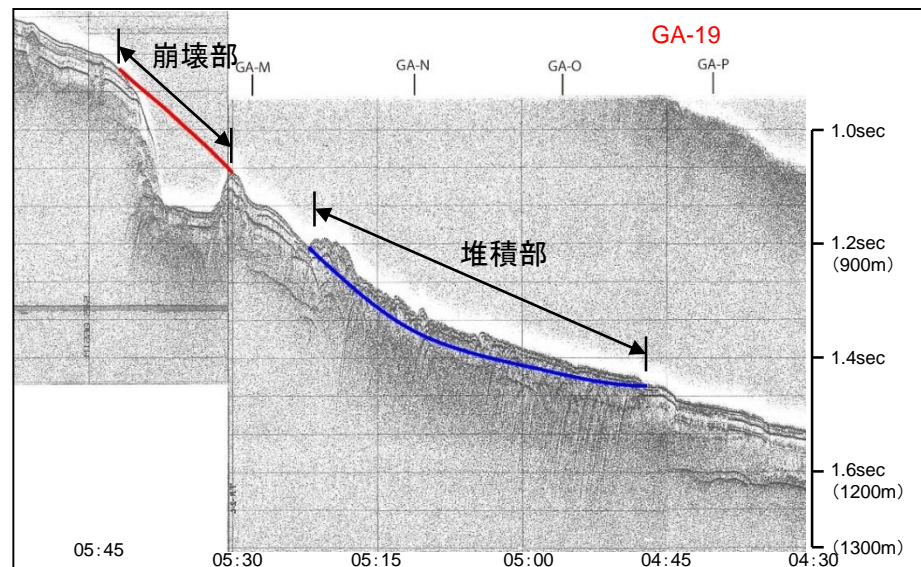
(3) 津波水位計算

●海底地すべり地形変化の算出(エリアC Es-T13)

地すべり地形を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。



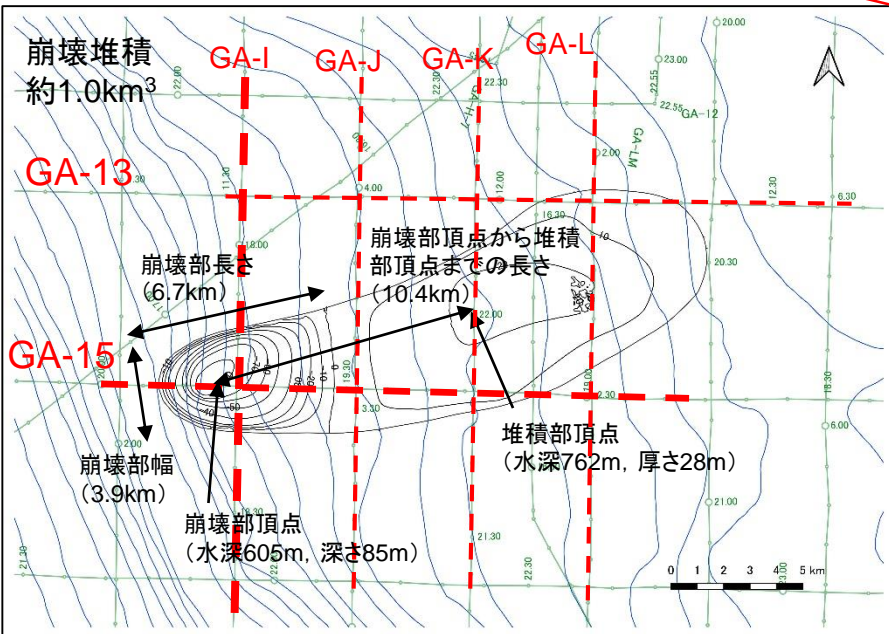
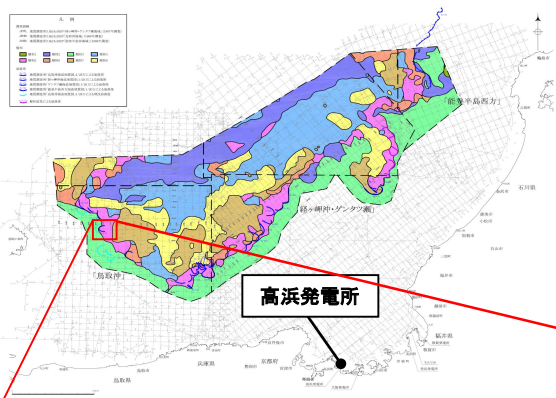
※測線は代表例



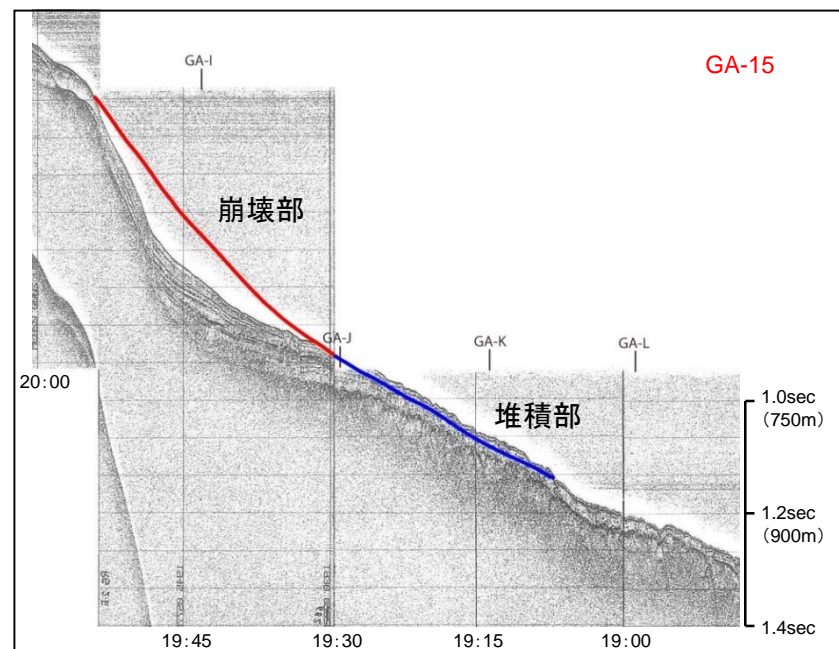
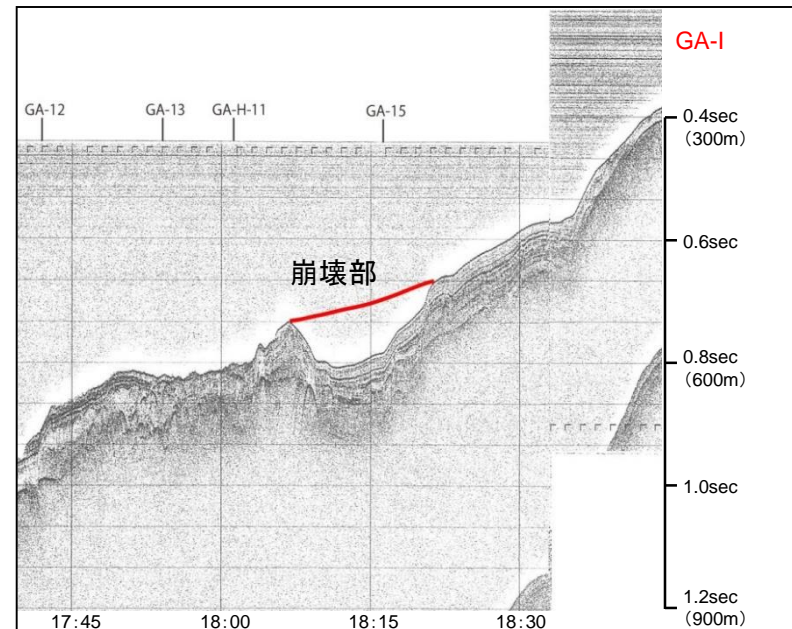
(3) 津波水位計算

●海底地すべり地形変化の算出(エリアC Es-T14)

地すべり地形を通る複数の海上音波探査記録から、崩壊部・堆積部の幅、長さ、標高等を判読し、海底地形変化量分布図を作成した。



※測線は代表例



(3) 津波水位計算

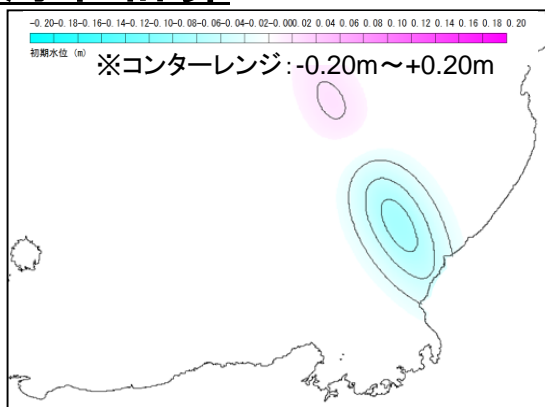
●Watts他の予測式の計算条件

項目	エリアA		エリアB			エリアC				備考
	Es-G3	Es-G101	Es-K5	Es-K6	Es-K7	Es-T2	Es-T8	Es-T13	Es-T14	
$\gamma(-)$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	地質調査所・海洋地質図説明書※1
b (m)	21,200	3,900	9,600	8,300	6,500	7,000	4,900	6,100	6,700	崩壊部長さ※2
T (m)	60	37	130	125	160	150	150	139	85	崩壊部の頂点における崩壊深さ※2
w (m)	3,800	4,000	6,200	5,000	3,870	6,000	3,700	5,200	3,950	崩壊部幅※2
d (m)	590	920	700	680	650	400	750	730	520	崩壊部頂点の水深-崩壊深さ※2
$\theta(\text{deg.})$	1.1	1.6	1.7	1.2	1.2	1.4	1.0	0.6	1.0	崩壊部頂点から堆積部頂点の距離と、崩壊高さで崩壊前における堆積部頂点の水深から算出※2
g (m/s ²)	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
S	17,700	5,900	15,200	7,000	6,270	5,900	5,800	7,100	10,400	崩壊部頂点から堆積部頂点の距離※2
S ₀	8,850	2,950	7,600	3,500	3,135	2,950	2,900	3,550	5,200	S/2
Cn	0.009	0.057	0.086	0.051	0.095	0.072	0.145	0.106	0.079	=S ₀ / (Rcos θ)
R(m)	936,333	51,385	88,615	68,890	33,008	40,833	20,008	33,462	66,015	=b ² / 8T
a ₀ (m ² /s)	0.015	0.094	0.140	0.083	0.155	0.118	0.237	0.173	0.129	=S ₀ / t ₀ ²
t ₀ (sec)	757	177	233	205	142	158	111	143	201	= $\sqrt{(R/g)\sqrt{\gamma+Cm}/(\gamma-1)}$
λ_0 (m)	57,573	16,842	19,292	16,765	11,346	9,899	9,489	12,106	14,352	=t ₀ \sqrt{gd}
$\Delta\Phi(\text{rad})$	0.019	0.115	0.172	0.102	0.190	0.144	0.290	0.212	0.158	2S ₀ / R
u _{max} (m/s)	11.69	16.64	32.63	17.04	22.05	18.66	26.20	24.80	25.87	=S ₀ / t ₀
ΔX (m)	28,786	8,421	9,646	8,383	5,673	4,950	4,744	6,053	7,176	= λ_0 / 2
κ'	0.687	0.680	0.625	0.777	0.715	0.898	0.663	0.680	0.684	

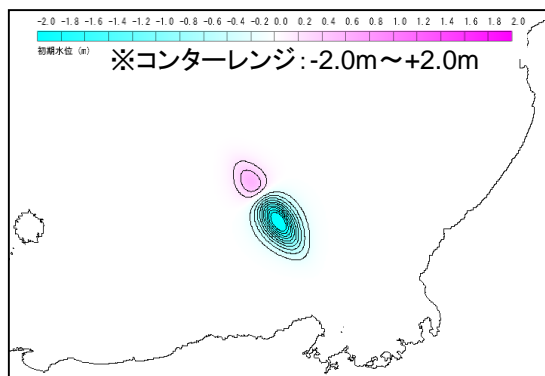
項目	波源振幅の推定値								
	エリアA		エリアB			エリアC			
	Es-G3	Es-G101	Es-K5	Es-K6	Es-K7	Es-T2	Es-T8	Es-T13	Es-T14
$\eta_{0,2D}$ (m)	1.12	0.41	9.79	3.41	6.88	9.65	5.96	4.73	4.72
$\eta_{0,3D}$ (m)	0.07	0.08	2.38	0.78	1.75	3.64	1.67	1.42	1.02

※1 : 片山肇、佐藤幹夫、池原研「海洋地質図 38 経ヶ岬沖表層堆積図説明書 1:200,000」平成5年 地質調査所
 ※2 : 地すべり地形からの図読による値

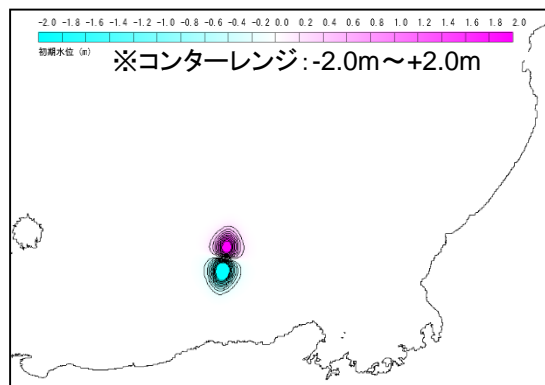
(3) 津波水位計算 ●Watts他の予測式による初期水位波形



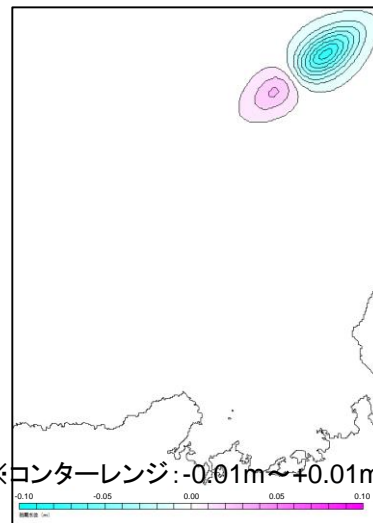
エリアA (Es-G3)



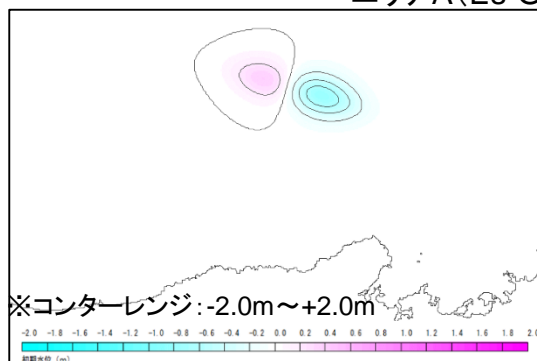
エリアB (Es-K5)



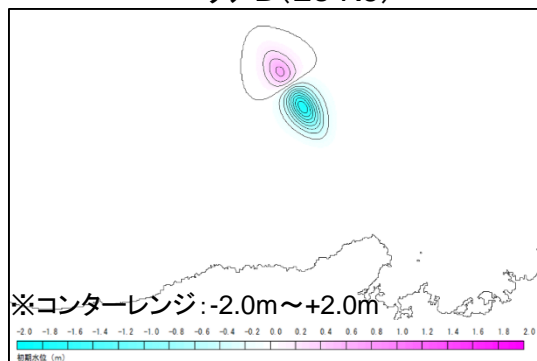
エリアC (Es-T2)



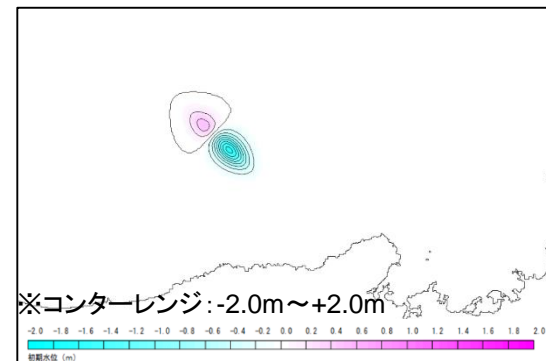
エリアA (Es-G101)



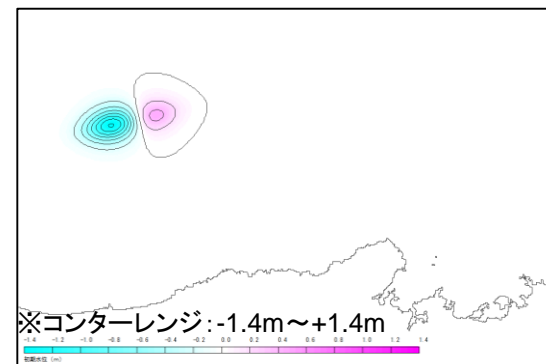
エリアB (Es-K6)



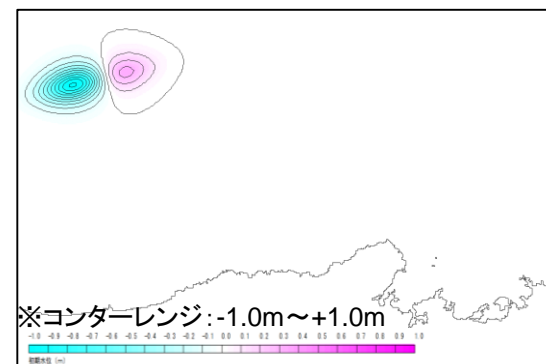
エリアB (Es-K7)



エリアC (Es-T8)



エリアC (Es-T13)



エリアC (Es-T14)

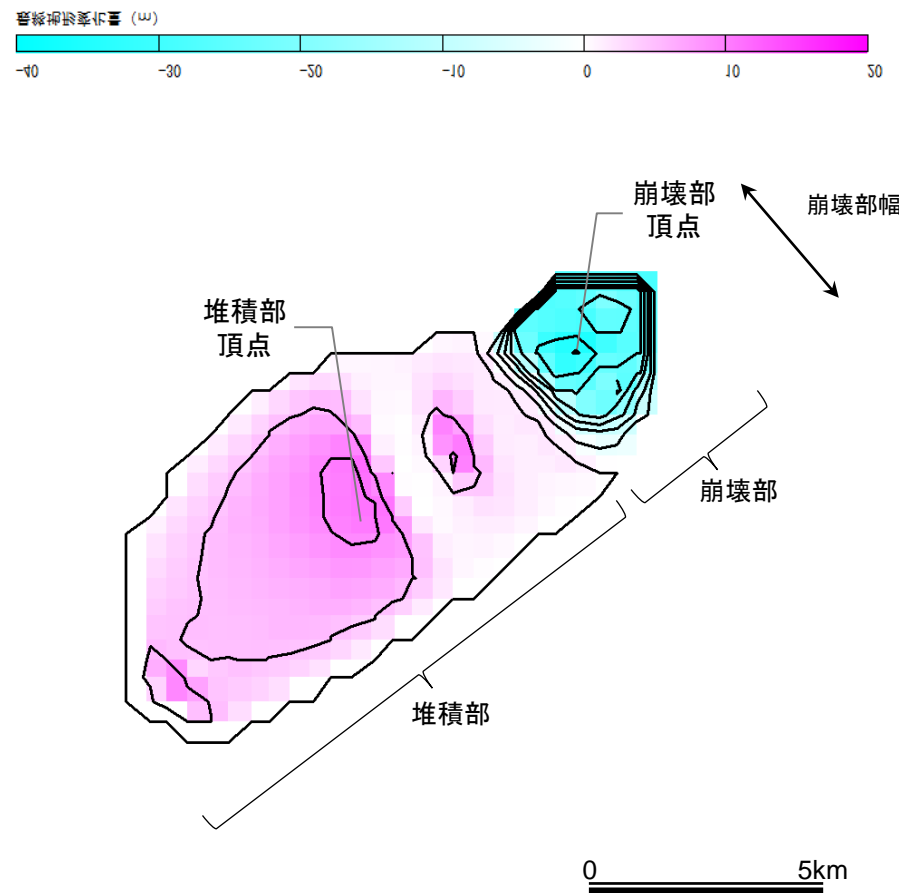
(3) 津波水位計算

● Kinematicモデルの計算条件

エリアA(Es-G101)

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度(基本ケース)	0.5m/s※1
破壊継続時間(基本ケース)	1分※2
(参考)地すべり終了時間	867秒※3

【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)



※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

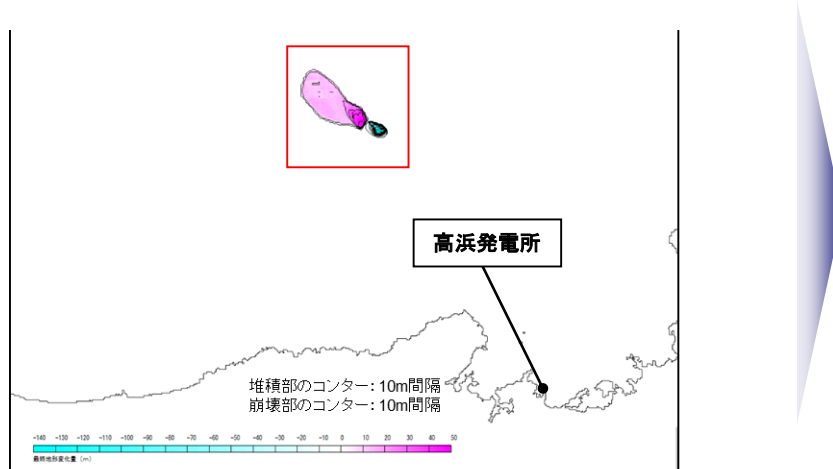
※3 地すべり終了時間 = 地すべり伝播到達時間807秒 (地すべりの標高差403.5m ÷ 鉛直方向破壊伝播速度0.5m/s) + 破壊継続時間1分(60秒) = 867秒

(3) 津波水位計算

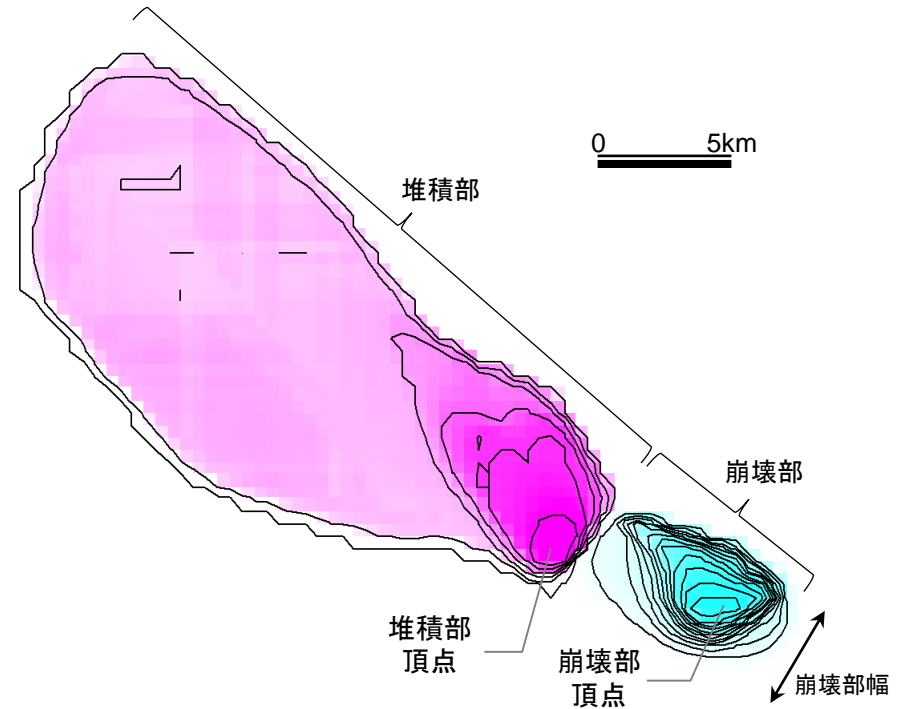
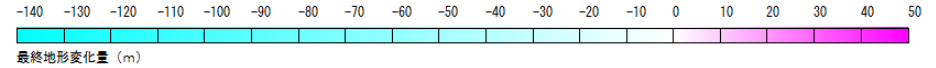
● Kinematicモデルの計算条件

エリアB (Es-K6)

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度(基本ケース)	0.4m/s※1
破壊継続時間(基本ケース)	5分※2
(参考)地すべり終了時間	2,364秒※3



【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)



※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

※3 地すべり終了時間＝地すべり伝播到達時間2,064秒(地すべりの標高差825.5m÷鉛直方向破壊伝播速度0.4m/s)＋破壊継続時間5分(300秒)=2,364秒

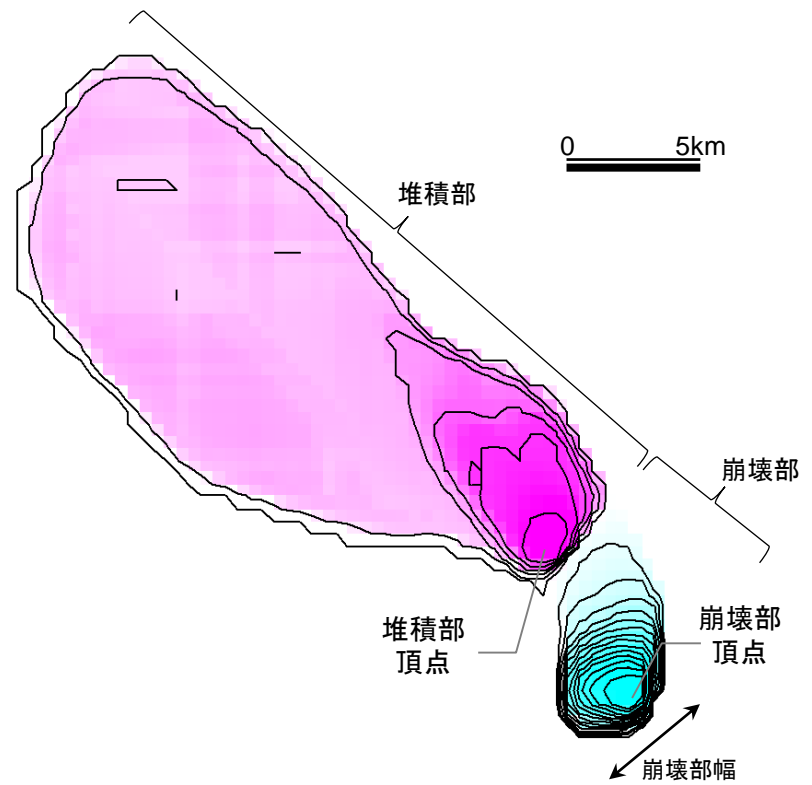
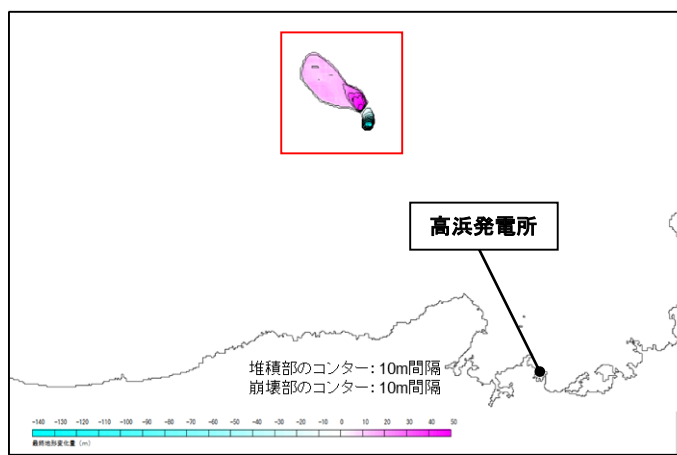
(3) 津波水位計算

● Kinematicモデルの計算条件

エリアB(Es-K7)

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度(基本ケース)	0.5m/s※1
破壊継続時間(基本ケース)	5分※2
(参考)地すべり終了時間	1,787秒※3

【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)



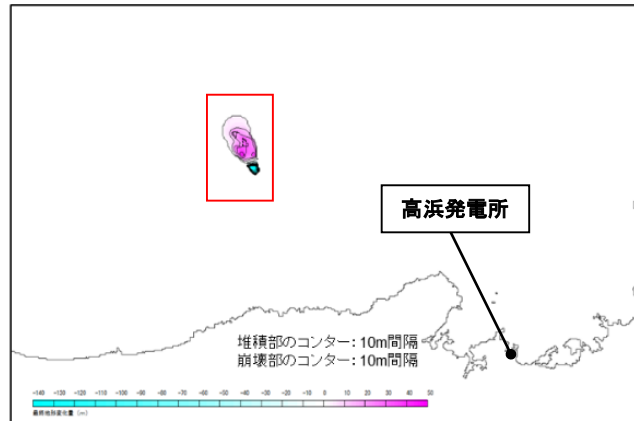
※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。
 ※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。
 ※3 地すべり終了時間=地すべり伝播到達時間1,487秒(地すべりの標高差743.7m÷鉛直方向破壊伝播速度0.5m/s)+破壊継続時間5分(300秒)=1,787秒

(3) 津波水位計算

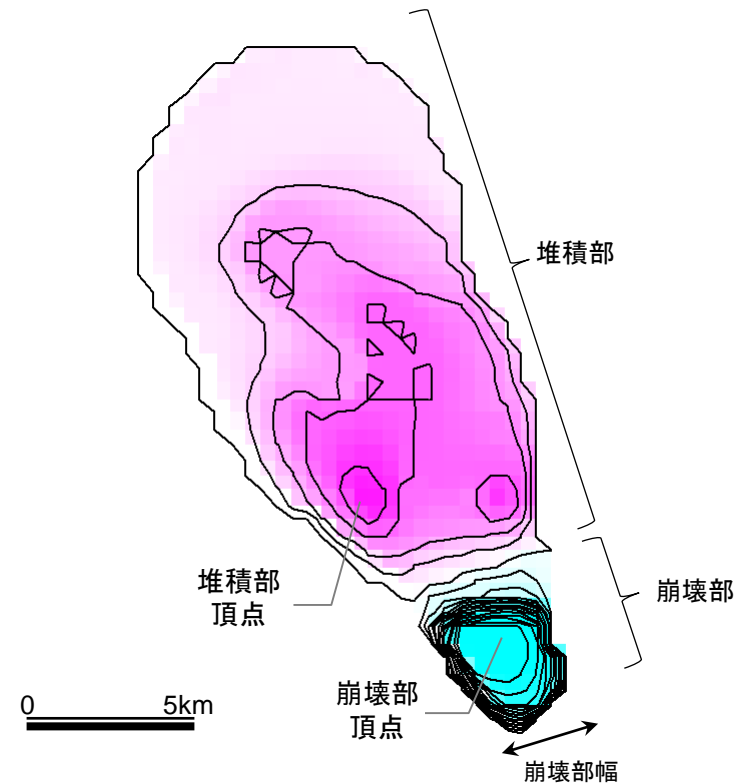
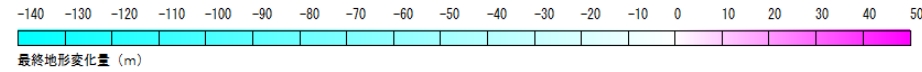
● Kinematicモデルの計算条件

エリアC(Es-T8)

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度(基本ケース)	0.5m/s※1
破壊継続時間(基本ケース)	5分※2
(参考)地すべり終了時間	1,397秒※3



【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)



※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

※3 地すべり終了時間=地すべり伝播到達時間1,097秒(地すべりの標高差548.7m÷鉛直方向破壊伝播速度0.5m/s)+破壊継続時間5分(300秒)=1,397秒

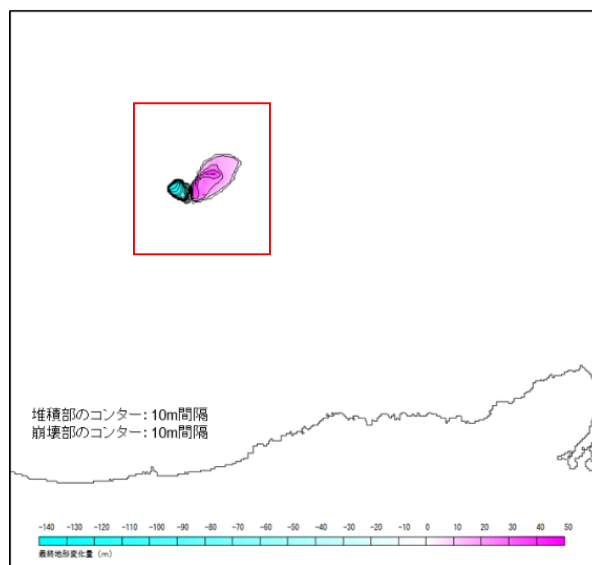
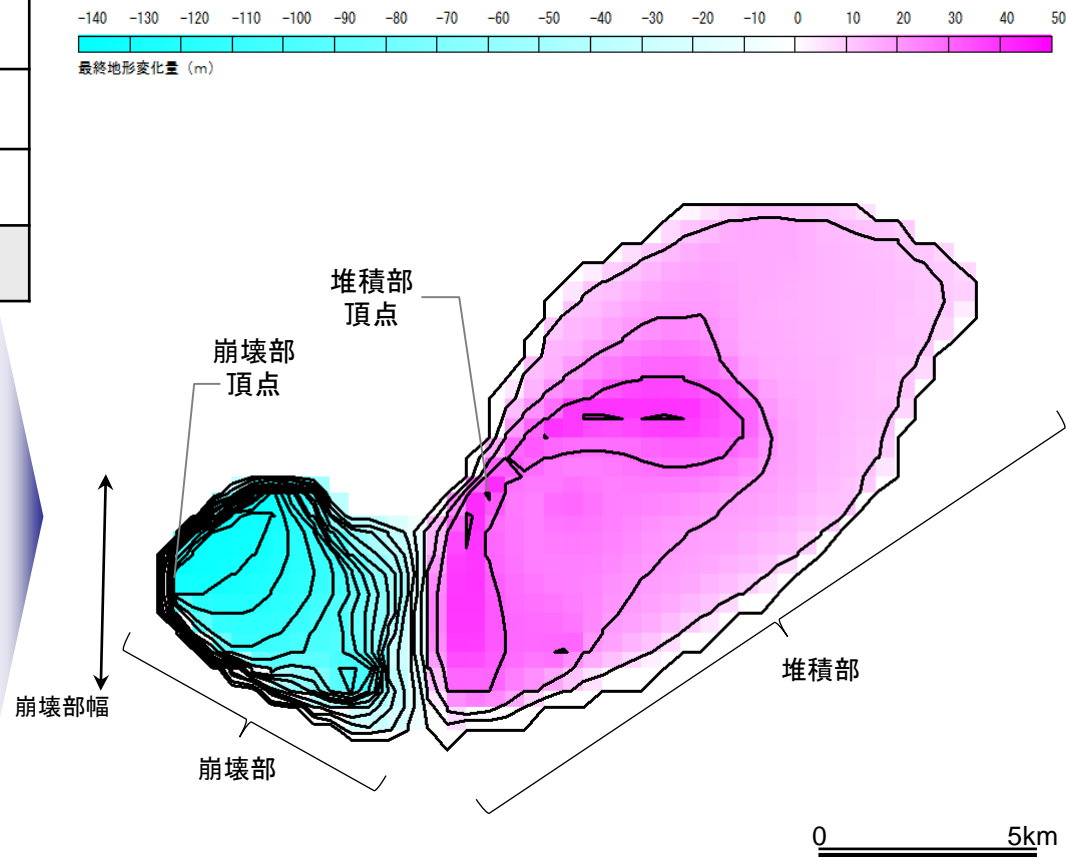
4-1-4. 海底地すべりのうち施設影響が生じる波源の確認

(3) 津波水位計算

● Kinematicモデルの計算条件

エリアC(Es-T13)

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度(基本ケース)	0.3m/s※1
破壊継続時間(基本ケース)	7分※2
(参考)地すべり終了時間	1,716秒※3

【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)

※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

※3 地すべり終了時間=地すべり伝播到達時間1,296秒(地すべりの標高差388.9m÷鉛直方向破壊伝播速度0.3m/s)+破壊継続時間7分(420秒)=1,716秒

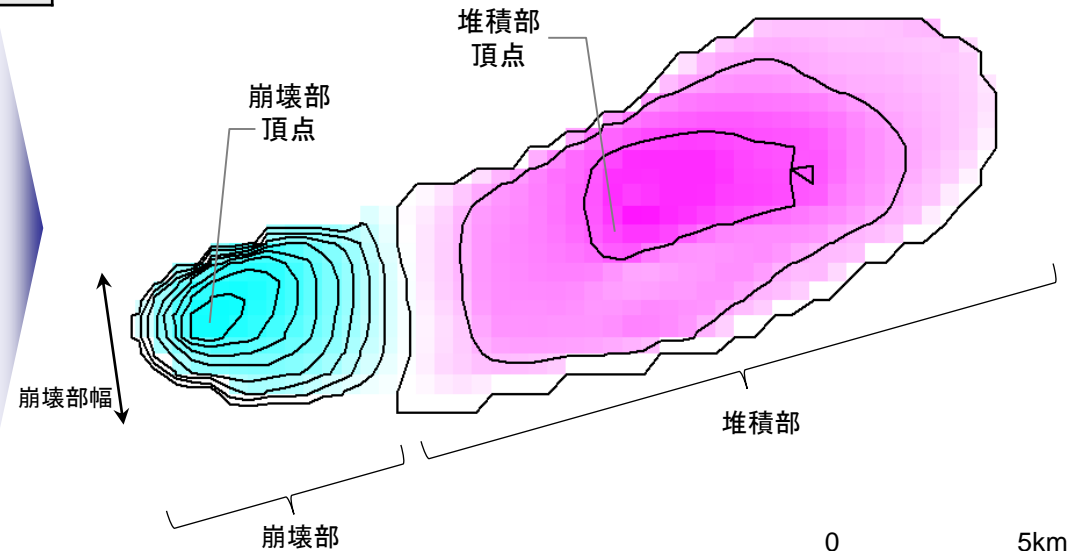
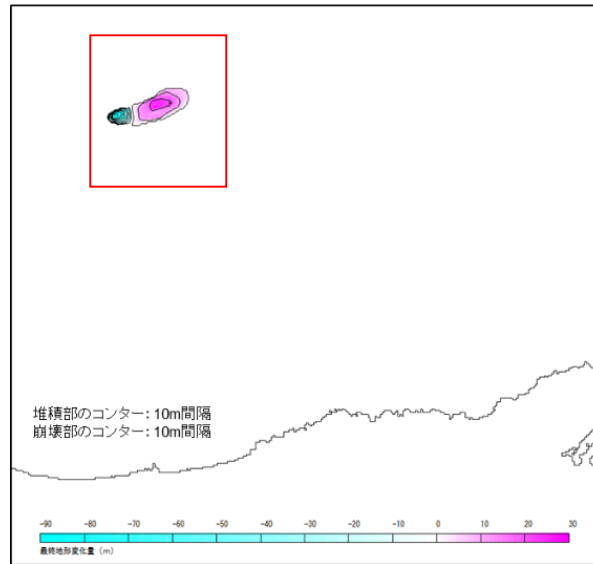
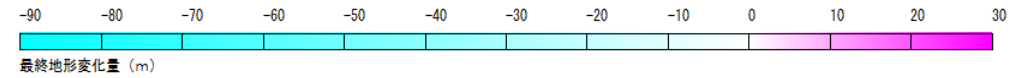
(3) 津波水位計算

● Kinematicモデルの計算条件

エリアC (Es-T14)

項目	設定値
設定位置格子サイズ	450m
鉛直方向破壊伝播速度(基本ケース)	0.5m/s※1
破壊継続時間(基本ケース)	2分※2
(参考)地すべり終了時間	1,361秒※3

【海底地形変化量分布図】
(Kinematicモデルへの入力コンター)



※1 破壊伝播速度の鉛直成分として設定した。

※2 地形変化の速度が鉛直方向破壊伝播速度を超えない範囲で最大となるよう破壊継続時間を設定した。

※3 地すべり終了時間＝地すべり伝播到達時間1,241秒(地すべりの標高差620.4m÷鉛直方向破壊伝播速度0.5m/s)＋破壊継続時間2分(120秒)=1,361秒

(3) 津波水位計算

● 計算結果

エリアA～Cの各エリアの規模1位～3位の地すべり及びエリアに関わらず発電所方向に崩壊する地すべりによる津波水位計算結果を示す。
(崩壊規模及び破壊伝播速度は最大値で設定している。)

数字は、T.P.(m)

海底地すべり(警報なし)			取水路 防潮 ゲート	水位上昇						水位下降			
				取水路 防潮ゲート 前面	3,4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3,4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3,4号炉 海水 ポンプ室
エリアA	Es-G3 (規模1位)	Watts他の予測式	開	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.5	-0.6	-1.1
		Kinematicモデルによる方法	開	2.0	2.3	2.1	2.2	2.6	1.6	1.8	-1.2	-1.4	-2.2
	Es-G101 (発電所方向)	Watts他の予測式	開	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.4	-0.5	-1.1
		Kinematicモデルによる方法	開	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1	0.8	0.9	-0.6	-0.7	-1.3
エリアB	Es-K5 (規模1位)	Watts他の予測式	開	2.2	2.5	2.3	2.4	2.5	1.9	2.1	-1.4	-1.5	-2.1
		Kinematicモデルによる方法	開	3.6	3.9	3.7	3.8	3.8	3.7	4.0	-3.6	-3.7	-3.7
	Es-K7 (規模2位)	Watts他の予測式	開	1.4	1.7	1.5	1.5	1.7	1.1	1.2	-0.9	-1.0	-1.6
		Kinematicモデルによる方法	開	2.1	2.3	2.1	2.2	2.6	2.2	2.4	-1.5	-1.6	-2.4
	Es-K6 (規模3位)	Watts他の予測式	開	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	-0.7	-0.8	-1.3
		Kinematicモデルによる方法	開	2.0	2.3	2.1	2.1	2.3	1.7	1.9	-1.4	-1.5	-2.2
エリアC	Es-T2 (規模1位)	Watts他の予測式	開	1.4	1.8	1.4	1.6	1.8	1.1	1.4	-1.3	-1.4	-2.2
		Kinematicモデルによる方法	開	3.2	3.7	3.3	3.5	3.6	3.7	3.9	-2.4	-2.5	-2.8
	Es-T8 (規模2位)	Watts他の予測式	開	1.3	1.7	1.2	1.3	1.6	0.9	1.1	-1.0	-1.0	-1.7
		Kinematicモデルによる方法	開	1.8	2.1	1.9	2.0	2.1	2.4	2.5	-1.7	-1.9	-2.6
	Es-T13 (規模3位、発電 所方向)	Watts他の予測式	開	0.9	1.2	0.9	1.0	1.3	0.9	0.9	-0.6	-0.7	-1.3
		Kinematicモデルによる方法	開	1.8	2.0	1.8	1.8	2.1	2.3	2.4	-1.5	-1.6	-2.3
Es-T14 (発電所方向)	Watts他の予測式	開	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	-0.6	-0.7	-1.2	
	Kinematicモデルによる方法	開	2.0	2.4	2.1	2.2	2.4	1.9	2.0	-1.5	-1.6	-2.1	

津波水位計算の結果、各評価点における水位変動は、エリアBのEs-K5(Kinematicモデル)が最も大きく、規模2位・3位の地すべりや発電所方向に崩壊する地すべりではこれを上回る水位変動は生じない。

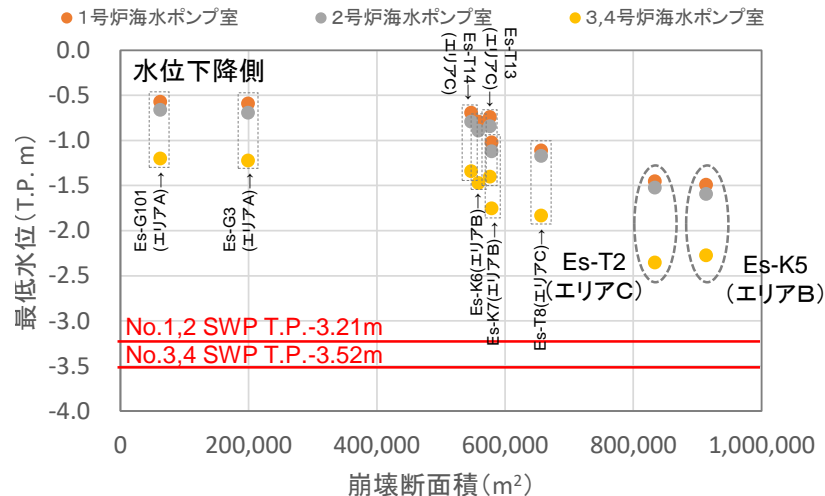
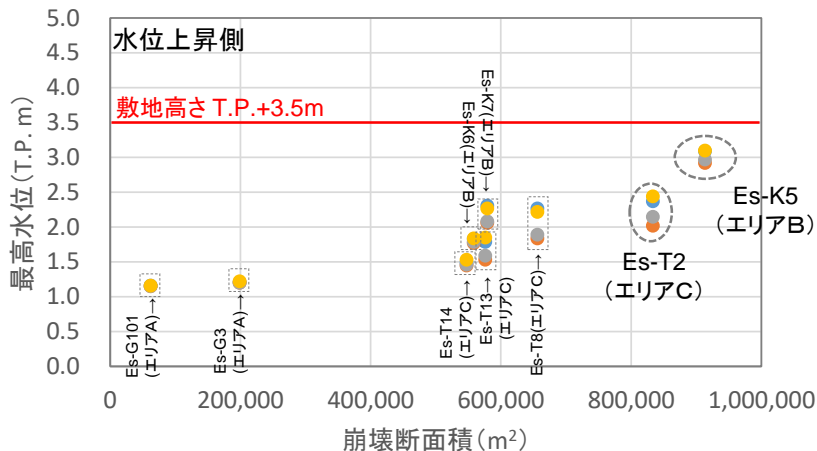
(3) 津波水位計算

●施設影響が生じるケースの確認

施設影響を確認するため、崩壊断面積と水位(上昇側:ばらつき+0.15m及び高潮裕度+0.49m考慮、下降側:ばらつき-0.17m考慮)の関係を整理した。

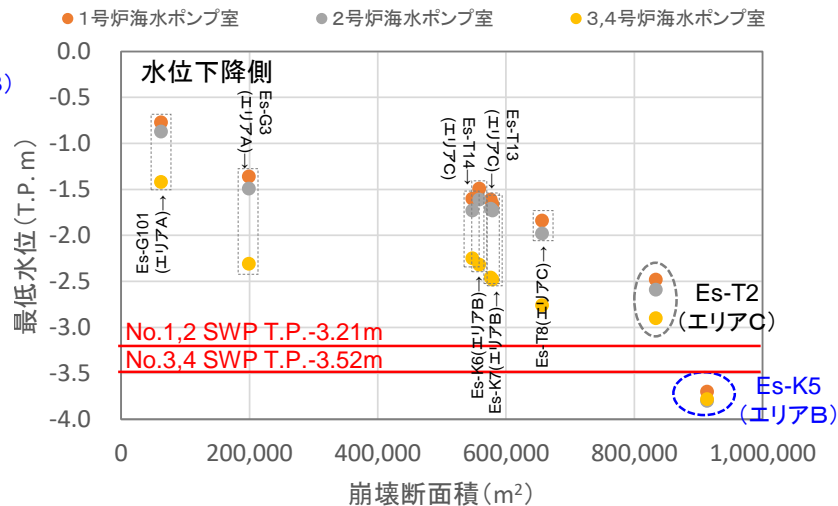
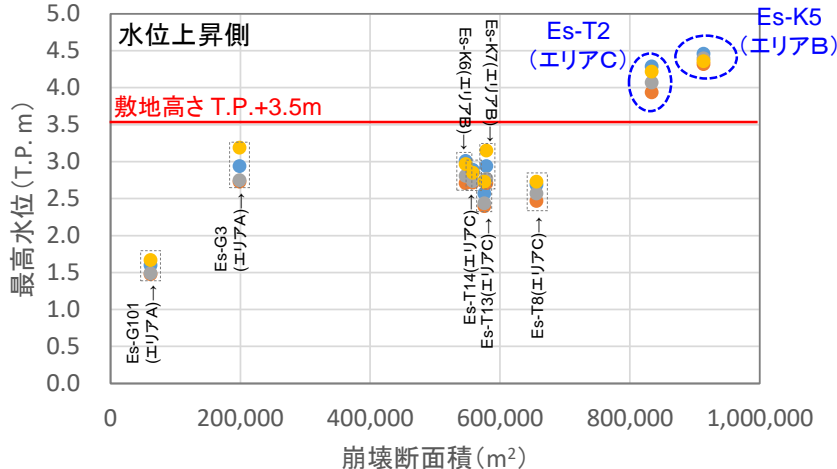
●Watts他の予測式

●3,4号炉循環水ポンプ室 ●1号炉海水ポンプ室 ●2号炉海水ポンプ室 ●3,4号炉海水ポンプ室



●Kinematicモデルによる方法

●3,4号炉循環水ポンプ室 ●1号炉海水ポンプ室 ●2号炉海水ポンプ室 ●3,4号炉海水ポンプ室



- エリアの違いや崩壊の向きによる傾向の差異は見られず、崩壊断面積が大きいほど最高水位は高く、最低水位は低くなっている。
- 施設影響が生じるのは、水位上昇側ではEs-K5(Kinematicモデル)とEs-T2(Kinematicモデル)、水位下降側ではEs-K5(Kinematicモデル)である。

4-2. 陸上の斜面崩壊(地すべり)に起因する津波評価

4-2. 陸上の斜面崩壊(地すべり)に起因する津波評価 津波の要因となる陸上の斜面崩壊(地すべり)の選定過程

STEP1

防災科研による地すべり地形分布図データベースに示されている地すべり地形のうち、発電所から半径約10km以内にある地すべり地形を対象とする。

STEP2

対象となる範囲のうち、発電所に影響のある津波を発生させる地すべりが存在するエリアを抽出。
○海沿いにあり、滑落した場合に海に突入する可能性がある。
○大規模で発電所に影響する津波を発生させる可能性があるもの、小規模であるが発電所に近い地すべりが存在する。

STEP3

対象エリアの地すべりについて、空中写真・航空レーザー測量結果による判読を実施。
判読結果と防災科研による評価も参考にして、現地踏査を実施し、津波要因となり得る地すべり地形を抽出。

STEP4

STEP3で抽出された地すべりに対して、Huber他(1997)^{*}による水位予測式を用いたスクリーニングを実施して、詳細検討を実施する地すべり地形を抽出。

抽出された地すべりに対して、津波水位の検討を行う。

^{*}: Huber, A. and W.H. Hager(1997): Forecasting impulse waves in reservoirs. Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages C31:993-1005. Florence, Italy. Commission International des Grands Barrages, Paris.

STEP1

評価対象エリアの抽出

防災科研による地すべり地形分布図データベースに示されている地すべり地形のうち、発電所から半径約10km以内にある地すべり地形を対象とする。

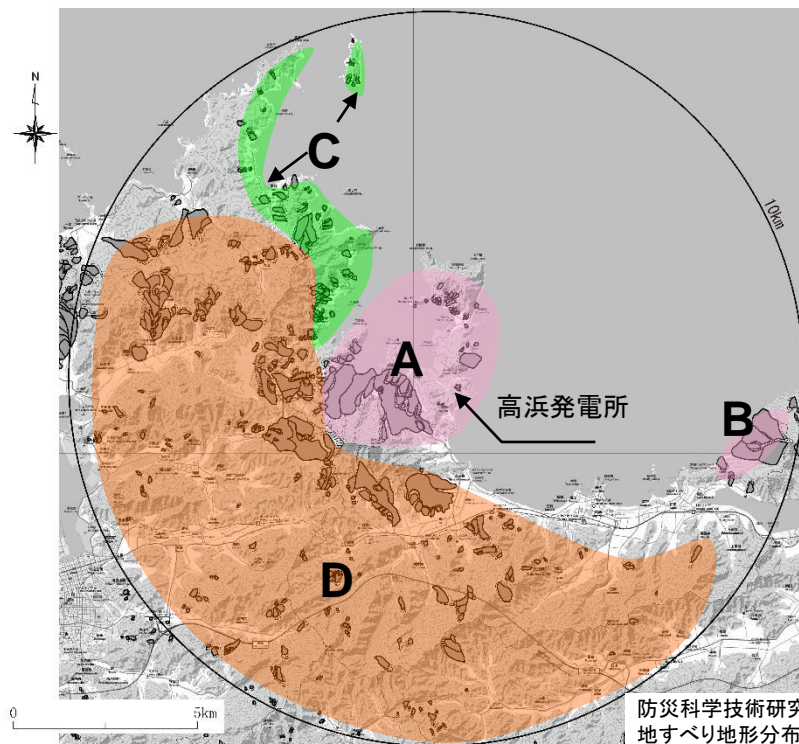
STEP2

対象となる範囲のうち、発電所に影響のある津波を発生させる地すべりが存在するエリアを抽出。

- ①海沿いにあり、滑落した場合に海に突入する可能性がある箇所
- ②大規模で津波を発生させる可能性があるもの、小規模であるが発電所に近い箇所

エリア	評価
A	抽出対象エリアとする。
B	
C	海沿いの地すべりが発電所側を向かない、あるいは地すべりの規模が発電所の近距離の物と比べ同等以下であることから、抽出対象外とする。
D	地すべりが海に面さず、地すべりにより津波が発生しないと考えられるため対象外とする。

	抽出したエリア
A-1	内浦湾南方
A-2	内浦湾東方
B	大島半島西方



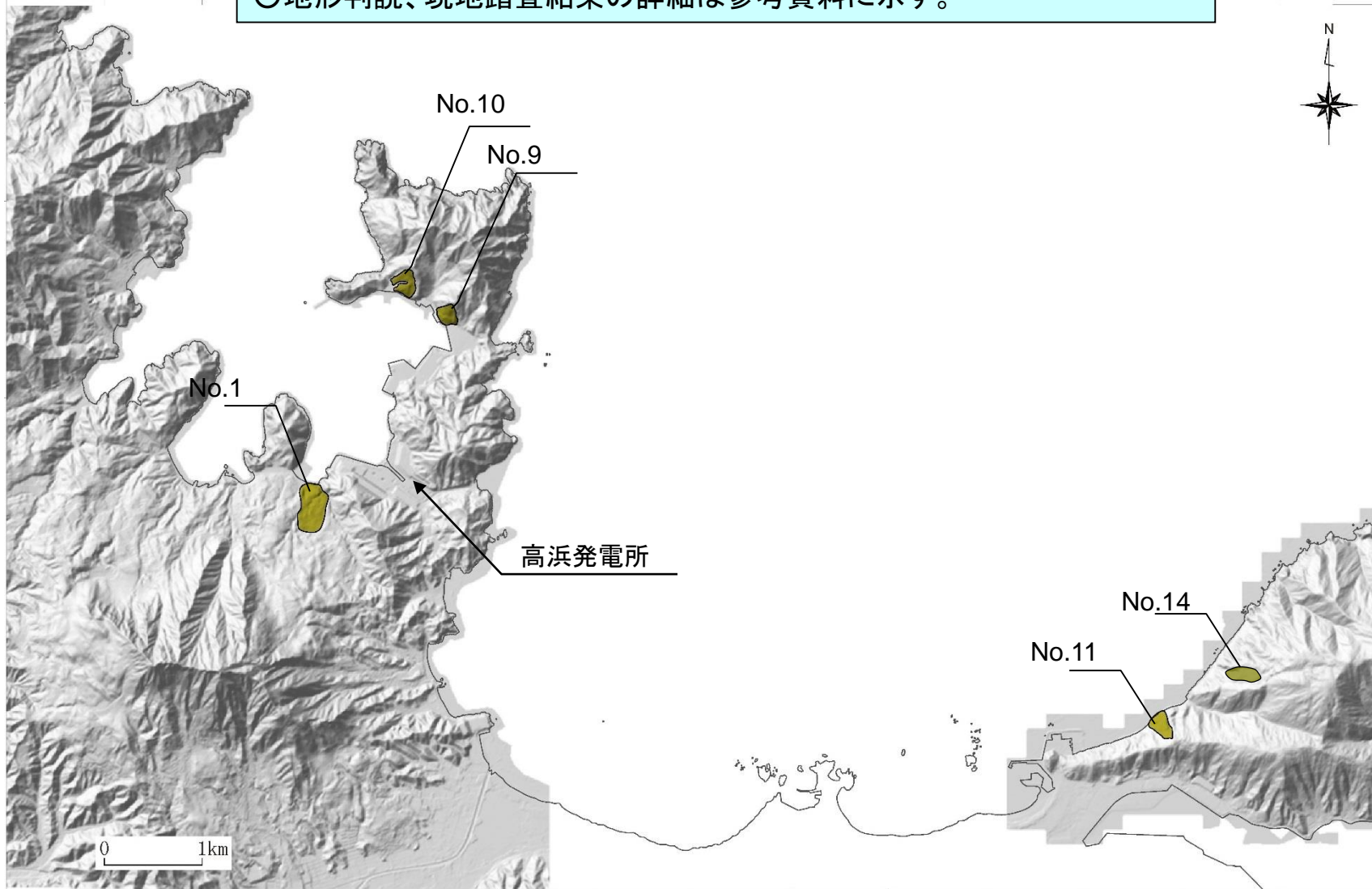
防災科学技術研究所
地すべり地形分布図に加筆

※図の囲みは凡その範囲を示す。



STEP3: 地すべり地形の抽出

- 地形判読、現地踏査の結果、以下に示す5箇所の地すべりを抽出した。
- 地形判読、現地踏査結果の詳細は参考資料に示す。



STEP4 : 詳細評価を行なう地すべり地形の抽出(1)

抽出した5箇所(1)の地すべり地形について、崩壊部の体積、すべり角、発電所までの距離を算定し、斜面崩壊の室内実験から導かれた次式(Huber他(1997)※)を適用して、発電所における津波の全振幅を推定した。

$$\frac{H_1}{d_1} = 2 \cdot 0.88 \sin \alpha \cos^2 \left(\frac{2\gamma}{3} \right) M^{1/2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)^{1/4} \left(\frac{r}{d_1} \right)^{-2/3}$$

$$M = \frac{V_s}{bd_1^2}$$

- Reservoir water depth d near the impact site
- Reservoir topography,
- Distance x , and radius r from the impact site to the location considered, and wave propagation direction γ

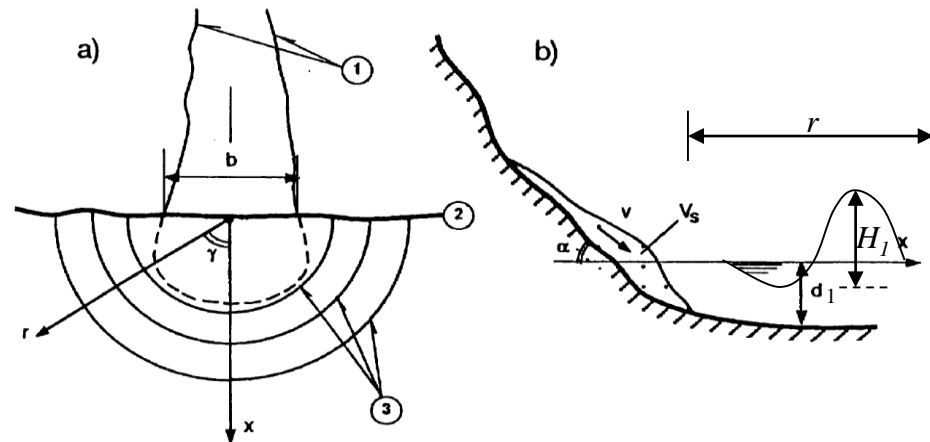


Fig. 1

Slide layout (a) and section (b) with main parameters of impulse wave
Vues schématiques en plan (a) et transversale (b) du glissement, avec désignation des paramètres principaux utilisés dans la description des ondes de translation

Huber and Hager(1997)※に加筆

なお、水深の違いによる波高の上昇を考慮した式として、次式も示している。

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{1/4}$$

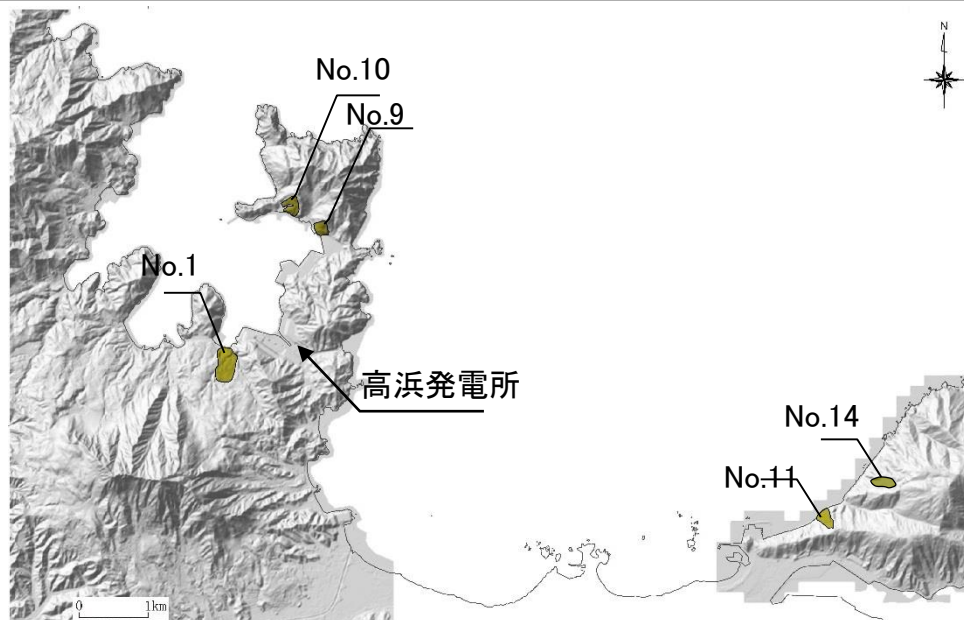
(添え字は、地点1,2での値)

※: Huber, A. and W.H. Hager(1997): Forecasting impulse waves in reservoirs. Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages C31:993-1005. Florence, Italy. Commission International des Grands Barrages, Paris.

STEP4 : 詳細評価を行なう地すべり地形の抽出(2)

○Huber and Hager(1997)の予測式で用いる土塊の形状や距離は、地すべり抽出にあたっての検討結果を踏まえて設定し、土塊の厚さは高速道路調査会により示されている土塊の幅/厚さの関係、及び現地状況を考慮して推定した。

○地形的特長から放水口側に影響が大きいと考えられるNo.9とNo.10は、規模や傾斜角が同程度であり、かつ近接して存在しているため、No.10を選定した。また、取水口側に影響が大きいと考えられる、No.11とNo.14を比較した結果、No.14の方が発電所への影響が大きい為、No.14を抽出。さらに、発電所のごく近傍に位置するNo.1についても詳細検討を実施する地すべりとして抽出した。



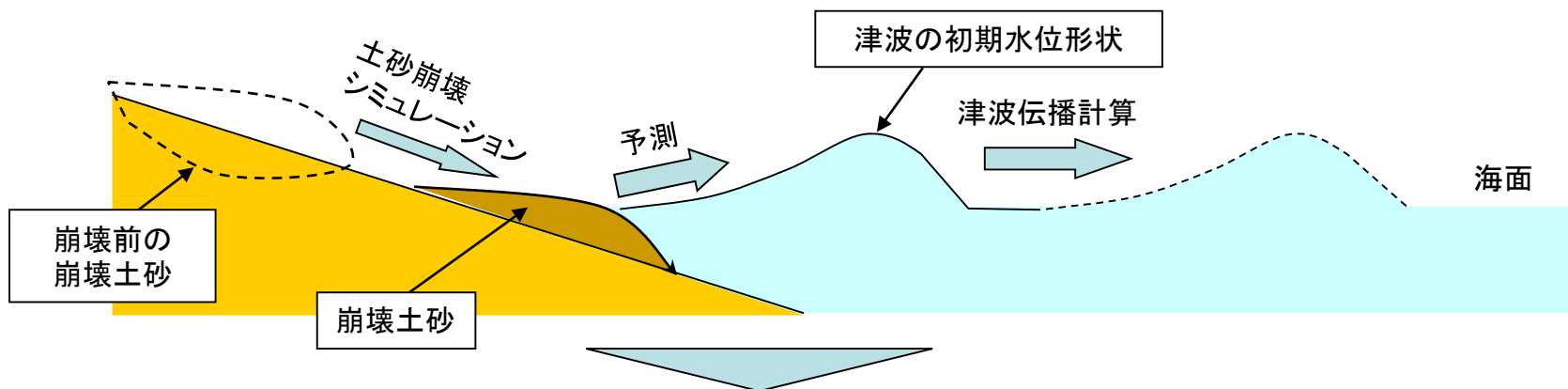
発電所での全振幅推定結果

	陸上地すべり	平均長さ L(m)	平均幅 b(m)	平均厚さ t(m)	土量Vs =L×b×t (m ³)	すべり面の傾斜角 α(°)	進行角 γ(°)	突入位置水深 d1(m)	発電所前面水深 d2(m)	土塊の比重 ρs / ρw	発電所までの距離 r(m)	発電所での全振幅 (m)	
放水口側の地すべり	No.1	400	250	30	3,000,000	6	0	15	10	1.85	600	2.22	▶ 詳細検討実施
	No.9	160	80	20	256,000	30	30	15	10	1.85	1,500	2.63	▶ 詳細検討実施
取水口側の地すべり	No.10	160	80	20	256,000	28	0	15	10	1.85	1,600	2.68	▶ 詳細検討実施
	No.11	280	160	29	1,299,200	25	30	15	10	1.85	7,400	1.22	▶ 詳細検討実施
	No.14	300	100	25	750,000	30	25	15	10	1.85	7,600	1.42	▶ 詳細検討実施

土塊の平均長さ、幅は図読し、土量算定の為に係数0.8を乗じた。また、土塊の比重は砂防設計公式集より設定した。

地すべりによる津波評価における解析の流れ

- 地すべりによる津波の評価では、海面に突入する崩壊土砂の動きの解析(土砂崩壊シミュレーション)結果を元に初期水位波形を設定(予測)し、伝播計算を行う。
- 初期水位波形の設定には、以下の2つの予測手法を用いる。



- 土砂崩壊シミュレーションは、崩壊土砂の動きを時刻歴で解析することが可能な解析コード(TITAN2D※¹)を使用する。
- 津波の初期水位波形については、
 - ①実験や海底地すべりの数値解析モデルの再現性を確認しているWatts他(2005)※²他による予測式(Watts他による方法)
 - ②土砂崩壊シミュレーションによる時間刻みあたりの海面下の地形変化量が、海面水位と海底地形に時々刻々と反映されるものとした、運動学的手法による予測方法(運動学的手法)の2つの方法で予測する。

※1 : TITAN2D User Guide Release 2.0.0, 2007.07.09, Geophysical Mass Flow Group (GMFG), University at Buffalo, NY, USA , July 27, 2007

※2 : Watts, P., S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer (2005) : Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.298-310.

土砂崩壊シミュレーション(支配方程式)

○連続の式※

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \overline{hu}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{hv}}{\partial y} = 0$$

○運動方程式※

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \overline{hu}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{hu^2} + \frac{1}{2} k_{ap} g_z h^2 \right) + \frac{\partial \overline{huv}}{\partial y} \\ & = -hk_{ap} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial hg_z}{\partial y} \sin \phi_{\text{int}} - \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[g_z h \left(1 + \frac{u}{r_x g_x} \right) \right] \tan \phi_{\text{bed}} + g_x h \end{aligned}$$

ここで、 h : 層厚、 u, v : 速度、 k_{ap} : 主動(受動)土圧係数、 g : 重力加速度、 r : 斜面の曲率、 ϕ_{int} : 内部摩擦角、 ϕ_{bed} : 底面摩擦角、 sgn : 実数 a に対して、 $\operatorname{sgn}(a) = 1; (a \geq 0), -1; (a < 0)$ である。

(上付きのバーは層の断面方向の平均を、添え字の x, y, z はそれぞれの座標軸方向の成分を示す)

4-2. 陸上の斜面崩壊(地すべり)に起因する津波評価

土砂崩壊シミュレーション(入力データ)

➤ 地形データ: 崩壊土砂を剥ぎ取った地形データ

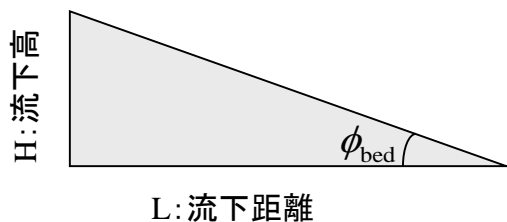
➤ 物性パラメータ

内部摩擦角: ϕ_{int}

底面摩擦角: ϕ_{bed}

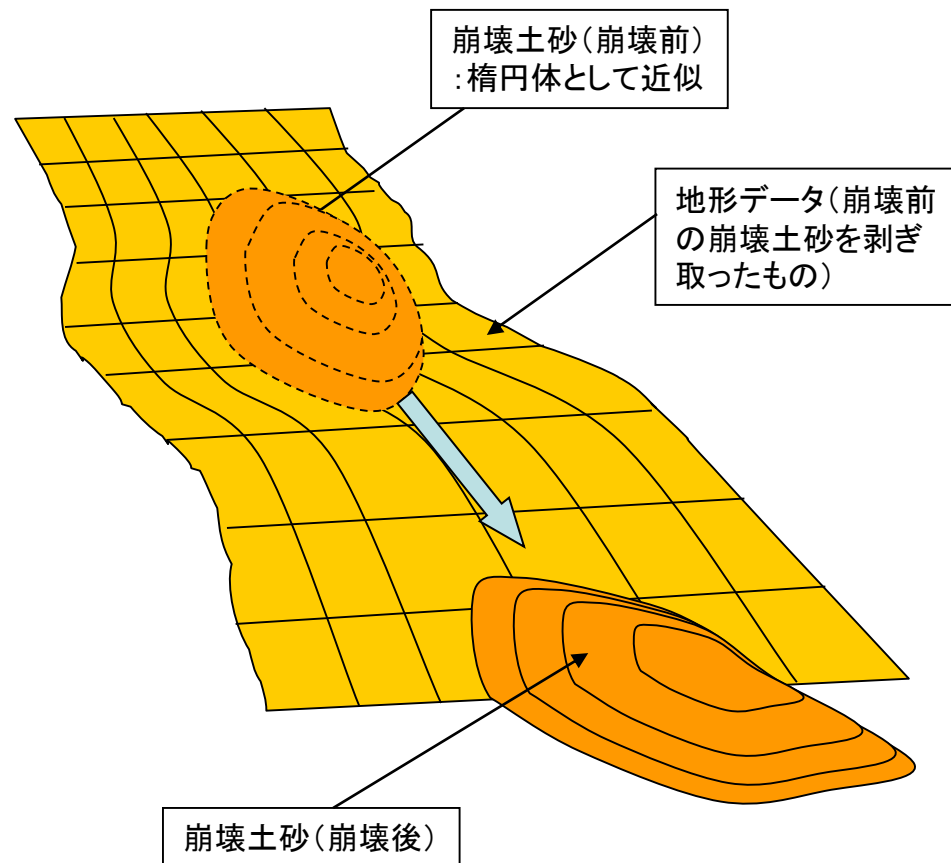
- $\tan(\phi_{\text{bed}})$ が等価摩擦係数 μ に相当
- 崩壊物の流下高: H と流下距離: L の関係式

$$\mu = \tan(\phi_{\text{bed}}) = H/L$$



➤ 崩壊土砂の形状

長軸 X_r , 短軸 Y_r , 高さ Z_r の楕円体として与える。



推定した地すべり地形から、土砂崩壊シミュレーションに必要な地形データ、崩壊土砂量を決定するとともに、文献を参照して物性パラメータを設定。

No.1周辺の地すべり量の算定

- No.1地すべりについては、周囲のNo.2,3が古い地すべりと考えられたが、地すべりの明確な新旧区分が困難であったため、No.1,2,3を一体とした津波評価用地すべりを想定した。
- 福井県実施の地すべり調査結果を参考に、高速道路調査会(1985)及び周辺地形、現地状況から、地すべり厚さを想定し、崩壊土砂量を算出した結果、約4,500万 m^3 となった。
- 設定した地すべり地形データを用いて、TITAN2Dにより土砂崩壊シミュレーションを実施し、津波波源となるデータを作成した。

高速道路調査会により示されている、下表の地すべり土塊の幅/厚さの関係、及び現地状況を考慮して地すべり厚さを最大約85mと推定した。

幅(m)	幅/厚さ
50~100	5~7
200前後	7~10
300~	10~15

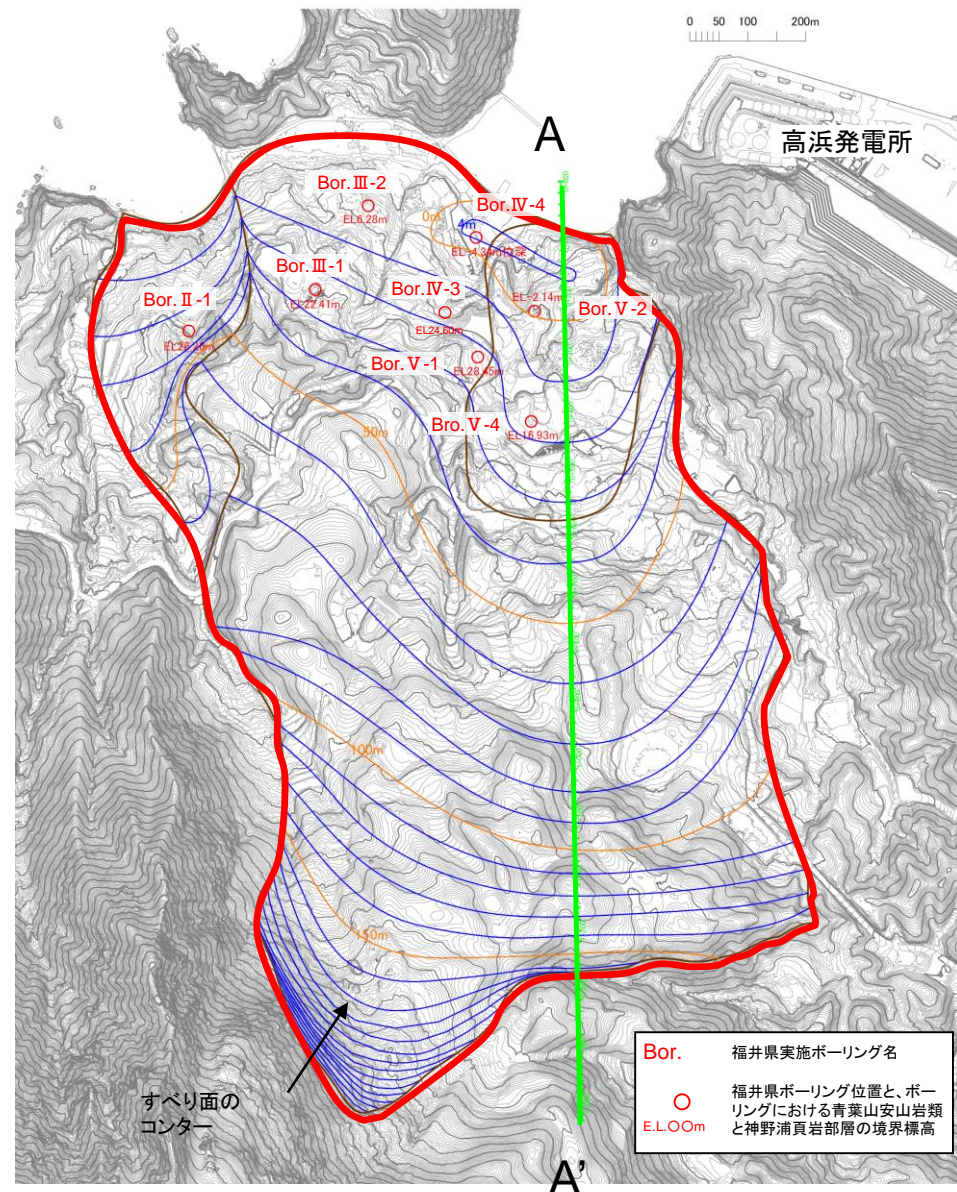
○土砂崩壊シミュレーション用パラメータ

- ・内部摩擦角(ϕ) : 30°
- ・等価摩擦係数(H/L) : 0.2

森脇(1987)^{※1}、Siebert(2002)^{※2}を参考に、H/Lと崩壊土砂の体積の関係より算出

※1 森脇寛(1987)、「崩土の到達距離予測」、地すべり第24巻 第2号、Journal of Japan Landslide Society 23-2, pp13-14

※2 Siebert, L.(2002) :Landslides resulting from structural failure of volcanoes, In Evans,S.G. and DeGraff, J.V., (ed.)Catastrophic landslides : effects, occurrence, and mechanisms., Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, pp.209-235

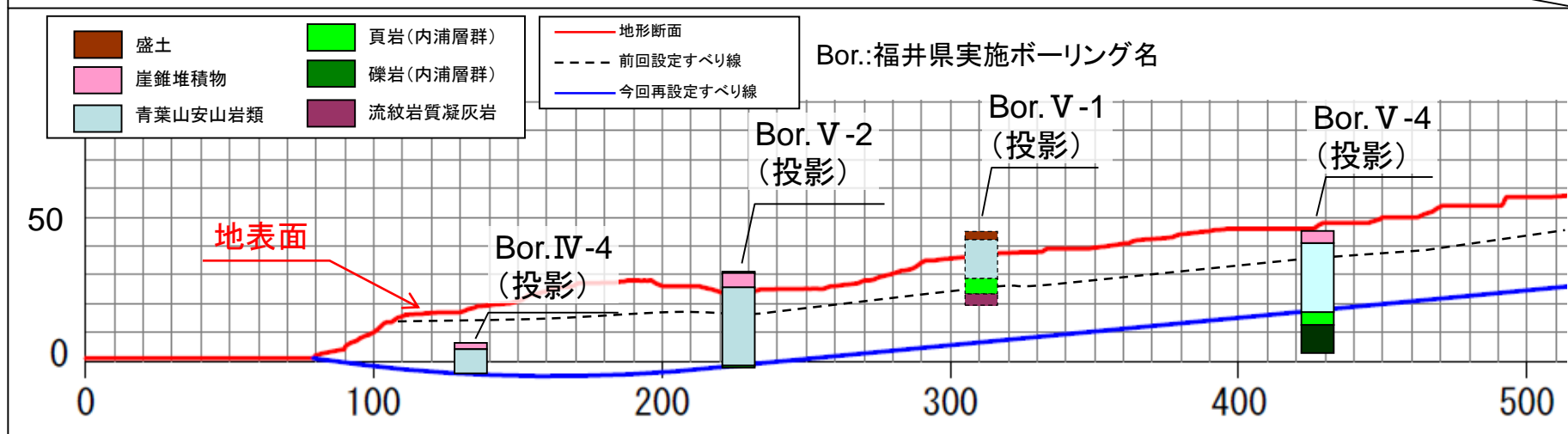
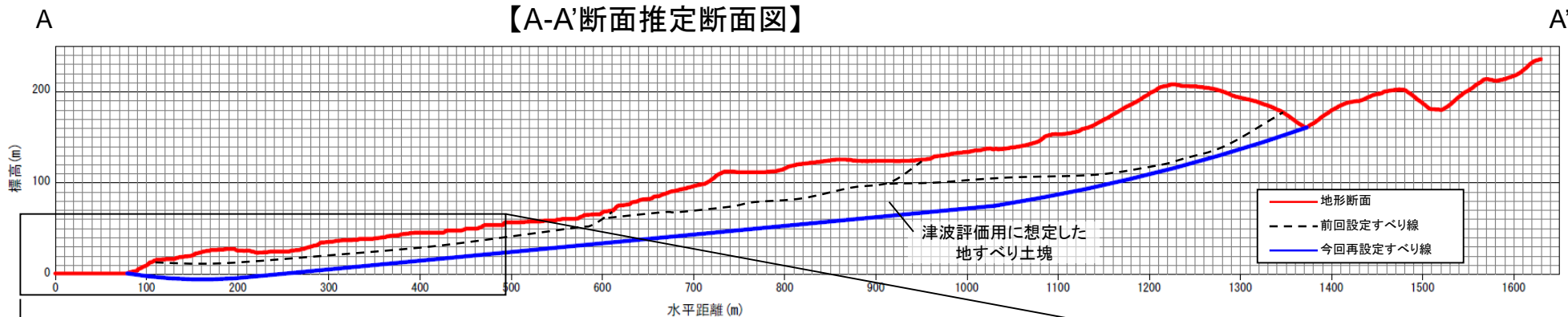


すべり面の
コンター

Bor. 福井県実施ボーリング名
○ 福井県ボーリング位置と、ボーリングにおける青葉山安山岩類と神野浦頁岩部層の境界標高
E.L.OOm

No.1周辺の地すべりの設定

【A-A'断面推定断面図】

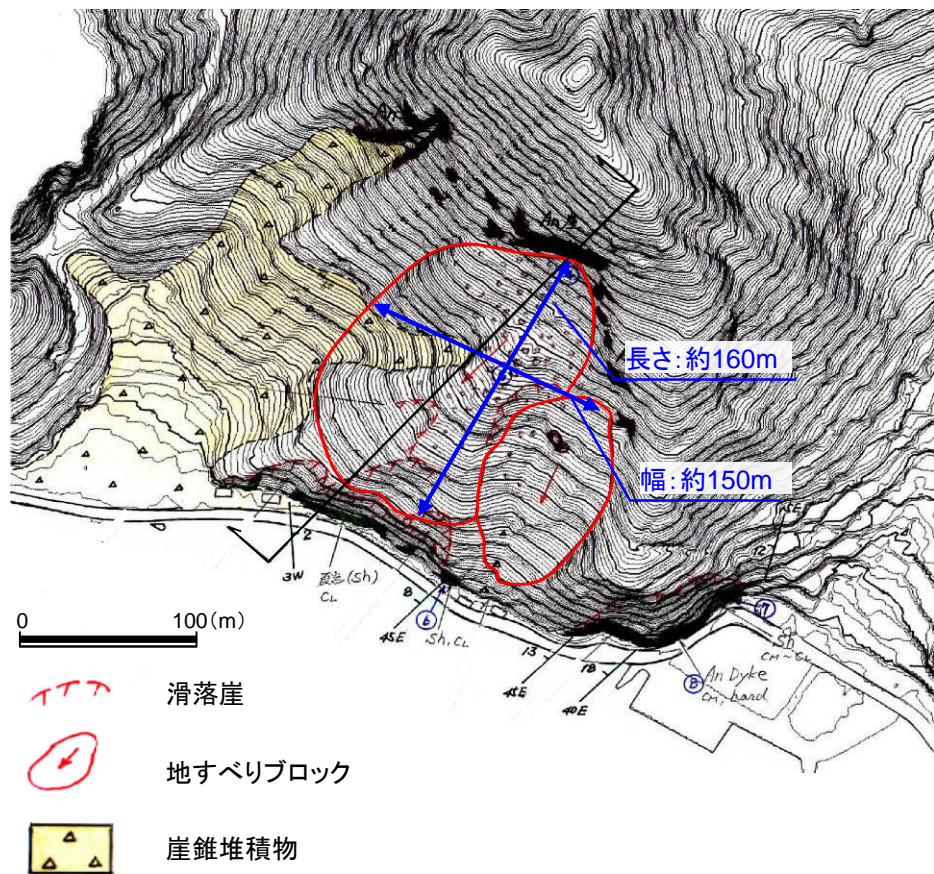


○地すべり土塊前面については、福井県の地すべり調査ボーリング結果を参考に、青葉山安山岩類と頁岩の境界にすべり面を想定した。

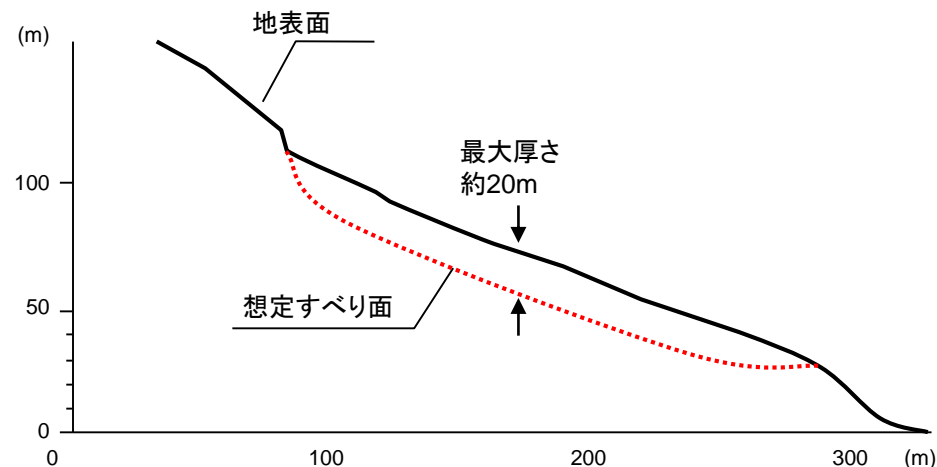
○地すべり土塊中腹から上部については、前面で確認された青葉山安山岩類と頁岩の境界の傾斜と周辺地形、また前ページに示す土塊幅と厚さの関係性を考慮して、図に示すすべり面を想定した。

No.10の地すべり量の算定

【崩壊範囲】



【推定断面図】



高速道路調査会により示されている、下表の地すべり土塊の幅/厚さの関係、及び現地状況を考慮して地すべり厚さを最大約20mと推定した。

幅(m)	幅/厚さ
50~100	5~7
200前後	7~10
300~	10~15

○土砂崩壊シミュレーション用パラメータ

・内部摩擦角(ϕ) : 30°

・等価摩擦係数(H/L) : 0.3

森脇(1987)*1、Siebert(2002)*2を参考に、H/Lと崩壊土砂の体積の関係より算出

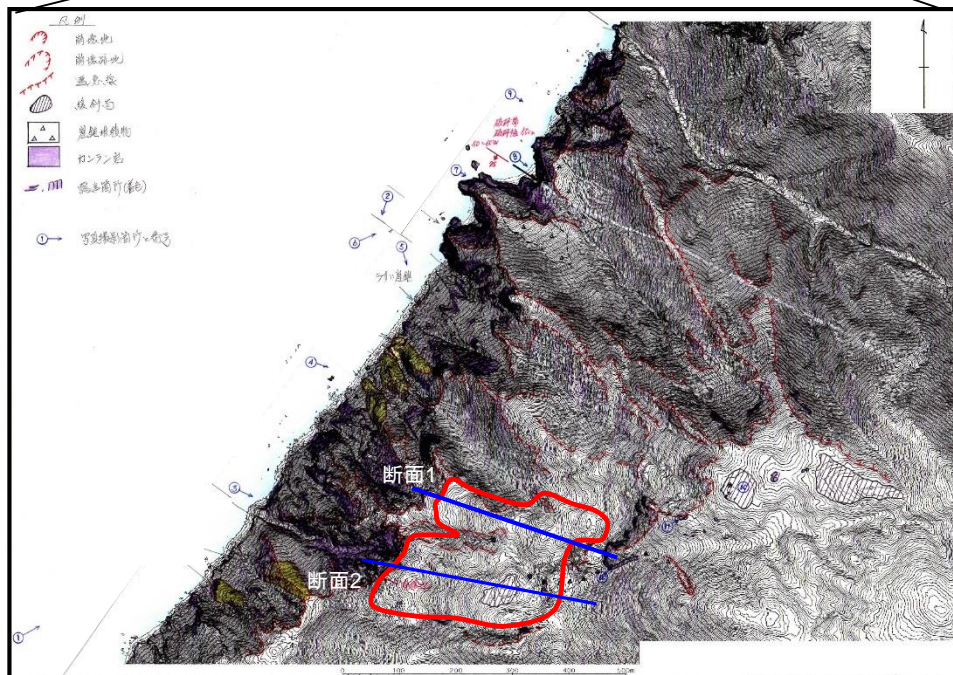
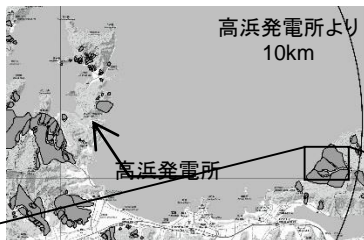
○現地踏査の結果から、地すべり範囲を詳細に推定するとともに、高速道路調査会(1985)から崩壊土砂の厚さを推定し、崩壊土砂量を約450,000m³として算出した。

○設定した地すべり地形データを用いて、TITAN2Dにより土砂崩壊シミュレーションを実施し、津波波源となるデータを作成した。

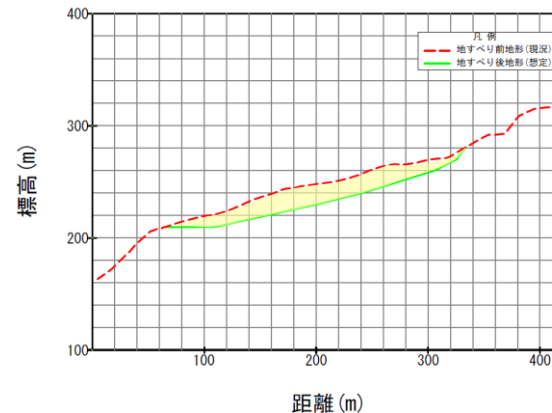
*1 森脇寛(1987)、「崩土の到達距離予測」、地すべり第24巻 第2号、Journal of Japan Landslide Society 24-2, pp13-14

*2 Siebert, L.(2002) :Landslides resulting from structural failure of volcanoes, In Evans,S.G. and DeGraff, J.V.,(ed.) Catastrophic landslides : effects, occurrence, and mechanisms., Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, pp.209-235

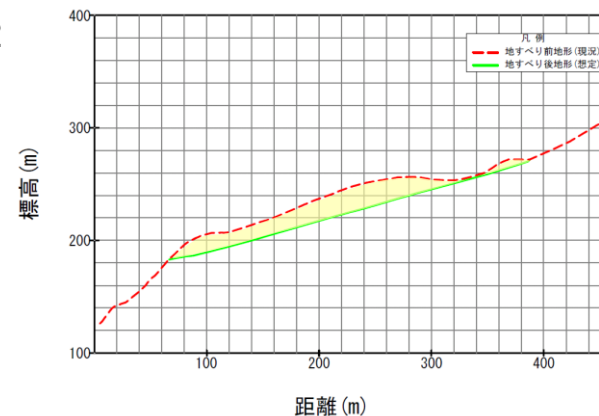
No.14の地すべり量の算定



断面1



断面2



○土砂崩壊シミュレーション用パラメータ

- ・内部摩擦角(ϕ) : 30°
- ・等価摩擦係数(H/L) : 0.3

森脇(1987)^{※1}、Siebert(2002)^{※2}を参考に、H/Lと崩壊土砂の体積の関係より算出

※1 森脇寛(1987)、「崩土の到達距離予測」、地すべり第24巻 第2号、Journal of Japan Landslide Society 24-2, pp13-14

※2 Siebert, L.(2002) :Landslides resulting from structural failure of volcanoes, In Evans, S.G. and DeGraff, J.V., (ed.) Catastrophic landslides : effects, occurrence, and mechanisms., Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, pp.209-235

○詳細な現地踏査を行い周辺地形を再検討し、No.14としていた範囲と、さらに北側の範囲も追加して、地すべり範囲を設定し、TITAN2Dを用いて土砂崩壊シミュレーションを実施した。

○地すべりの厚さは高速道路調査会(1985)及び現地地形、現地状況から厚さを推定し、崩壊土砂量を約800,000m³として算出した。

○設定した地すべり地形データを用いて、TITAN2Dにより土砂崩壊シミュレーションを実施し、津波波源となるデータを作成した。

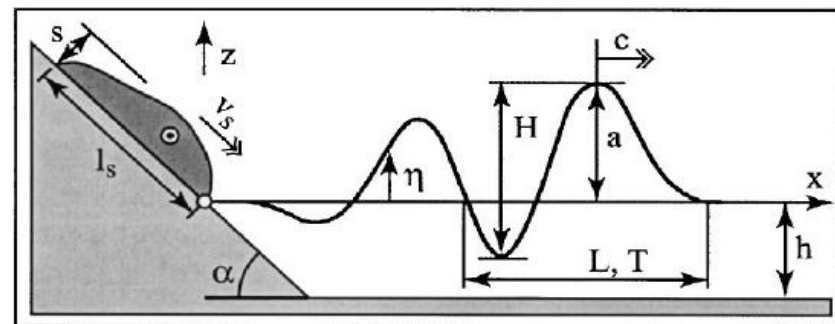
Watts他による方法に用いるパラメータ(波源振幅および特性津波波長)

○波源振幅 $\eta_{0,2D}$ ($=a_c$)は、Fritz他(2004)*による波源振幅予測式の入力パラメータ(=説明変数)と出力パラメータ(=目的変数)を示す。

【変数の定義】

$$\frac{a_c}{h} = 0.25 \left(\frac{v_s}{\sqrt{gh}} \right)^{1.4} \left(\frac{s}{h} \right)^{0.8}$$

a_c : 最大水位上昇量
 h : 海域静水深
 v_s : 土塊の突入速度*2
 s : 土塊の層厚*2
 g : 重力加速度



○水位分布の予測式に必要な特性津波波長 λ_0 ($=L_1$)については、波源振幅を示したFritz他(2004)*が提案する次式を使用する。

【山体崩壊による津波を対象とした波長の予測式】

$$\frac{L_1(x/h = 5)}{h} = 8.2 \left(\frac{v_s}{\sqrt{gh}} \right)^{0.5} \left(\frac{V_s}{bh^2} \right)^{0.2}$$

L_1 : 第一波の波長
 h : 静水面深さ
 v_s : 土塊の突入速度*2
 V_s : 土塊の体積*2
 b : 土塊の幅*2
 g : 重力加速度

*1 H. M. Fritz¹; W. H. Hager²; and H.-E. Minor, Near Field Characteristics of Landslide Generated Impulse Waves, JOURNAL OF WATERWAY, PORT, COASTAL, AND OCEAN ENGINEERING © ASCE / NOVEMBER/DECEMBER 2004

*2 TITAN2Dによる土砂崩壊シミュレーションの結果を使用

Watts他による方法に用いるパラメータ

土砂崩壊シミュレーションから得られた崩壊土砂の体積、突入速度等から、初期水位波形を設定

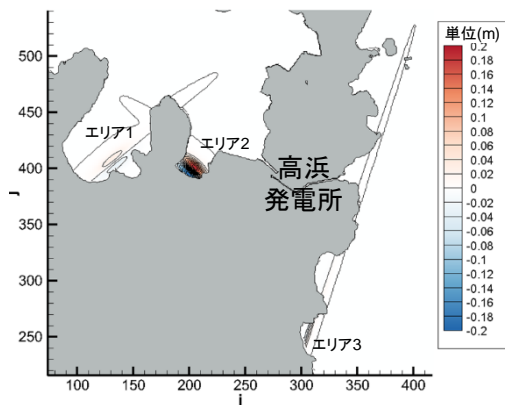
パラメータ		単位	設定値					備考
			No.1, 2, 3一体(No.1周辺) ^{※1,2}			No.10 ^{※2}	No.14 ^{※2}	
			エリア1	エリア2	エリア3			
土砂崩壊 シミュレーション からの入力値	突入物体積Vs	m ³	4,505,700	2,996,400	1,110,800	143,000	727,201	TITAN2Dでの算定値
	厚さs	m	11.57	19.84	7.77	5.2	4.51	突入位置での層厚の最大値
	幅b	m	550	340	1500	170	400	崩壊域周辺地形図より設定
	突入速度vs	m/s	0.55	1.24	0.43	18.96	36.96	突入地点での最大速度
	水深h	m	20	10	10	20.0	30	崩壊域～サイト間の水深より設定
初期水位 計算出力	2次元振幅 $\eta_{0,2D}$	m	0.035	0.236	0.025	2.59	4.83	
	第1波波長 λ_0	m	59.46	71.08	25.51	221	415.7	
	3次元振幅 $\eta_{0,3D}$	m	0.03	0.20	0.03	1.12	2.37	初期水位分布最大値

※1: No.1周辺の地すべりについては、評価上No.1, 2, 3を一体として扱う。No.1, 2, 3は土砂が3箇所から海に突入しているため、それぞれの箇所について初期水位を作成した

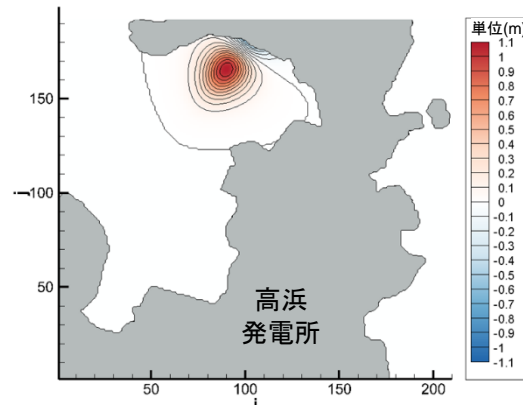
※2: 個々の地すべりの詳細については、参考資料を参照

【初期水位分布図】

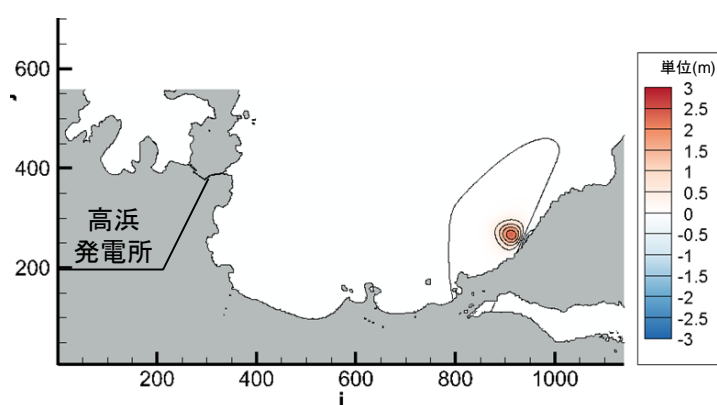
【No.1,2,3】



【No.10】



【No.14】



4-2. 陸上の斜面崩壊(地すべり)に起因する津波評価

津波伝播計算条件

設定項目		設定値	
津波計算	基礎方程式	非線形長波理論式及び連続式(後藤他(1982) ⁽¹⁾)	
	変数配置および差分スキーム	Staggered Leap-frog法	
計算条件等	計算領域	対馬海峡から間宮海峡に至る東西方向約1,500km, 南北方向約2,000km	
	空間格子間隔	1,350m→450m→150m→50m→25m→12.5m→6.25m→3.125m	
	時間格子間隔	0.025秒 ※安定条件(CFL条件)を満足するように設定	
	初期条件	(Watts他による方法)Watts他の方法により計算される初期水位分布を初期条件とする。 ----- (運動学的手法)土砂崩壊シミュレーションによる時間刻みあたりの地形変化量が、海面水位と海底地形にそのまま反映されるものとする。	
	境界条件	沖側境界	特性曲線法をもとに誘導される自由透過の条件(後藤他(1982) ⁽¹⁾)
		陸域境界	完全反射条件。なお、発電所敷地については遡上境界とする。
	海底摩擦	マンニングの粗度係数 $n=0.030$ (土木学会(2016) ⁽³⁾)	
	水平渦動粘性係数	0m ² /s	
	計算時間	1.0時間	
	計算潮位	水位上昇側T.P.+0.49m、水位下降側T.P.0.00m	
評価潮位	水位上昇側T.P.+0.49m、水位下降側T.P.-0.01m ※気象庁・舞鶴検潮所のデータによる(2007年1月～2011年12月の5箇年)		
津波防護対策	取水路防潮ゲート、放水口側防潮堤を考慮		
津波水位評価	cmを切り上げ、10cm単位で評価する。		

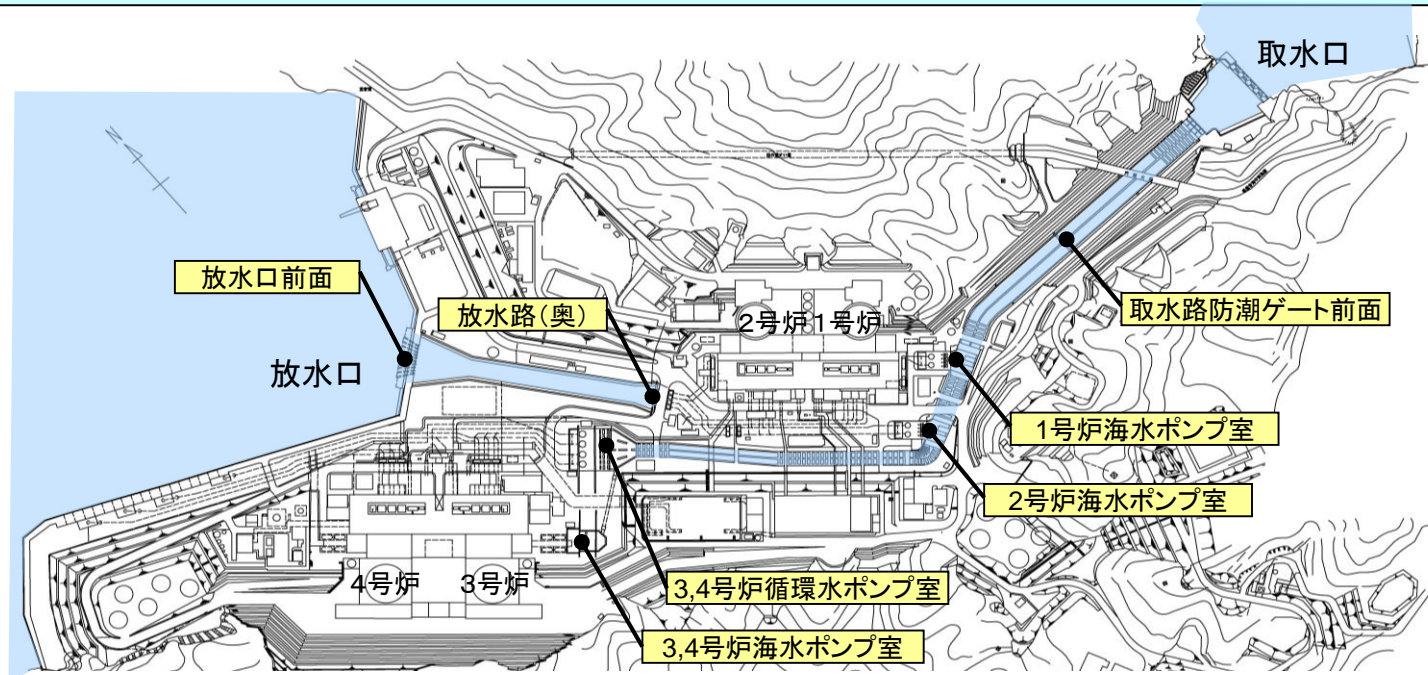
(1) 後藤智明・小川由信(1982): Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学土木工学科資料, 1982

(2) Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement field of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, p.1433-1440.

(3) 土木学会(2016): 原子力発電所の津波評価技術2016.

陸上地すべりによる津波水位評価結果

○Watts他による方法及び運動学的手法による初期水位波形に基づき、津波伝播計算を実施した。
○その結果、取水口側については地すべりNo.14、放水口側については地すべりNo.1,2,3の水位が高い結果となった。



数字は、T.P.(m)

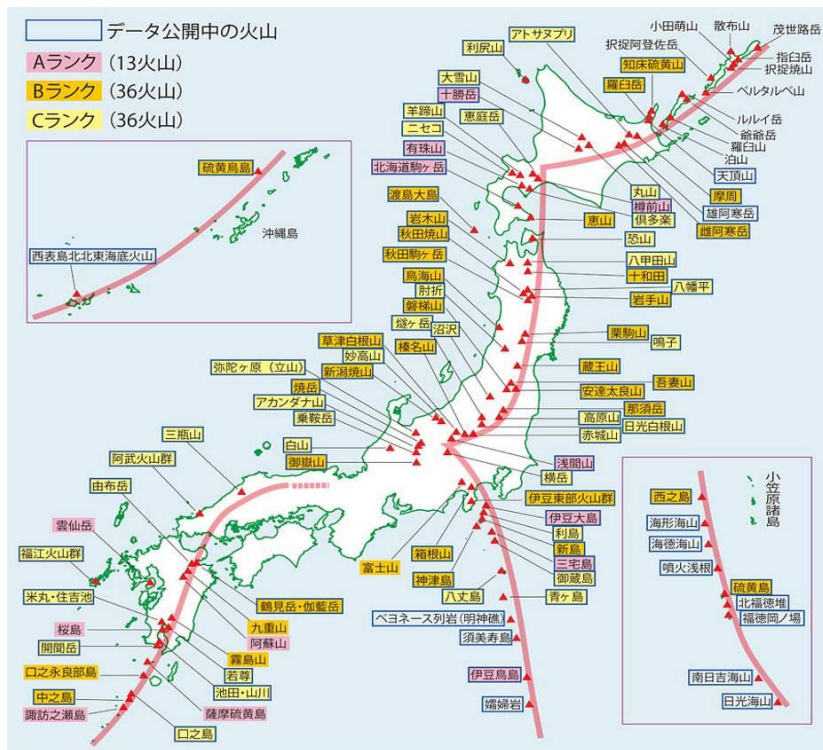
波源モデル	取水路 防潮 ゲート ^{※1}	水位上昇							水位下降			
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	
No.1,2,3 (一体)	Watts他による方法	開	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	-0.1	-0.1	-0.1
	運動学的手法	開	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	<u>2.1</u>	<u>2.1</u>	<u>-0.3</u>	-0.3	<u>-0.4</u>
No.10	Watts他による方法	開	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	-0.1	-0.1	-0.1
	運動学的手法	開	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.5	1.4	-0.1	-0.1	-0.1
No.14	Watts他による方法	開	1.0	1.1	0.9	<u>1.0</u>	<u>1.0</u>	0.6	0.6	<u>-0.3</u>	<u>-0.4</u>	<u>-0.4</u>
	運動学的手法	開	<u>1.1</u>	<u>1.2</u>	<u>1.0</u>	<u>1.0</u>	<u>1.0</u>	0.6	0.7	<u>-0.3</u>	<u>-0.4</u>	<u>-0.4</u>

※1 閉:取水路防潮ゲート天端T.P.+8.5mで全閉、開:両系列のゲートが開いた状態(T.P.±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

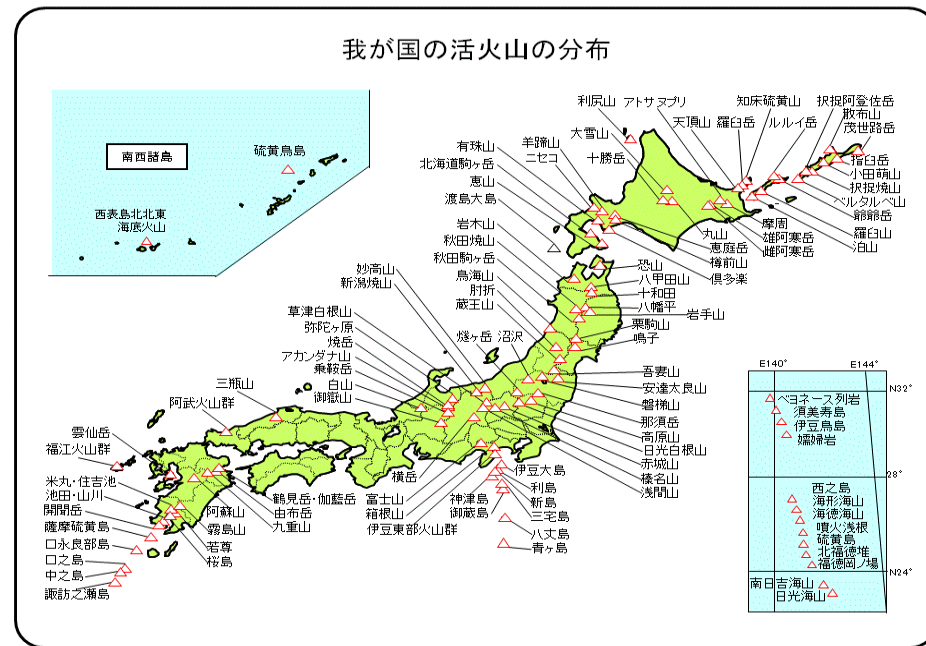
4-3. 火山現象に起因する津波評価

活火山に関する評価

活火山に関するデータベース(産業技術総合研究所:活火山データベース※1、気象庁:我が国の活火山の分布※2)を調査し、日本海側における活火山を抽出した。



活火山分布図(※1から引用)



活火山分布図(※2から引用)

- 日本海側には、渡島大島(1741年活動※1)、利尻島(2000~7900年前活動※1)があるが、いずれも津波堆積物調査の結果※3から、高浜発電所の安全性に影響を与えるような津波の痕跡は認められていない。
- したがって、高浜発電所の安全性に影響を与えるような活火山の山体崩壊による津波はなかったものと評価する。

※1: 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター(2014.10.3更新): 日本の火山、<https://gbank.gsj.jp/volcano/cgi-bin/map.cgi>

※2: 気象庁HP http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/katsukazan_toha/katsukazan_toha.html#katsukazan

※3: 関西電力株式会社(2012): 「平成23年度東北地方太平洋沖地震の知見等を踏まえた原子力施設への地震動および津波の影響に関する安全性評価のうち完新世に関する津波堆積物調査の結果について」, 平成24年12月.

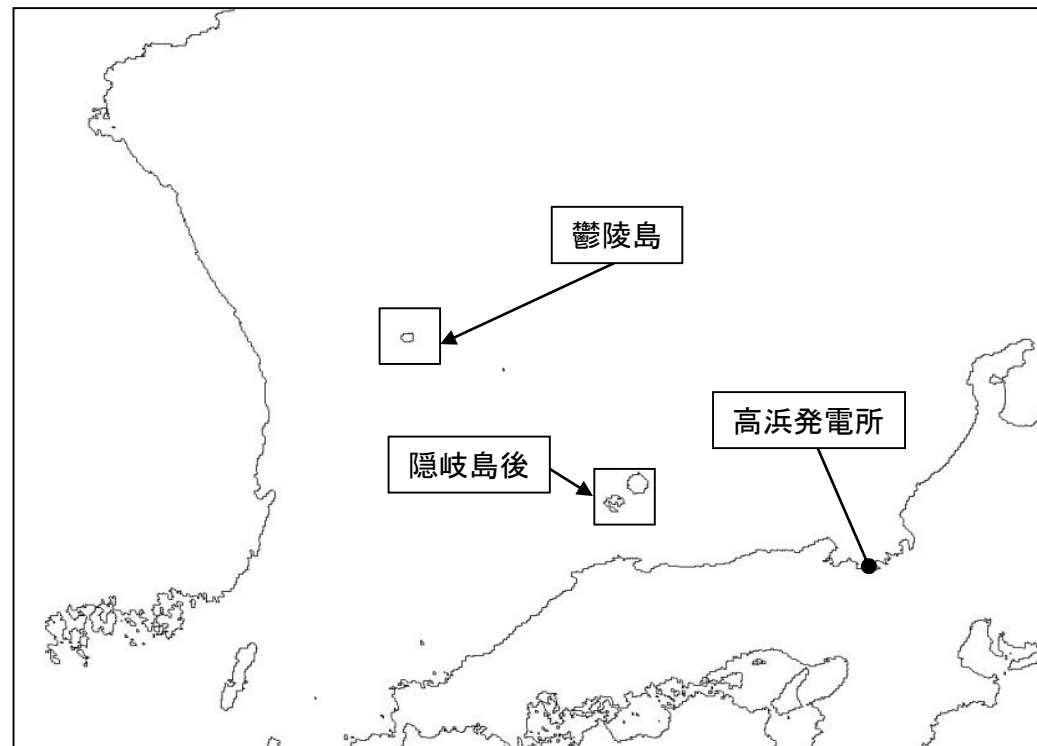
その他の火山に関する検討

○日本海に位置する活火山(日本の領海外)

- ・日本の領海外で日本海に位置し、若狭湾に最も近い活火山として鬱陵島がある。
- ・鬱陵島については、津波堆積物調査において、同年代のボーリングコアに火山灰(鬱陵隠岐テフラ、約10,700年前)が確認されているものの、津波堆積物は認められていない。
- ・活動履歴、噴出物等より、将来の活動可能性が否定できない火山であるが、発電所運用期間中においては、火山山体崩壊を引き起こす可能性は低く、敷地へ影響を及ぼす津波は発生しないと評価した。(詳細を参考2に示す)

○日本海に位置する第四紀火山

- ・日本海に位置し、若狭湾に最も近い第四紀火山として、隠岐島後があるが、活動履歴、噴出物等より、将来の活動可能性は低く、敷地へ影響を及ぼす津波は発生しないと評価した。(詳細を参考2に示す)



火山の山体崩壊に関する津波の影響を検討した結果、高浜発電所に与える影響はないと評価した。

5. 津波の組み合わせ

5. 津波の組み合わせ

津波の組み合わせに関する検討概要

地震に起因する津波、及び地震以外に起因する津波の検討結果を踏まえ、因果関係があると考えられる津波発生要因の組み合わせを抽出する。

主要な断層波源(検討対象断層他)

- ・FO-A~FO-B~熊川断層
- ・福井県モデル(若狭海丘列付近断層)

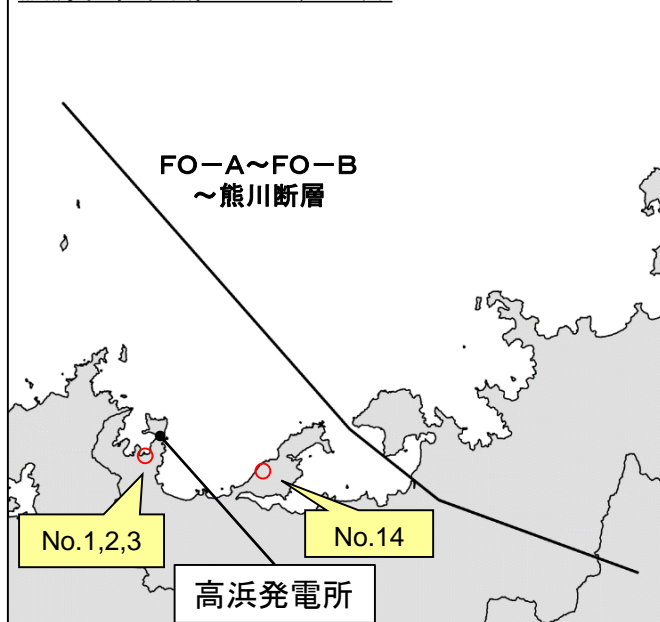
海底地すべりによる津波波源

- ・隠岐トラフ海底地すべりエリアA(Es-G3)
- ・隠岐トラフ海底地すべりエリアB(Es-K5)
- ・隠岐トラフ海底地すべりエリアC(Es-T2)

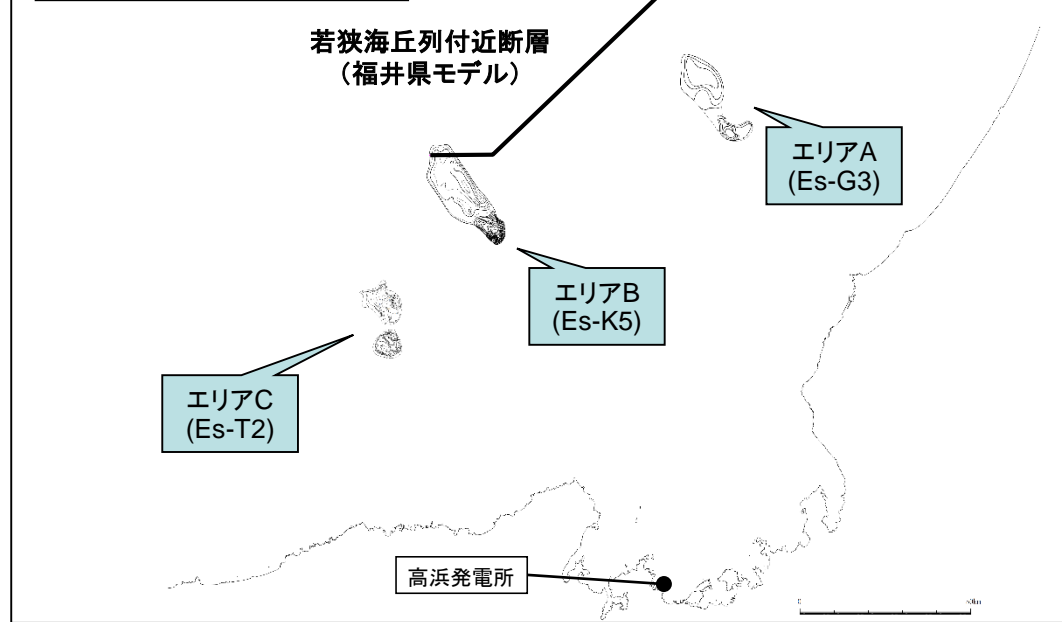
陸上地すべりによる津波波源

- ・陸上地すべり(No.1,2,3)
- ・陸上地すべり(No.14)

波源位置図(陸上地すべり)



波源位置図(海底地すべり)



○津波の組み合わせの検討にあたっては、地震以外の津波が、近接する主要な断層波源の活動で励起される可能性を考慮し、同時発生する可能性がある津波の組合せとして、

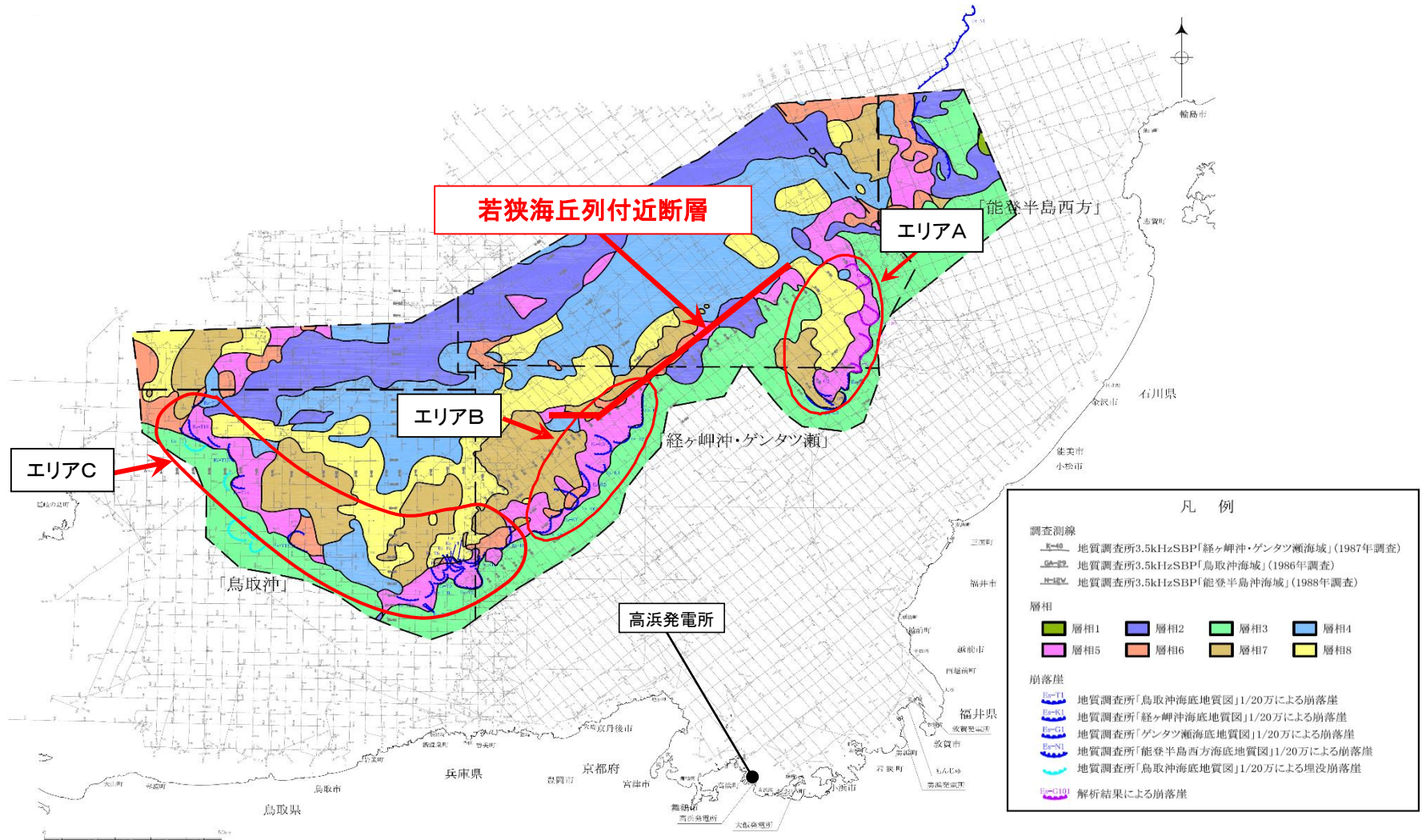
- ・若狭海丘列付近断層と隠岐トラフの海底地すべりの組み合わせ
- ・FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.1,2,3)の組み合わせ
- ・FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.14)の組み合わせ

を抽出し、各波源による津波の時刻歴波形の足し合わせによる組み合わせの検討を実施した。

○津波の組み合わせの検討にあたっては、時間の不確かさを考慮するものとする。

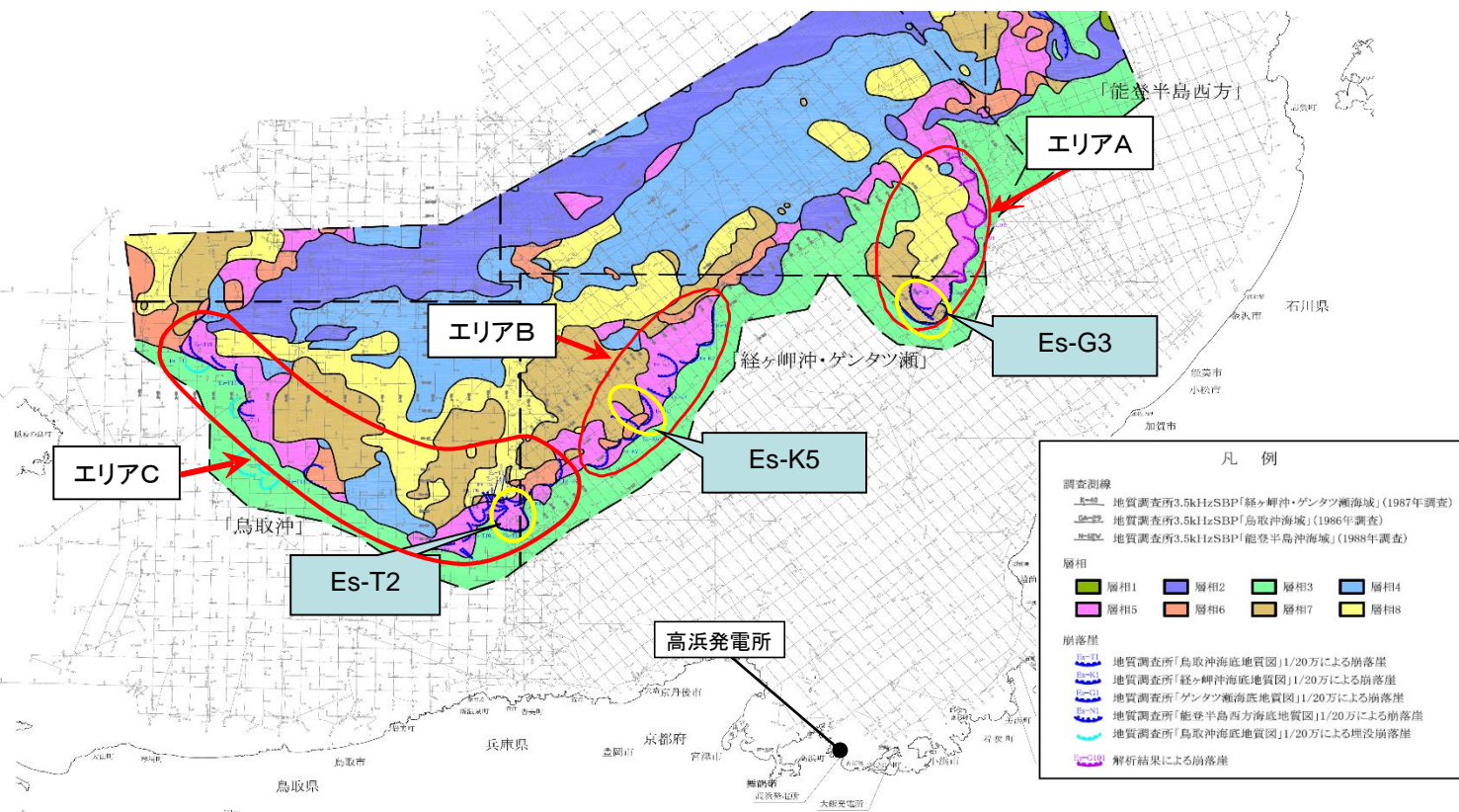
5-1. 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべりの 組み合わせ

位置関係図



地震と海底地すべりの組み合わせによる津波水位については、福井県モデル(若狭海丘列付近断層)とA,B,C各エリアの海底地すべりをそれぞれ 単独に計算した結果を、地震と海底地すべりが同時発生したものと仮定して、足し合わせて算出した。

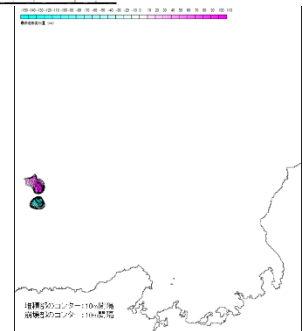
海底地すべりの設定



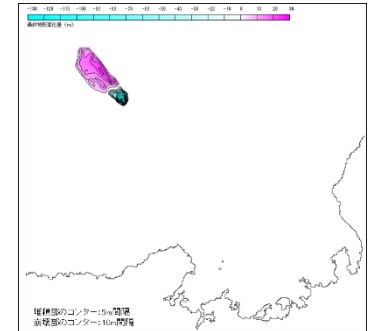
地すべり地形	エリア	地すべり長さ×厚さ(m ²)	規模の順位
Es-K5	B	913,324	1
Es-T2	C	833,402	2
Es-T8	C	656,141	3
Es-K7	B	578,850	4
Es-T13	C	576,038	5
Es-K6	B	558,225	6
Es-T14	C	547,200	7
Es-K8	B	498,312	8
Es-K4	B	357,855	9
Es-K3	B	341,839	10
Es-T6	C	331,267	11
Es-T17	C	312,678	12
Es-K2	B	298,932	13
Es-T15	C	274,765	14
Es-K1	B	270,276	15
Es-G3	A	198,822	16
Es-G103	A	185,161	17
Es-T12	C	182,237	18
Es-G104	A	164,876	19
Es-G102	A	158,864	20

○組み合わせる海底地すべりの発生位置については、隠岐トラフ付近の海底地すべり想定地形を、位置関係より3つのエリアに分け、それぞれのエリア毎に最も規模の大きい海底地すべりが発生するものとして、Watts 他 の 予 測 式 及 び Kinematic モデルによる方法で検討した。

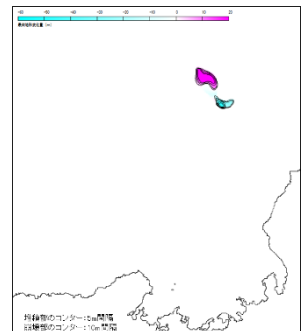
○各海底地すべりの条件については、本資料【4-1-3】のとおり。



エリアC(Es-T2)



エリアB(Es-K5)



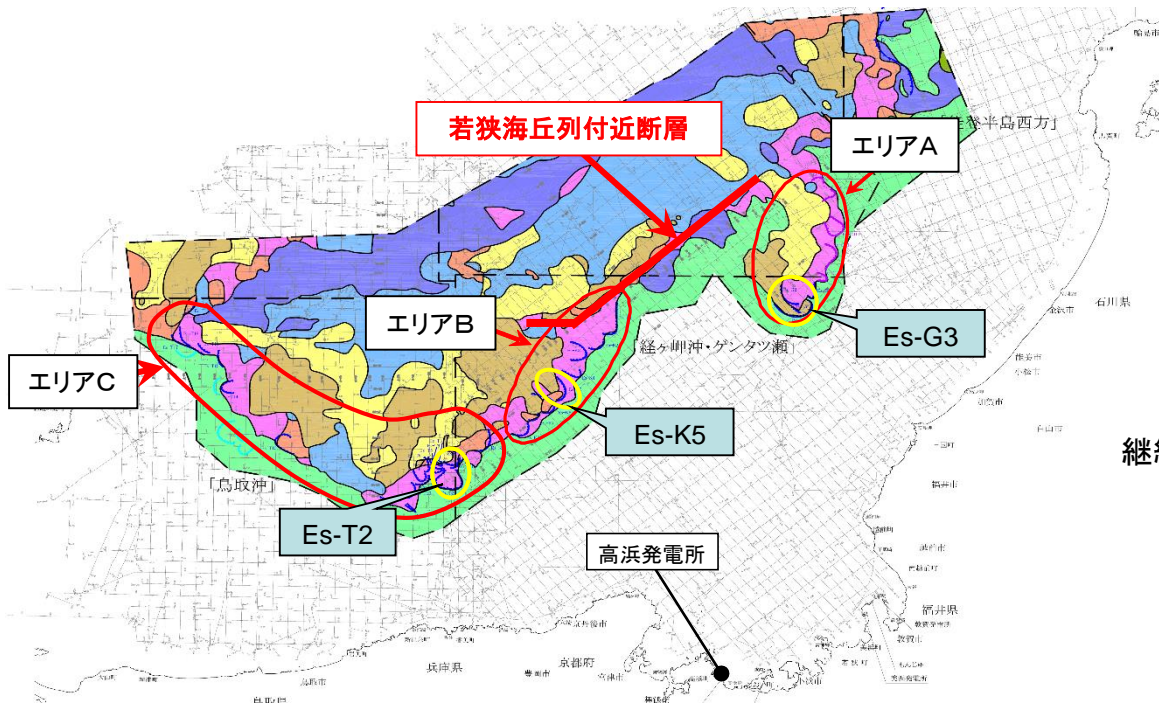
エリアA(Es-G3)

地すべり最終地形変化量分布図

5-1. 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべりの組み合わせ

第314回審査会合
資料1-4-2 P124 再掲

海底地すべり発生時間の不確かさの考え方



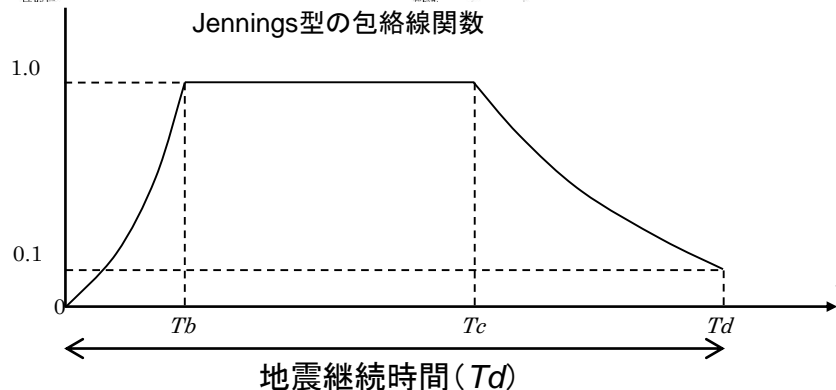
継続時間については、以下の式及び条件を用いて設定した。

- ・若狭海丘列付近断層 (断層長さ90km、M=8.1)
- ・断層と各海底地すべりまでの距離 (下表のXeq)

$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$



海底地すべり	X _{eq}	継続時間 [※]
Es-G3(エリアA)	45km	87秒間
Es-K5(エリアB)	33km	81秒間
Es-T2(エリアC)	74km	102秒間

海底地すべりの発生時間の不確かさについては、福井県モデル(若狭海丘列付近断層)の地震が発生し、地震動の継続する時間(上表参照)のいずれかのタイミングで隠岐トラフ海底地すべりが発生すると仮定し、その時間の範囲内で水位変動が最大となる津波の組み合わせについて検討を実施した。

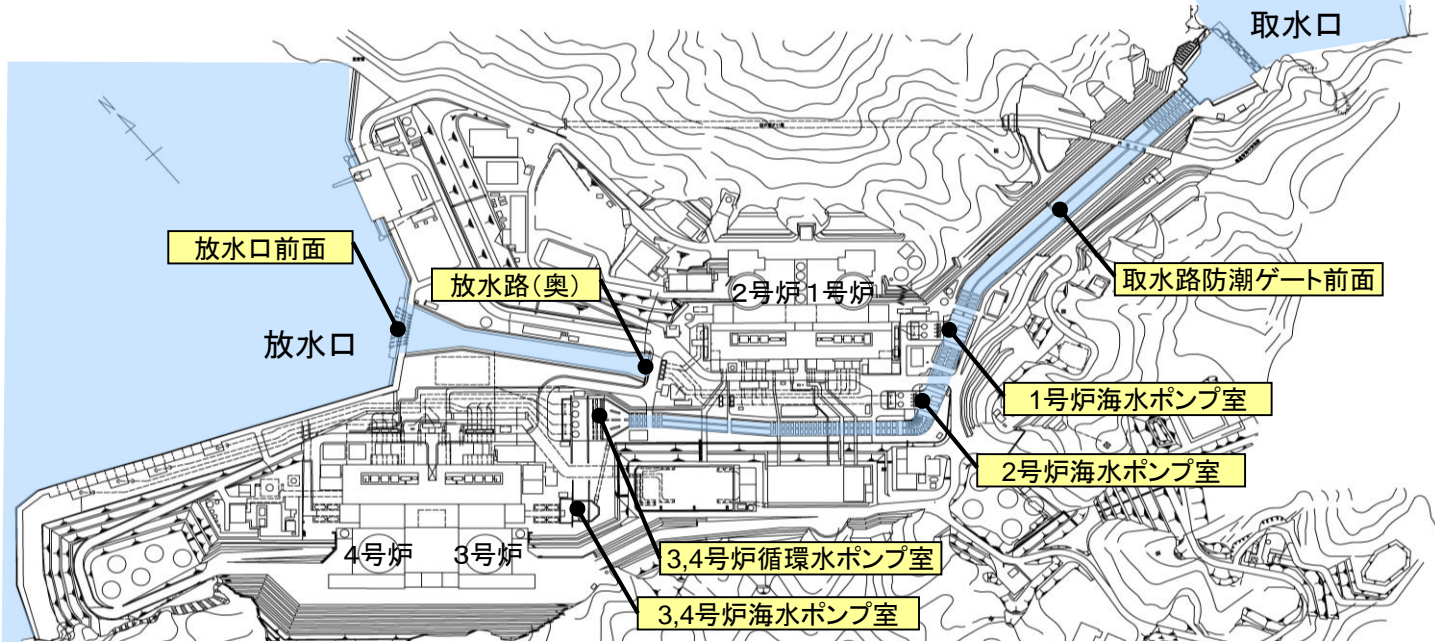
※発生時間のずれの検討は3秒ステップで実施している。

5-1. 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべりの組み合わせ

津波水位の評価結果(福井県モデル)

第314回審査会合
資料1-4-2 P125 再掲

海底地すべりの発生時間の不確かさを考慮した結果、水位変動が最大となる場合の水位及び発生時間のずれを下表に示す。



数字は、T.P.(m)
上段:水位
下段:発生時間のずれ

波源モデル		水位上昇側						水位下降側			
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室
若狭海丘列付近断層と 隠岐トラフ海底地すべり (エリアA)	発生時間の 不確かさ (87秒間)	4.4	1.2	1.1	1.1	1.5	3.6	3.8	-1.2	-1.1	-1.4
若狭海丘列付近断層と 隠岐トラフ海底地すべり (エリアB)	発生時間の 不確かさ (81秒間)	<u>5.7</u> (21秒)	<u>1.5</u> (0秒)	<u>1.3</u> (18,21秒)	<u>1.3</u> (18~24秒)	<u>1.8</u> (39秒)	<u>6.0</u> (63秒)	<u>6.1</u> (78秒)	<u>-1.3</u> (57,60秒)	-1.2	<u>-1.7</u> (81秒)
若狭海丘列付近断層と 隠岐トラフ海底地すべり (エリアC)	発生時間の 不確かさ (102秒間)	4.7	1.1	1.1	1.1	1.5	4.8	5.1	<u>-1.3</u> (90,93秒)	<u>-1.3</u> (78,81秒)	<u>-1.7</u> (60秒)

5-2. FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべりの組み合わせ

5-2-1. FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.1,2,3)

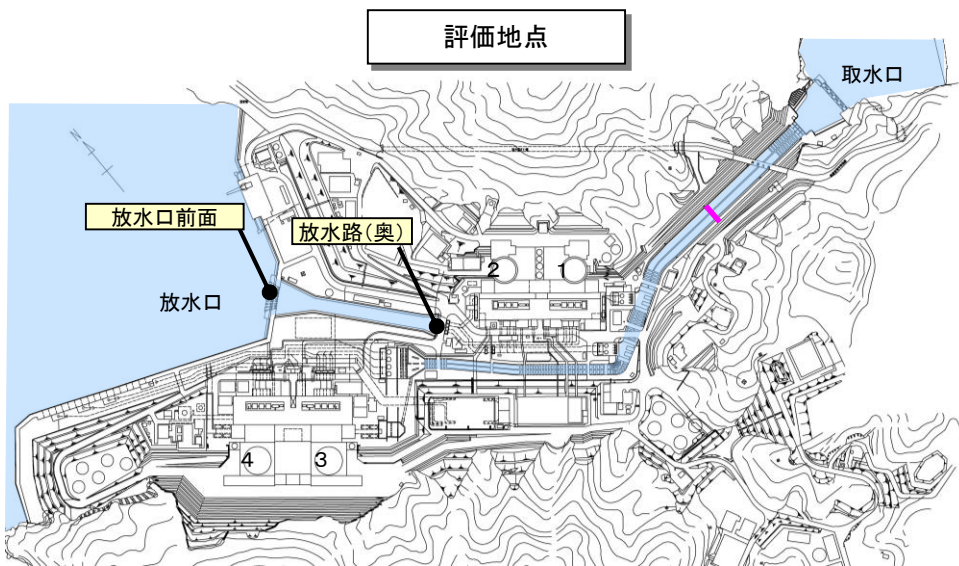
位置関係図



○地震と陸上地すべりの組み合わせによる津波水位については、FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべりについてそれぞれ単独に計算した結果を、地震と地すべりが同時発生したものと仮定して、足し合わせて算出した。

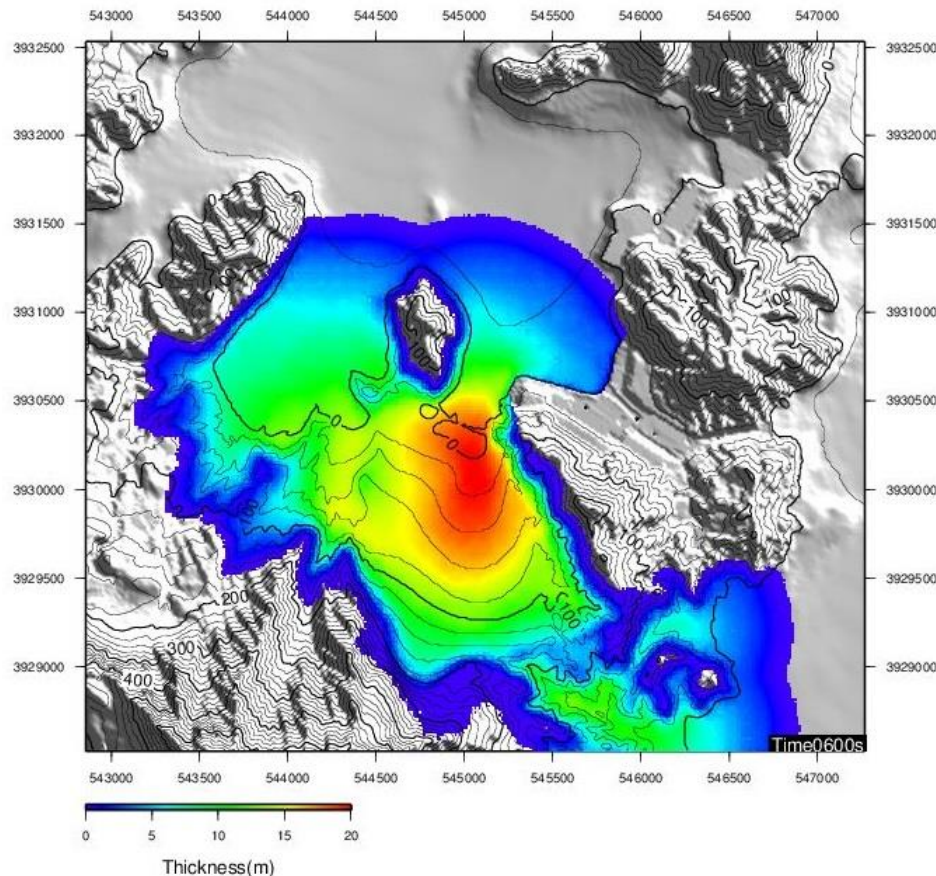
○地震と組み合わせる陸上地すべりとして、敷地に近く最も規模の大きい陸上地すべり(No.1,2,3)を対象とした検討を実施した。

津波水位評価に用いるNo.1,2,3地すべりの崩壊後の地形について

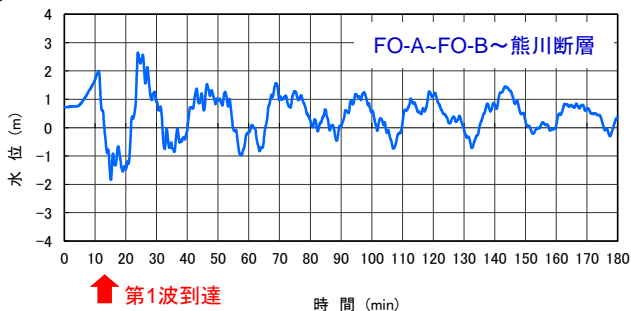


- ・潮位条件: 水位上昇側T.P.+0.49m
- ・取水条件: 取水なし

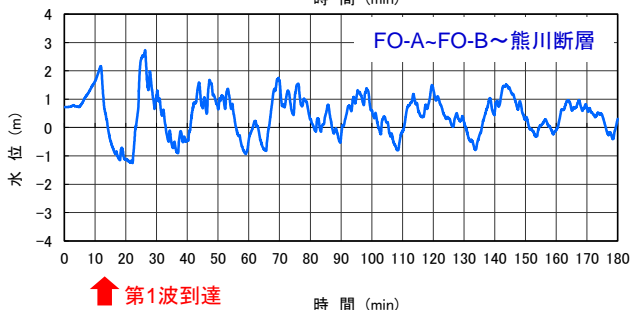
崩壊後(地すべり開始10分後)



放水口前面



放水路(奥)



○地すべり開始後10分後に地すべりがほぼ収束し、その後にFO-A~FO-B断層~熊川断層の第1波が到達する。
○よって、両津波を組み合わせた津波計算に用いる海底地形は地すべり開始後10分後の地形を用いる。

No.1,2,3地すべりの崩壊後の地形について

○地すべり規模と等価摩擦係数(H/L)の関係

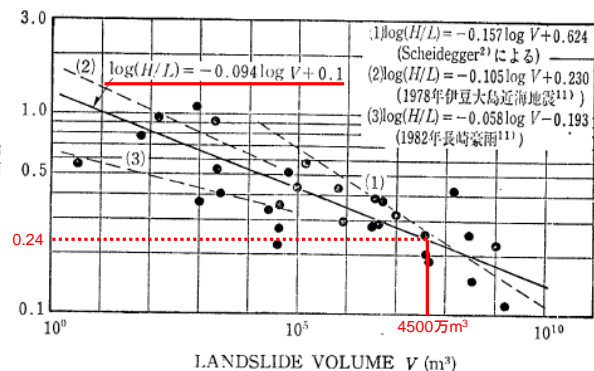


図-5 H/Lと崩壊土量Vの関係
H: 流下高, L: 到達距離

Fig. 5 Correlation between H/L and landslide volume V
H: runout height, L: runout distance

【森脇(1987)に追記】

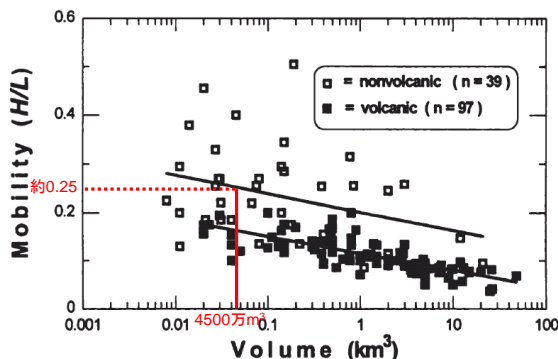
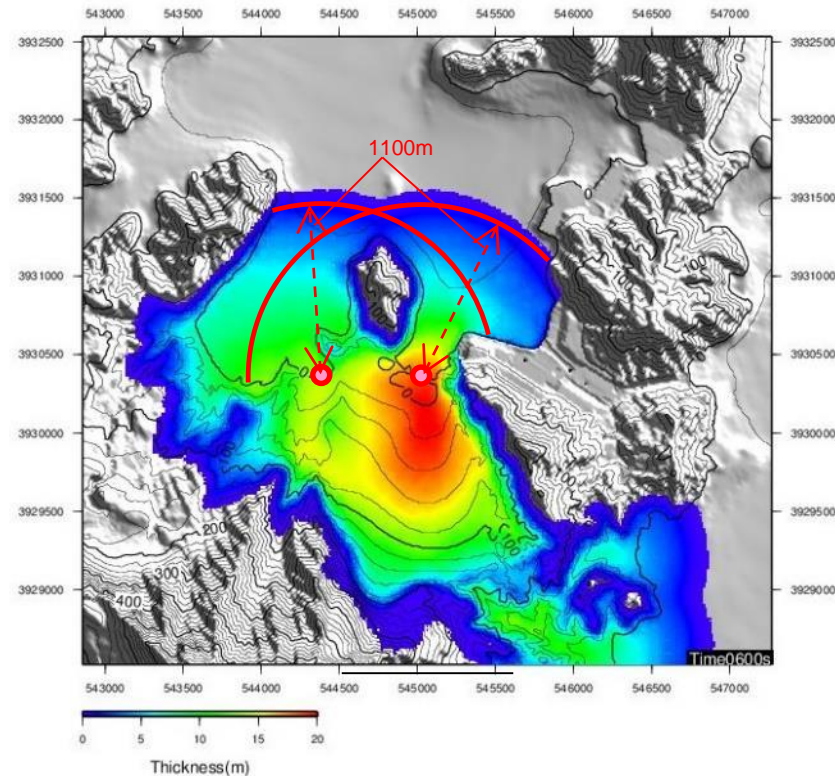


Figure 4. Semilogarithmic comparison of mobility (ratio of fall height to travel distance, H/L) and volume of nonvolcanic (data from Voight et al., 1985) and volcanic debris avalanches.

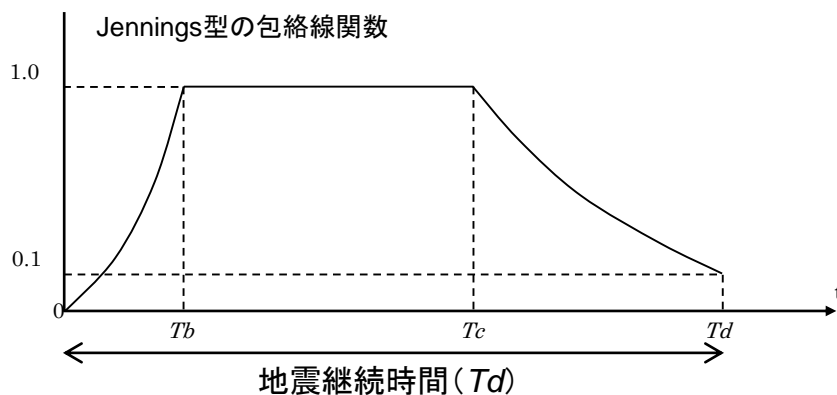
【Siebert(2002)に追記】

○崩壊後(地すべり開始10分後)の地形



地すべりの流下高(H)と流下距離(L)に関する既往の事例より、No.1,2,3地すべりの規模であれば、流下距離は1,100m程度となり、ほぼ地すべり開始10分後の地形に相当する。

発生時間の不確かさの考え方



継続時間については、以下の式及び条件を用いて57秒とした。

- ・FO-A~FO-B断層~熊川断層(断層長さ63.4km、M=7.8)
- ・断層と陸上地すべりNo.1,2,3までの距離 $X_{eq}=20\text{km}$

$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

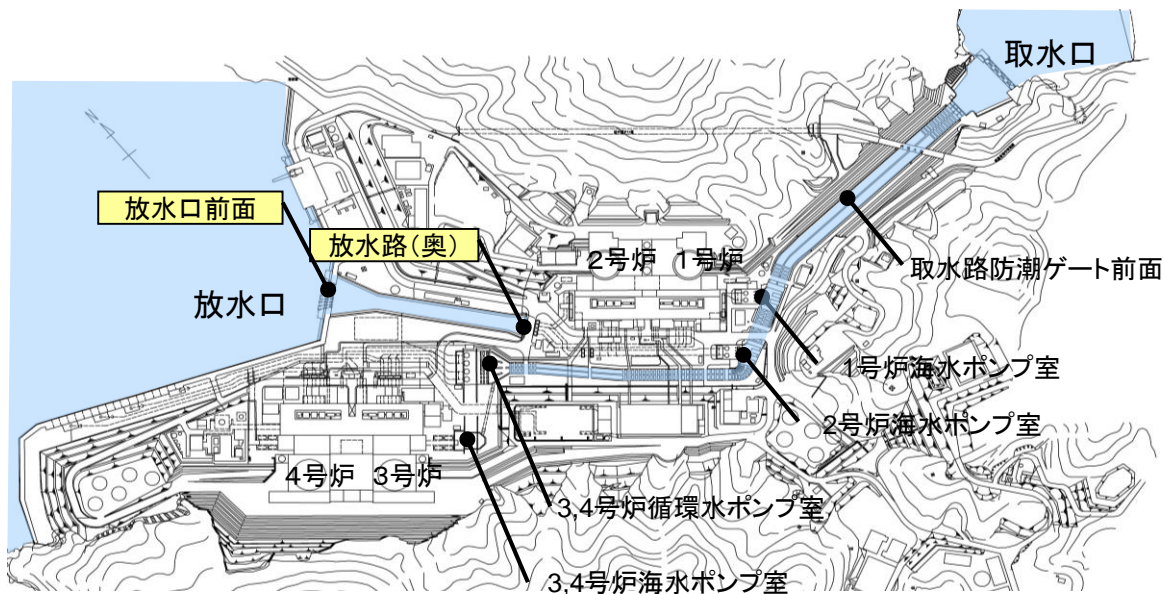
$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

地すべりの発生時間の不確かさについては、FO-A~FO-B断層~熊川断層の地震が発生し、**地震動が継続する57秒間**※のいずれかのタイミングで陸上地すべり(No.1,2,3)が発生すると仮定し、その時間の範囲内で水位変動が最大となる津波の組み合わせについて検討を実施した。

※発生時間のずれの検討は3秒ステップで実施している。

津波発生要因の組み合わせによる津波水位の評価結果

陸上地すべりの発生時間の不確かさを考慮した結果、水位変動が最大となる場合の水位及び発生時間のずれを下表に示す。



数字は、T.P.(m)
上段：水位
下段：発生時間のずれ

波源モデル		水位上昇側						
		(参考)※					放水口 前面	放水路 (奥)
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室		
FO-A~FO-B~熊川断層と 陸上地すべりNo.1,2,3	発生時間の 不確かさ (57秒間)	1.9 (3秒)	2.2 (0秒)	2.0 (0秒)	2.0 (0秒)	2.3 (45,48秒)	3.0 (0秒)	3.1 (0秒)

※：陸上地すべり(No.1,2,3)は、内浦湾内の局所的な現象であるため、放水口側のみの評価としている(取水口側は水位上昇側のみ参考値として示す)。

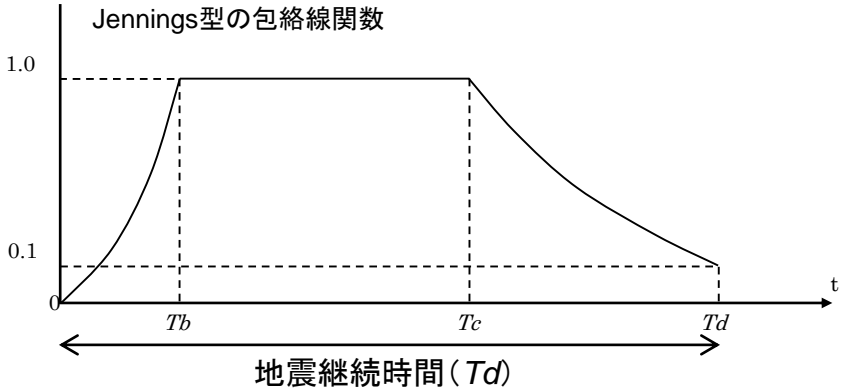
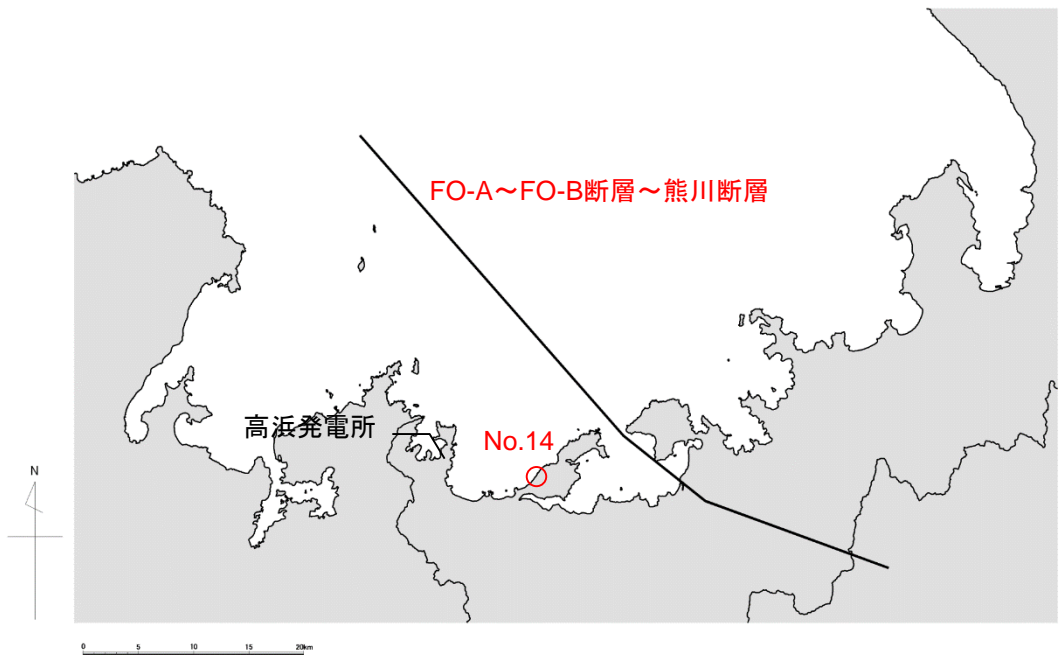
5-2-2. FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.14)

位置関係図



地震と組み合わせる陸上地すべりとして、取水口側対岸の大島半島西岸にある陸上地すべり(No.14)を対象とした検討を実施した。

発生時間の不確かさの考え方



継続時間については、以下の式及び条件を用いて54秒とした。

- ・FO-A~FO-B断層~熊川断層(断層長さ63.4km、M=7.8)
- ・断層と陸上地すべりNo.14までの距離 $X_{eq}=15\text{km}$

$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

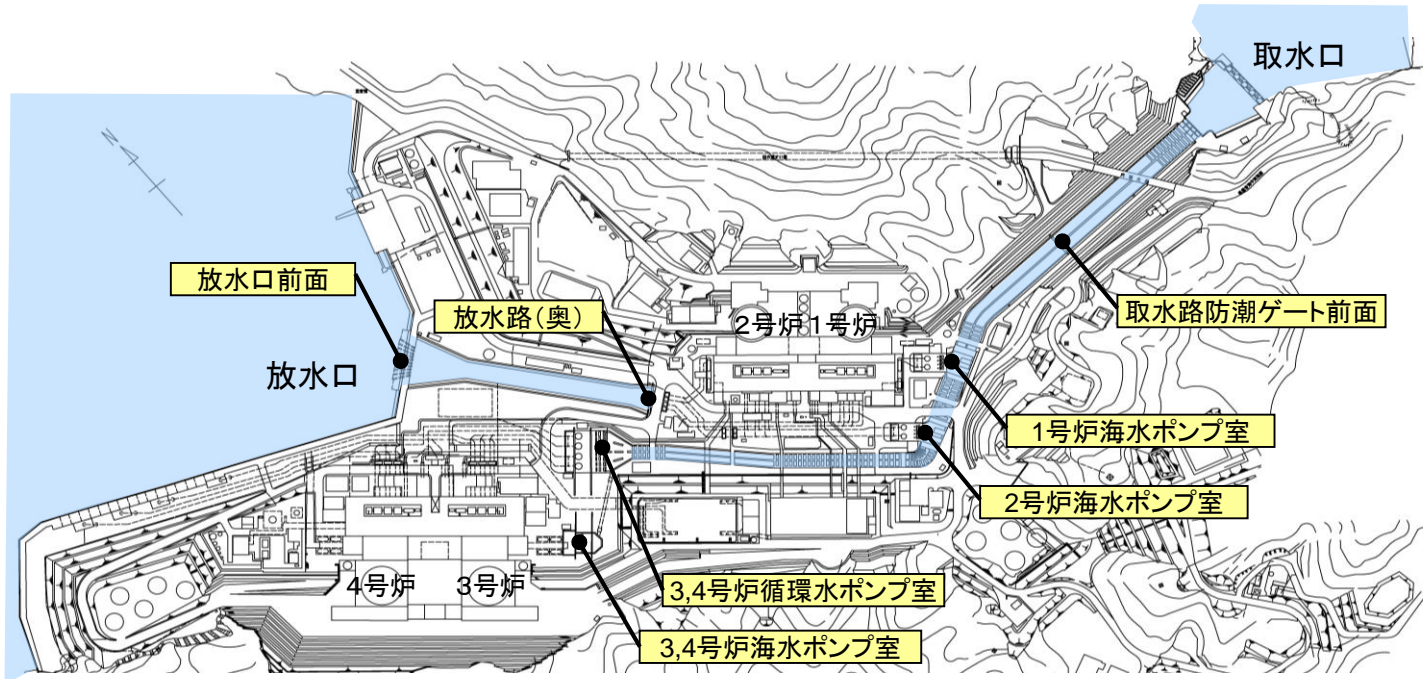
$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

地すべりの発生時間の不確かさについては、FO-A~FO-B断層~熊川断層の地震が発生し、**地震動が継続する54秒間**※のいずれかのタイミングで陸上地すべり(No.14)が発生すると仮定し、その時間の範囲内で水位変動が最大となる津波の組み合わせについて検討を実施した。

※発生時間のずれの検討は3秒ステップで実施している。

津波発生要因の組合せによる津波水位の評価結果

陸上地すべりの発生時間の不確かさを考慮した結果、水位変動が最大となる場合の水位及び発生時間のずれを下表に示す。



数字は、T.P.(m)
上段:水位
下段:発生時間のずれ

波源モデル		水位上昇側						水位下降側	
		取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉海水 ポンプ室	2号炉海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	1号炉海水 ポンプ室	2号炉海水 ポンプ室
FO-A~FO-B~熊川断層と 陸上地すべりNo.14	発生時間の 不確かさ (54秒間)	2.2 (54秒)	2.6 (54秒)	2.2 (54秒)	2.3 (54秒)	2.7 (36秒)	2.7 (54秒)	-2.0※ (51,54秒)	-1.9※ (30秒)

※地盤変動量0.23m発電所側隆起

6. 基準津波の選定

6. 基準津波の選定

【基準津波の選定方針】

- ① 敷地遡上の防止及び海水ポンプの取水性確保の観点から、各評価点において発電所への影響が大きい波源を選定する。
- ② 上記①の観点から、各評価点において最高水位・最低水位となる波源を基準津波として選定するが、敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源（施設影響が生じる波源）がある場合にはそれらを全て基準津波として選定する。
- ③ 警報が発表されない場合には警報に基づく取水路防潮ゲート閉止ができないため、ゲート内への津波の浸入によって施設の安全性に影響が生じるおそれがある。このため、警報に基づくゲート閉止を前提とした基準津波に加え、警報が発表されない場合についても上記①②の観点で基準津波を選定する。

【基準津波の選定結果】

(1) 既許可時(2016.4.20許可)の評価

- ・ 警報に基づいて取水路防潮ゲートを閉止する。
- ・ 敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源はない。（津波到達に対して防潮ゲート閉止が間に合わない波源もあるが、その場合でも敷地高さ及び取水可能水位を超えない。）
- ・ 防潮ゲート前面、放水口前面、放水路(奥)で最高水位となる波源は「福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と海底地すべりエリアBの組み合わせ」。
⇒ **基準津波1として選定。**
- ・ 各海水ポンプ室及び3,4号炉循環水ポンプ室で最高水位・最低水位となる波源は「FO-A～FO-B～熊川断層と陸上地すべり(No.14)の組み合わせ」。
⇒ **基準津波2として選定。**

(2) 警報が発表されない場合(今回評価)※

- ・ 警報に基づく取水路防潮ゲート閉止ができない。
- ・ 敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源は、「海底地すべりエリアB(Kinematicモデル)」及び「海底地すべりエリアC(Kinematicモデル)」。
⇒ **基準津波3、基準津波4として選定。**
- ・ 施設影響が生じる波源の確認過程における津波水位計算では、発電所に影響する波源を漏れなく抽出する観点から、水位変動が最も大きくなるように、海底地すべりの波源特性のうち崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値に設定した。一方、基準津波の選定方針では「施設影響が生じる波源がある場合にはそれらを全て基準津波として選定する」としていることから、上記2波源では、崩壊規模及び破壊伝播速度が最大値より小さい値でも施設影響が生じるのであれば基準津波として選定する必要がある。以上を踏まえ、施設影響が生じるケースを全て包含する波源とするために、**基準津波3及び基準津波4は、「海底地すべりエリアB(Es-K5、Kinematicモデル)」及び「海底地すべりエリアC(Es-T2、Kinematicモデル)」において崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持った波源として策定する。**なお、崩壊規模及び破壊伝播速度の上限値は、施設影響が生じる波源の確認過程において採用している最大値とする。
- ・ 基準津波3及び基準津波4は施設影響が生じることから、耐津波設計において対策を講じる。具体的には、若狭湾内の伝播特性により高浜発電所の取水口付近では襲来する津波の第1波より第2波以降の振幅が大きくなること、及び、基準津波3及び基準津波4では第2波以降の水位変動で施設影響が生じる結果となっていることを踏まえ、発電所構内の潮位計で判断基準(トリガー)を超える水位変動量を検知した場合に、取水路防潮ゲートを閉止し、施設影響が生じる後続波の浸入を防止することで施設影響を回避する。よって、安全設計上、施設影響が生じるケースをすべて検知できる判断基準の設定が必須である。そこで、耐津波設計では、基準津波3及び基準津波4を用いて施設影響が生じる津波をすべて検知できるように判断基準を設定する。海底地すべりを波源とする津波は、崩壊規模が小さくなると振幅が小さくなり、破壊伝播速度が小さくなると振幅が小さくなって周期が長くなる。したがって、海底地すべりを波源とする基準津波3及び基準津波4の崩壊規模、破壊伝播速度の値を小さくすることで、わずかに施設影響が生じる津波波形を作成し、これにより施設影響が生じる津波を網羅的に検知できる判断基準を設定する。よって、**耐津波設計における判断基準設定においては、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持つ基準津波3及び基準津波4を用いるものとする。**

6. 基準津波の選定

(1) 既許可時の評価(1/4)

水位評価結果(波源単体)

数字は、T.P.(m)

波源モデル		取水路 防潮 ゲート※1	水位上昇								水位下降					
			(参考)※2 取水口 前面	取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	(参考)※2 取水口 前面	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室		
地震に 起因する津波	大陸棚外縁～B～野坂断層		閉	3.8	5.3	0.9	0.9	0.9	1.3	2.1	2.1	—	—	—	—	
	FO-A～FO-B～熊川断層		開	2.1	2.0	2.1	1.9	1.9	2.5	2.7	2.8	-2.5	-1.9※3	-1.8※3	-2.0	
	日本海東縁部の波源		閉	—	—	—	—	—	—	—	—	-1.9	-0.8	-0.7	-1.0	
地震以外に 起因する津波	海底地すべり	エリアA	Watts他の予測式	閉	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.1	-0.3	-0.3	-0.3	
			Kinematicモデルによる方法	閉	1.7	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.6	1.8	-0.9	-0.8	-0.8	-0.8
		エリアB	Watts他の予測式	閉	1.9	2.0	0.8	0.8	0.8	1.0	1.9	2.1	-1.0	-0.7	-0.7	-0.8
			Kinematicモデルによる方法	閉	3.4	4.1	1.2	1.1	1.1	1.3	3.7	4.0	-3.0	-1.1	-1.0	-1.1
		エリアC	Watts他の予測式	閉	1.6	2.4	0.8	0.7	0.7	1.1	1.1	1.3	-1.0	-0.5	-0.5	-0.8
			Kinematicモデルによる方法	閉	2.8	3.3	1.1	1.1	1.1	1.2	3.7	3.9	-1.7	-0.9	-0.9	-1.2
	陸上地すべり	No.1,2,3	Watts他による方法	開	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
			運動学的手法	開	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	2.1	2.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
		No.10	Watts他による方法	開	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
			運動学的手法	開	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.5	1.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
		No.14	Watts他による方法	開	0.9	1.0	1.1	0.9	1.0	1.0	0.6	0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4
			運動学的手法	開	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	0.6	0.7	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
行政機関の 波源モデルを 用いた津波	福井県モデル(若狭海丘列付近断層)		閉	3.5	4.5	1.1	1.1	1.1	1.4	3.6	3.8	-3.5	-0.8	-0.8	-1.0	
	秋田県モデル(日本海東縁部の断層)		閉	4.0	4.4	1.7	1.7	1.7	1.7	2.9	3.0	-2.2	-1.4	-1.4	-1.6	
	若狭海丘列付近断層	大すべり中央	閉	2.5	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	2.1	2.1	—	—	—	—	
		大すべり隣接LRR	閉	2.4	3.6	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	1.9	—	—	—	—	
		大すべり隣接LLR	閉	2.4	3.7	0.7	0.7	0.7	1.2	1.9	2.0	—	—	—	—	

※1: 閉: 取水路防潮ゲート天端TP+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

※2: 取水口前面は評価点として用いていないが、取水口側の津波高さの目安として参考に記載している。

※3: 地盤変動量0.23m隆起

(1) 既許可時の評価(2/4)

水位評価結果(単体組合せ)

数字は、T.P.(m)

波源モデル			取水路 防潮 ゲート※1	水位上昇								水位下降				
地震に起因する津波	地震以外に起因する津波	発生時間 の不確かさ		(参考)※2 取水口 前面	取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	(参考)※2 取水口 前面	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	
若狭海丘列 付近断層 (福井県モデル)	隠岐トラフ 海底地すべり (Kinematic)	エリアA	87秒間	閉	3.4	4.4	1.2	1.1	1.1	1.5	3.6	3.8	-3.7	-1.2	-1.1	-1.4
		エリアB	81秒間		4.6	5.7 ① (21秒)	1.5	1.3	1.3	1.8	6.0 ② (63秒)	6.1 ③ (78秒)	-4.7	-1.3	-1.2	-1.7
		エリアC	102秒間		3.5	4.7	1.1	1.1	1.1	1.5	4.8	5.1	-4.3	-1.3	-1.3	-1.7
FO-A~FO-B~熊川断層	陸上地すべり (運動学的手法)	No.14	54秒間	開	2.2	2.2	2.6 ⑦ (54秒)	2.2 ⑦ (54秒)	2.3 ⑦ (54秒)	2.7 ⑤ (45秒)	2.7	2.7	-2.6	-2.0 ⑥※3 (51秒)	-1.9 ④※3 (30秒)	-2.0 ⑦※3 (54秒)
		No.1,2,3	57秒間		2.1	1.9	2.2	2.0	2.0	2.3	3.0	3.1	-	-	-	-

一体計算へ

一体計算へ

※1: 閉: 取水路防潮ゲート天端TP+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

※2: 取水口前面は評価点として用いていないが、取水口側の津波高さの目安として参考に記載している。

※3: 地盤変動量0.23m隆起

- 各評価点において津波水位が最大となる7ケースについて、一体計算を行う。
- 一体計算に当たっては、発電所に与える影響が最も大きい【発生時間のずれ】を考慮する。

6. 基準津波の選定

(1) 既許可時の評価(3/4)

水位評価結果(一体計算)

数字は、T.P.(m)

波源モデル	発生時間の ずれ	取水路 防潮 ゲート※1	ケース	水位上昇								水位下降				
				(参考)※2 取水口 前面	取水路 防潮ゲート 前面	3, 4号炉 循環水 ポンプ室	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	放水口 前面	放水路 (奥)	(参考)※2 取水口 前面	1号炉 海水 ポンプ室	2号炉 海水 ポンプ室	3, 4号炉 海水 ポンプ室	
福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と 隠岐トラフ海底地すべり(エリアB)	21秒	閉	①	3.9	4.9	1.3	1.3	1.2	1.7	5.0	5.8	—	—	—	—	
	63秒		②	4.4	5.1	1.3	1.3	1.2	1.8	5.3	6.1	—	—	—	—	
	78秒		③	4.5	<u>5.5</u>	1.3	1.2	1.1	1.7	<u>5.3</u>	<u>6.2</u>	—	—	—	—	
FO-A~FO-B~熊川断層と 陸上地すべり(No.14)	30秒	開	④	—	—	—	—	—	—	—	—	-2.5	<u>-1.9</u> ※3	-1.8※3	-1.9※3	
	45秒		⑤	2.1	2.1	2.4	2.1	2.1	2.5	2.7	2.7	—	—	—	—	
	51秒		⑥	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-2.5	-1.8※3	-1.8※3	<u>-2.0</u> ※3
	54秒		⑦	2.1	2.2	<u>2.5</u>	<u>2.2</u>	<u>2.2</u>	<u>2.5</u>	2.7	2.7	-2.5	<u>-1.8</u> ※3	<u>-1.8</u> ※3	<u>-2.0</u> ※3	

基準津波1

基準津波2

※1: 閉: 取水路防潮ゲート天端TP+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

※2: 取水口前面は評価点として用いていないが、取水口側の津波高さの目安として参考に記載している。

※3: 地盤変動量0.23m隆起

○一体計算の結果、取水路防潮ゲート及び放水口側の水位上昇に最も影響が大きい【若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべり】と、3,4号炉循環水ポンプ室、1号炉、2号炉、3,4号炉の各海水ポンプ室の水位上昇及び水位下降に最も影響が大きい【FO-A~FO-B断層~熊川断層と陸上地すべり】の計2波を基準津波として選定した。

○なお、水位下降側の評価においては、同じ波源の時間ずれであるケース④、⑥、⑦が僅差で並ぶ結果であったが、評価対象水位※4にも余裕があることから、基準津波としては水位上昇側にも影響があるケース⑦を代表として選定した※5。

○選定した基準津波は、福井県による既往評価や他の行政機関の波源モデルを用いた評価結果よりも大きな水位となっていることを確認した。

※4: 海水ポンプの取水可能水位: 約T.P.-3.2m

※5: ケース④の評価結果を【参考5】に示す。

6. 基準津波の選定

(1) 既許可時の評価(4/4)

水位評価結果(施設影響の有無)

津波水位計算結果に潮位のばらつき(上昇側+0.15m, 下降側-0.17m)、高潮の裕度(上昇側+0.49m)を考慮。

数字はT.P.(m)、青字は施設影響が生じる値(該当なし)

取水路防潮ゲート※1	波源モデル		水位上昇						水位下降					
			取水路防潮ゲート前面	3, 4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室		
閉 (Close)	地震に起因する津波	大陸棚外縁～B～野坂断層		5.9	1.6	1.5	1.5	1.9	2.7	2.8	—	—	—	
		日本海東縁部の波源		—	—	—	—	—	—	—	—	-0.9	-0.9	-1.1
	地震以外に起因する津波	海底地すべり	エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	-0.5	-0.5	-0.5
				Kinematicモデルによる方法	2.7	1.6	1.6	1.6	1.6	2.3	2.4	-0.9	-0.9	-1.0
			エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	2.7	1.5	1.5	1.5	1.6	2.6	2.8	-0.9	-0.9	-1.0
				Kinematicモデルによる方法	4.7	1.8	1.8	1.7	2.0	4.4	4.6	-1.2	-1.2	-1.3
			エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	3.0	1.4	1.3	1.3	1.8	1.8	2.0	-0.7	-0.7	-1.0
				Kinematicモデルによる方法	3.9	1.7	1.7	1.7	1.8	4.3	4.6	-1.1	-1.1	-1.4
	行政機関の波源モデルを用いた津波	福井県モデル(若狭海丘列付近断層)		5.1	1.7	1.8	1.7	2.0	4.2	4.4	-1.0	-1.0	-1.2	
		秋田県モデル(日本海東縁部の断層)		5.1	2.3	2.3	2.3	2.3	3.5	3.7	-1.6	-1.6	-1.8	
		若狭海丘列付近断層	大すべり中央		4.2	1.4	1.4	1.3	1.9	2.7	2.7	—	—	—
			大すべり隣接LRR		4.2	1.4	1.3	1.3	1.9	2.5	2.6	—	—	—
			大すべり隣接LLR		4.4	1.4	1.3	1.3	1.9	2.5	2.6	—	—	—
	津波の組み合わせ(一体計算)	福井県モデル(若狭海丘列付近断層)と隠岐トラフ海底地すべりエリアB(Es-K5)		21秒ずれ	5.5	2.0	1.9	1.9	2.3	5.7	6.4	—	—	—
				63秒ずれ	5.8	1.9	1.9	1.9	2.4	5.9	6.8	—	—	—
78秒ずれ				6.1	1.9	1.8	1.8	2.3	6.0	6.8	—	—	—	
開 (Open)	地震に起因する津波	FO-A～FO-B～熊川断層		2.6	2.8	2.5	2.5	3.1	3.3	3.4	-2.0	-2.0	-2.2	
		地震以外に起因する津波	陸上地すべり	No.1,2,3	Watts他による方法	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	-0.3	-0.3
	運動学的手法				1.3	1.4	1.3	1.3	1.5	2.7	2.8	-0.5	-0.5	-0.5
	No.10			Watts他による方法	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5	1.7	-0.3	-0.3	-0.3
				運動学的手法	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1	-0.3	-0.3	-0.3
	No.14			Watts他による方法	1.6	1.7	1.5	1.7	1.7	1.2	1.3	-0.5	-0.6	-0.6
				運動学的手法	1.7	1.9	1.7	1.7	1.7	1.2	1.3	-0.5	-0.5	-0.6
	津波の組み合わせ(一体計算)	FO-A～FO-B～熊川断層と陸上地すべり(No.14)		30秒ずれ	—	—	—	—	—	—	—	-2.1	-1.9	-2.1
				45秒ずれ	2.8	3.1	2.8	2.8	3.1	3.3	3.4	—	—	—
				51秒ずれ	—	—	—	—	—	—	—	—	-2.0	-2.0
54秒ずれ				2.8	3.1	2.8	2.8	3.1	3.3	3.4	-2.0	-2.0	-2.1	
施設影響が生じる高さ(上昇側:敷地高さ・防潮ゲート高さ・防潮堤高さ、下降側:取水可能水位)				8.5	3.5	3.5	3.5	3.5	8.0	8.0	-3.2	-3.2	-3.5	

基準津波1

基準津波2

※1: 閉: 取水路防潮ゲート先端TP+8.5mで全閉、開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0～+8.5mはカーテンウォールあり) ※2: 地盤変動量0.23m隆起

敷地高さを上回る波源及び海水ポンプの取水可能水位を下回る波源はない。

6. 基準津波の選定

(2) 警報が発表されない場合の評価(1/2)

水位評価結果

数字は、T.P.(m)

取水路防潮ゲート※1	波源モデル		水位上昇						水位下降					
			取水路防潮ゲート前面	3, 4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室		
開 (Open)	地震以外に起因する津波	海底地すべり	エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.5	-0.6	-1.1
				Kinematicモデルによる方法	2.0	2.3	2.1	2.2	2.6	1.6	1.8	-1.2	-1.4	-2.2
			エリアA (Es-G101)	Watts他の予測式	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.4	-0.5	-1.1
				Kinematicモデルによる方法	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1	0.8	0.9	-0.6	-0.7	-1.3
			エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	2.2	2.5	2.3	2.4	2.5	1.9	2.1	-1.4	-1.5	-2.1
				Kinematicモデルによる方法	3.6	3.9	3.7	3.8	3.8	3.7	4.0	-3.6	-3.7	-3.7
			エリアB (Es-K6)	Watts他の予測式	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	-0.7	-0.8	-1.3
				Kinematicモデルによる方法	2.0	2.3	2.1	2.1	2.3	1.7	1.9	-1.4	-1.5	-2.2
			エリアB (Es-K7)	Watts他の予測式	1.4	1.7	1.5	1.5	1.7	1.1	1.2	-0.9	-1.0	-1.6
				Kinematicモデルによる方法	2.1	2.3	2.1	2.2	2.6	2.2	2.4	-1.5	-1.6	-2.4
			エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	1.4	1.8	1.4	1.6	1.8	1.1	1.4	-1.3	-1.4	-2.2
				Kinematicモデルによる方法	3.2	3.7	3.3	3.5	3.6	3.7	3.9	-2.4	-2.5	-2.8
			エリアC (Es-T8)	Watts他の予測式	1.3	1.7	1.2	1.3	1.6	0.9	1.1	-1.0	-1.0	-1.7
				Kinematicモデルによる方法	1.8	2.1	1.9	2.0	2.1	2.4	2.5	-1.7	-1.9	-2.6
			エリアC (Es-T13)	Watts他の予測式	0.9	1.2	0.9	1.0	1.3	0.9	0.9	-0.6	-0.7	-1.3
				Kinematicモデルによる方法	1.8	2.0	1.8	1.8	2.1	2.3	2.4	-1.5	-1.6	-2.3
エリアC (Es-T14)	Watts他の予測式	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	-0.6	-0.7	-1.2			
	Kinematicモデルによる方法	2.0	2.4	2.1	2.2	2.4	1.9	2.0	-1.5	-1.6	-2.1			

基準津波3

基準津波4

※1: 閉: 取水路防潮ゲート天端TP+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

6. 基準津波の選定

(2) 警報が発表されない場合の評価(2/2)

水位評価結果(施設影響の有無)

津波水位計算結果に潮位のばらつき(上昇側+0.15m, 下降側-0.17m)、高潮の裕度(上昇側+0.49m)を考慮。

数字はT.P.(m)、青字は施設影響が生じる値(該当なし)

取水路防潮ゲート※1	波源モデル		水位上昇							水位下降				
			取水路防潮ゲート前面	3, 4号炉循環水ポンプ室	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室	放水口前面	放水路(奥)	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3, 4号炉海水ポンプ室		
開 (Open)	地震以外に起因する津波	海底地すべり	エリアA (Es-G3)	Watts他の予測式	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	-0.6	-0.7	-1.3
				Kinematicモデルによる方法	2.6	3.0	2.8	2.8	3.2	2.3	2.4	-1.4	-1.5	-2.4
			エリアA (Es-G101)	Watts他の予測式	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	-0.6	-0.7	-1.2
				Kinematicモデルによる方法	1.5	1.6	1.5	1.5	1.7	1.5	1.6	-0.8	-0.9	-1.5
			エリアB (Es-K5)	Watts他の予測式	2.8	3.1	3.0	3.0	3.1	2.6	2.8	-1.5	-1.6	-2.3
				Kinematicモデルによる方法	4.3	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	4.6	-3.7	-3.8	-3.8
			エリアB (Es-K6)	Watts他の予測式	1.7	1.9	1.8	1.8	1.9	1.6	1.7	-0.8	-0.9	-1.5
				Kinematicモデルによる方法	2.6	2.9	2.8	2.8	2.9	2.3	2.5	-1.5	-1.7	-2.4
			エリアB (Es-K7)	Watts他の予測式	2.1	2.4	2.1	2.1	2.3	1.7	1.8	-1.1	-1.2	-1.8
				Kinematicモデルによる方法	2.7	3.0	2.8	2.8	3.2	2.8	3.0	-1.7	-1.8	-2.5
			エリアC (Es-T2)	Watts他の予測式	2.0	2.4	2.1	2.2	2.5	1.8	2.0	-1.5	-1.6	-2.4
				Kinematicモデルによる方法	3.8	4.3	4.0	4.1	4.3	4.3	4.5	-2.5	-2.6	-2.9
			エリアC (Es-T8)	Watts他の予測式	2.0	2.3	1.9	1.9	2.3	1.6	1.7	-1.2	-1.2	-1.9
				Kinematicモデルによる方法	2.5	2.7	2.5	2.6	2.8	3.0	3.1	-1.9	-2.0	-2.8
			エリアC (Es-T13)	Watts他の予測式	1.5	1.8	1.6	1.6	1.9	1.5	1.5	-0.8	-0.9	-1.4
				Kinematicモデルによる方法	2.4	2.6	2.4	2.5	2.8	2.9	3.0	-1.7	-1.8	-2.5
			エリアC (Es-T14)	Watts他の予測式	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.4	1.5	-0.7	-0.8	-1.4
				Kinematicモデルによる方法	2.7	3.1	2.8	2.9	3.0	2.6	2.7	-1.6	-1.8	-2.3
施設影響が生じる高さ(上昇側:敷地高さ・防潮ゲート高さ・防潮堤高さ、下降側:取水可能水位)					8.5	3.5	3.5	3.5	3.5	8.0	8.0	-3.2	-3.2	-3.5

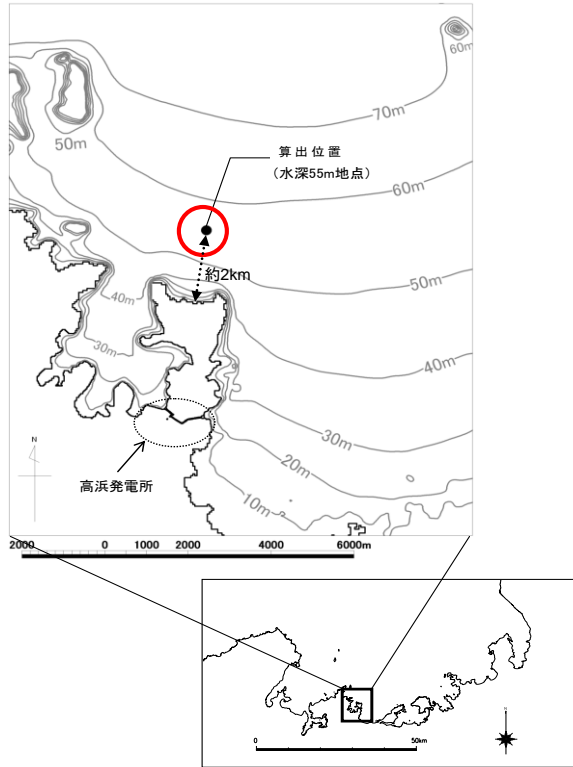
基準津波3

基準津波4

※1: 閉: 取水路防潮ゲート天端TP+8.5mで全閉、 開: 両系列のゲートが開いた状態(TP±0~+8.5mはカーテンウォールあり)

- 警報が発表されない場合において施設影響が生じる波源は「海底地すべりエリアB(Kinematicモデル)」及び「海底地すべりエリアC(Kinematicモデル)」であった。このため、既許可時に選定した基準津波1・基準津波2に加え、これらを基準津波3及び基準津波4として選定する。
- 施設影響が生じる波源の確認過程における津波水位計算では、発電所に影響する波源を漏れなく抽出する観点から、水位変動が最も大きくなるように、海底地すべりの波源特性のうち崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値に設定した。一方、基準津波の選定方針では「施設影響が生じる波源がある場合にはそれらを全て基準津波として選定する」としていることから、上記2波源では、崩壊規模及び破壊伝播速度が最大値より小さい値でも施設影響が生じるのであれば基準津波として選定する必要がある。以上を踏まえ、施設影響が生じるケースを全て包含する波源とするために、基準津波3及び基準津波4は、「海底地すべりエリアB(Es-K5、Kinematicモデル)」及び「海底地すべりエリアC(Es-T2、Kinematicモデル)」において崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持った波源として策定する。なお、崩壊規模及び破壊伝播速度の上限値は、施設影響が生じる波源の確認過程において採用している最大値とする。

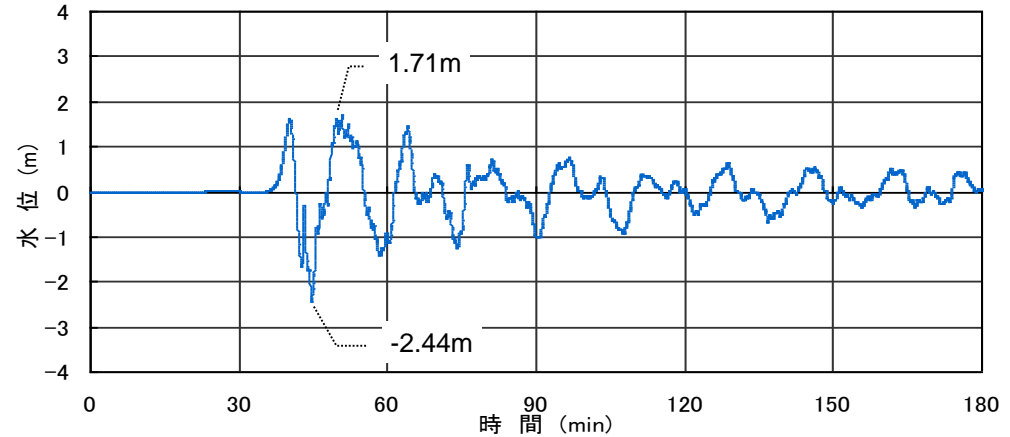
6. 基準津波の選定



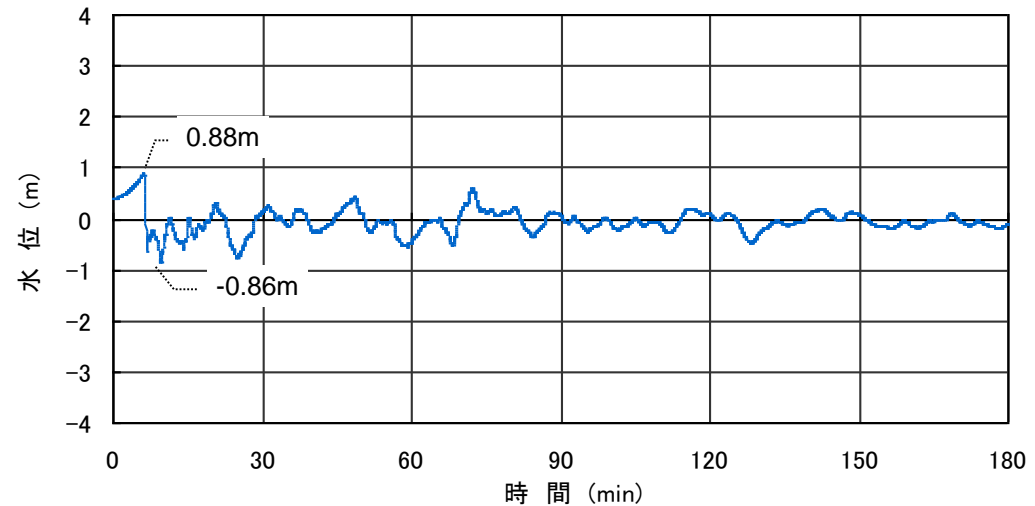
時刻歴波形の算出位置

基準津波は、時刻歴波形に対して施設からの反射波の影響が微小となるよう、音海半島から約2km離れた海域で定義した。

【基準津波1】 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべり(エリアB)

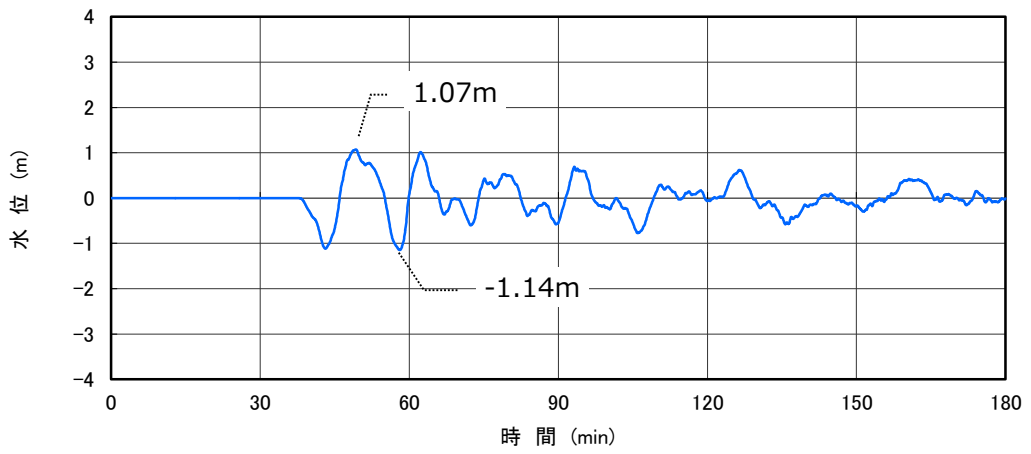
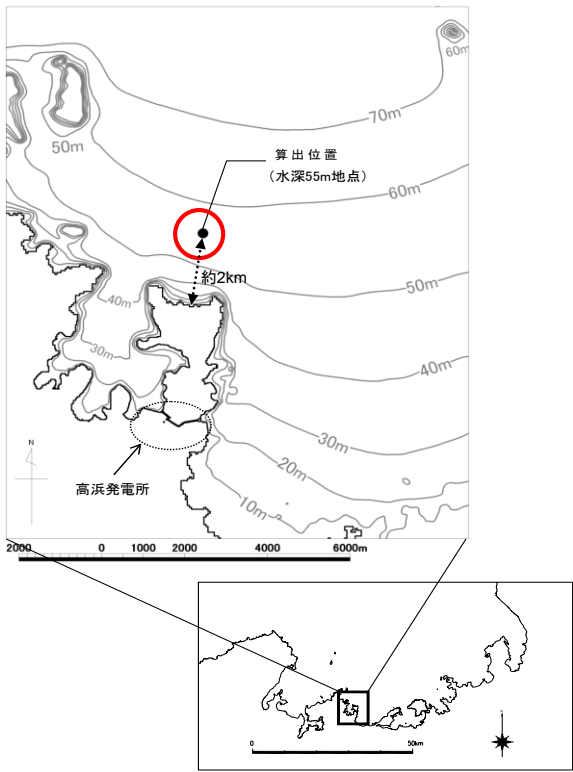


【基準津波2】 FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.14)

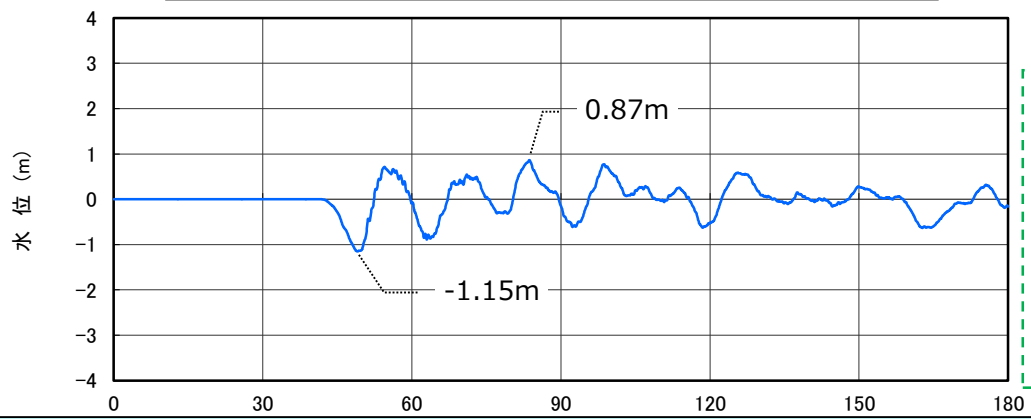


6. 基準津波の選定

【基準津波3】 隠岐トラフ海底地すべり（エリアB）



【基準津波4】 隠岐トラフ海底地すべり（エリアC）



※基準津波3及び基準津波4は、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持たせた波源を選定し策定することから、それらの値によって津波の計算結果は異なるが、一例として、崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値とした場合の基準津波定義位置の時刻歴波形を示す。

時刻歴波形の算出位置

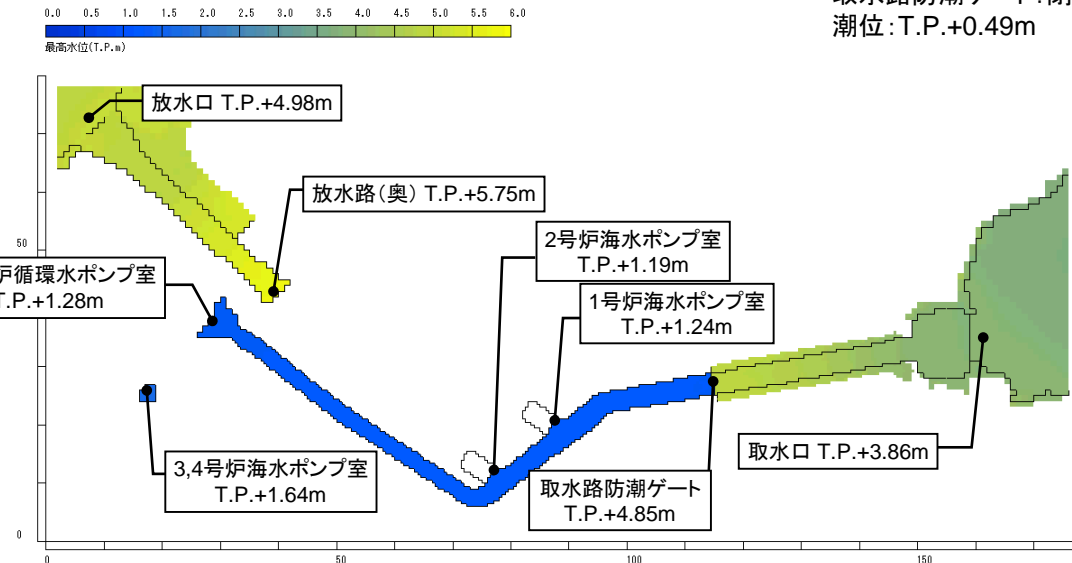
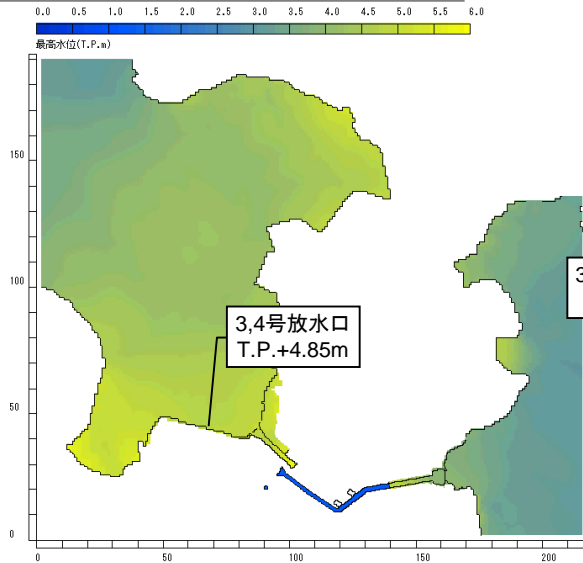
- 基準津波は、時刻歴波形に対して施設からの反射波の影響が微小となるよう、音海半島から約2km離れた海域で定義した。
- 基準津波3及び基準津波4は施設影響が生じることから、耐津波設計において対策を講じる。具体的には、若狭湾内の伝播特性により高浜発電所の取水口付近では襲来する津波の第1波より第2波以降の振幅が大きくなること、及び、基準津波3及び基準津波4では第2波以降の水位変動で施設影響が生じる結果となっていることを踏まえ、発電所構内の潮位計で判断基準(トリガー)を超える水位変動量を検知した場合に、取水路防潮ゲートを閉止し、施設影響が生じる後続波の浸入を防止することで施設影響を回避する。よって、安全設計上、施設影響が生じるケースをすべて検知できる判断基準の設定が必須である。そこで、耐津波設計では、基準津波3及び基準津波4を用いて施設影響が生じる津波をすべて検知できるように判断基準を設定する。海底地すべりを波源とする津波は、崩壊規模が小さくなると振幅が小さくなり、破壊伝播速度が小さくなると振幅が小さくなって周期が長くなる。したがって、海底地すべりを波源とする基準津波3及び基準津波4の崩壊規模、破壊伝播速度の値を小さくすることで、わずかに施設影響が生じる津波波形を作成し、これにより施設影響が生じる津波を網羅的に検知できる判断基準を設定する。よって、耐津波設計における判断基準設定においては、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持つ基準津波3及び基準津波4を用いるものとする。

6. 基準津波の選定

一体計算結果(水位上昇側)

①

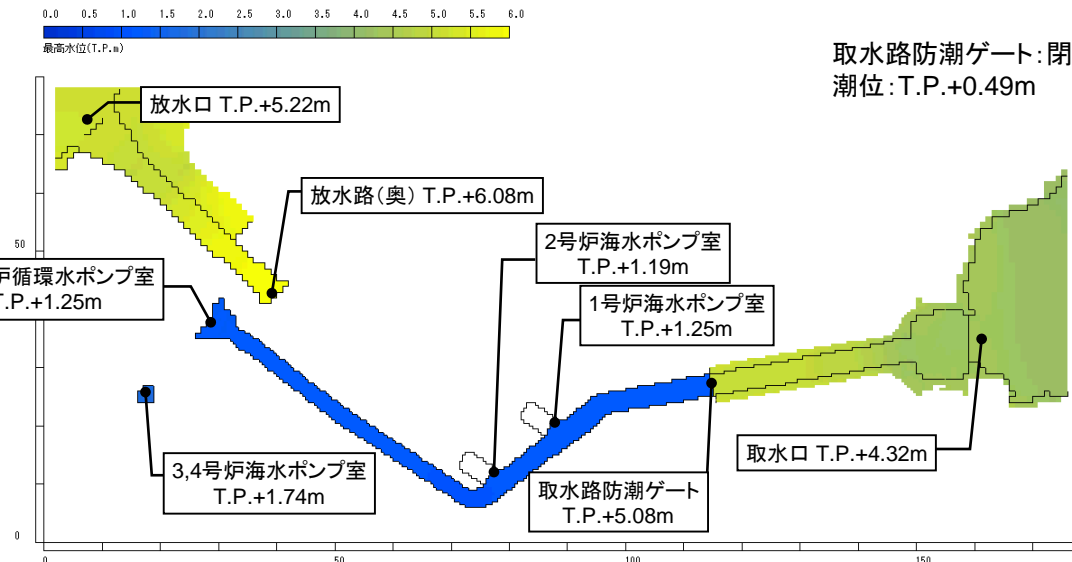
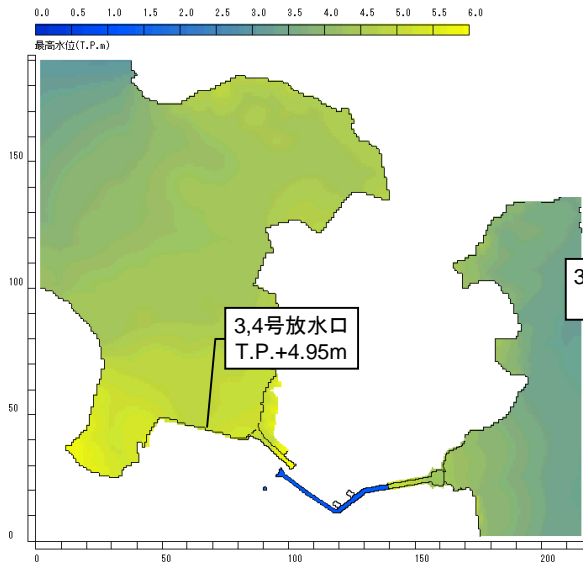
福井県モデル(若狭海丘列付近断層)
+海底地すべりB(21秒ずれ)



取水路防潮ゲート:閉
潮位:T.P.+0.49m

②

福井県モデル(若狭海丘列付近断層)
+海底地すべりB(63秒ずれ)



取水路防潮ゲート:閉
潮位:T.P.+0.49m

6. 基準津波の選定

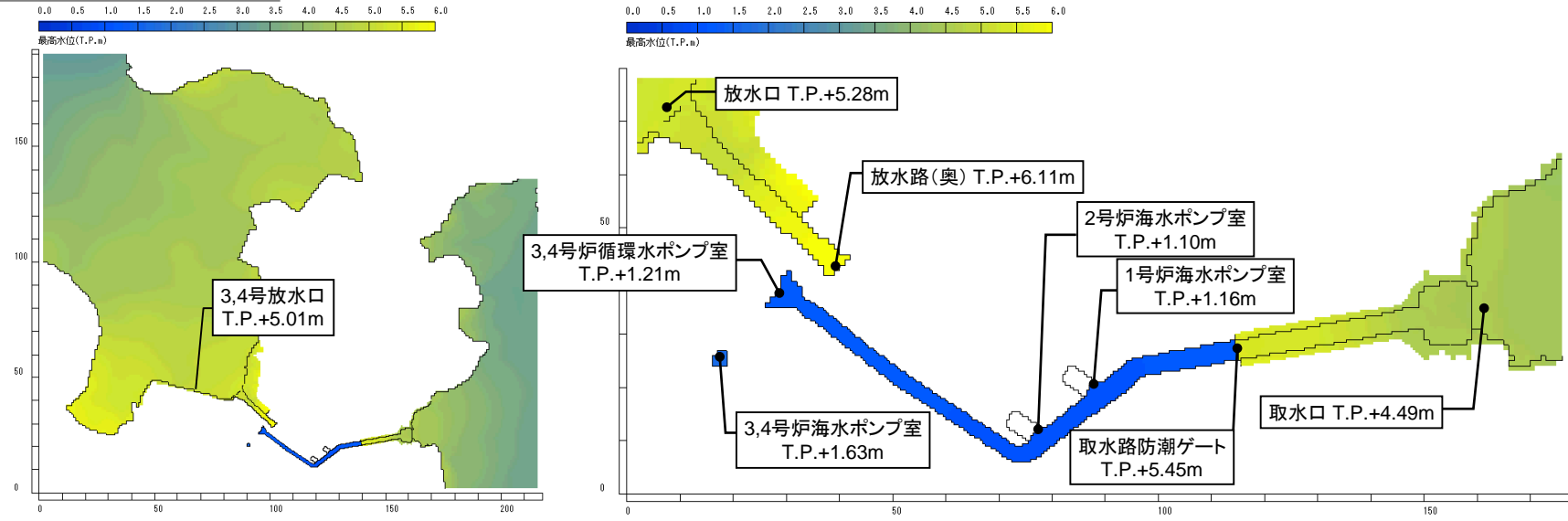
一体計算結果(水位上昇側)

取水路防潮ゲート:閉
潮位:T.P.+0.49m

福井県モデル(若狭海丘列付近断層)
+海底地すべりB(78秒ずれ)

③

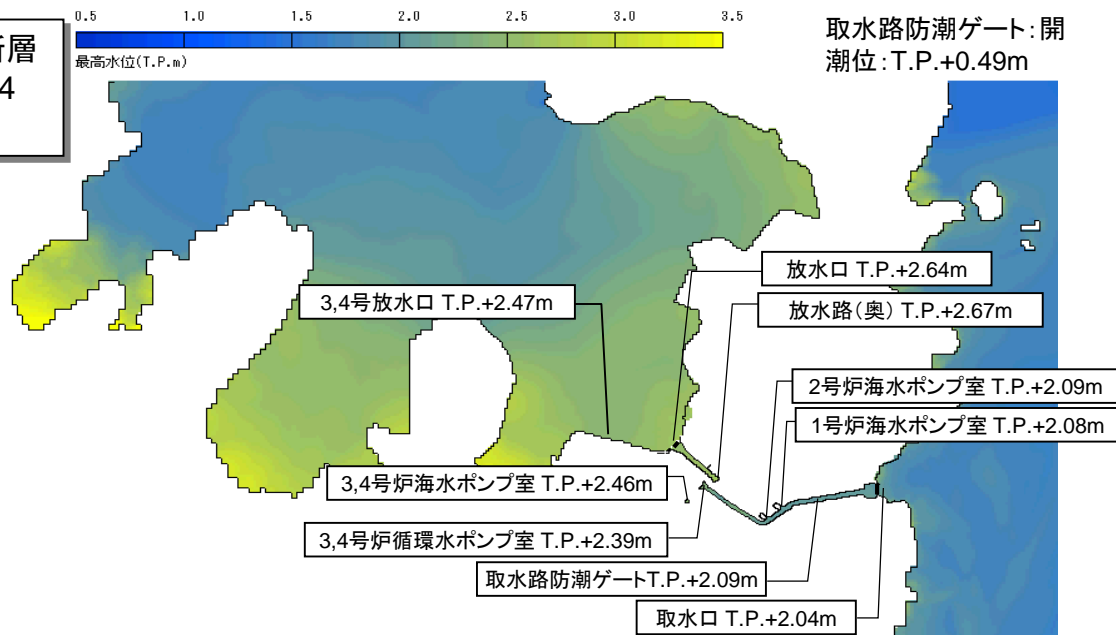
基準津波1



一体計算結果(水位上昇側)

⑤

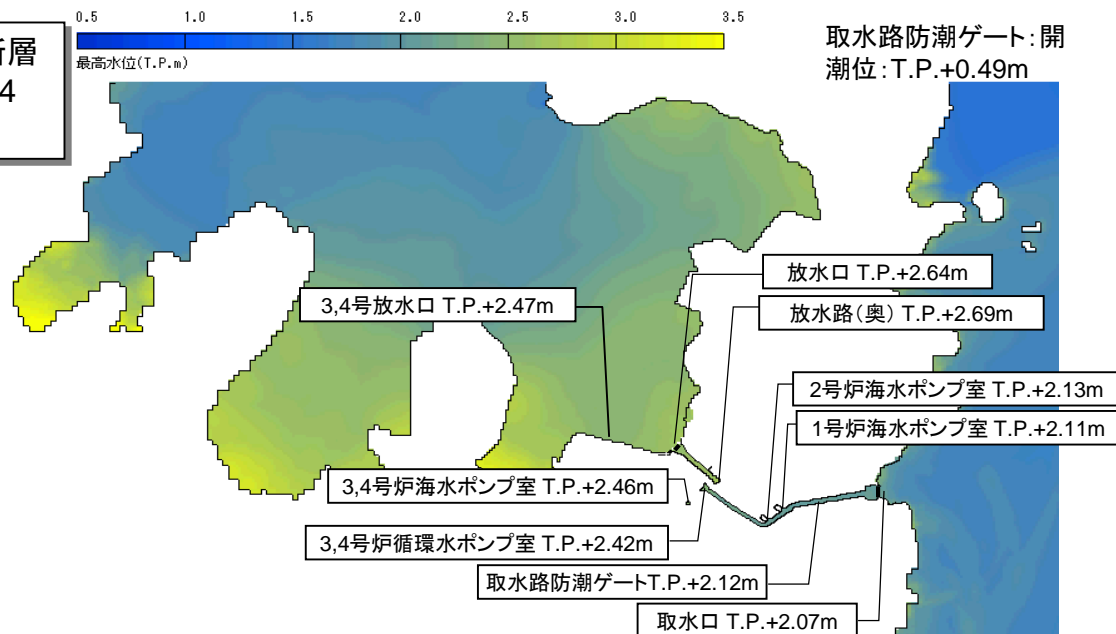
FO-A~FO-B~熊川断層
+陸上地すべりNo.14
(45秒ずれ)



⑦

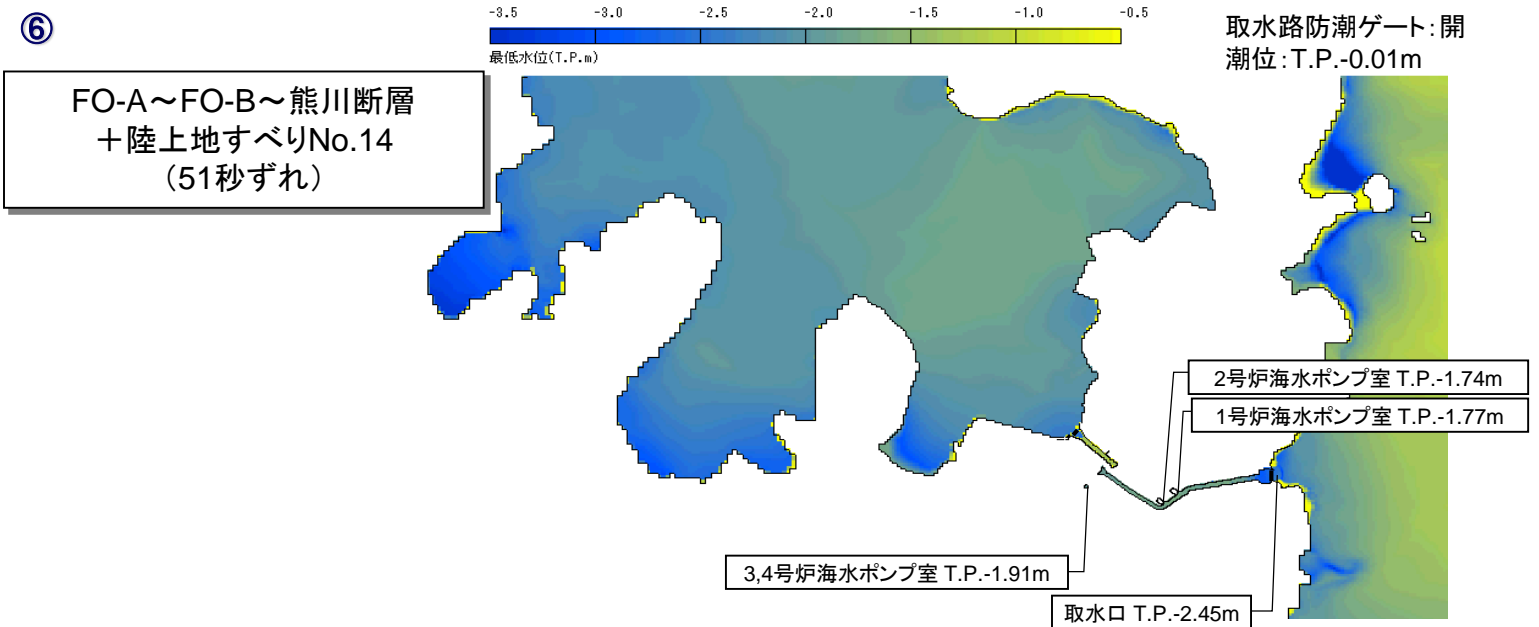
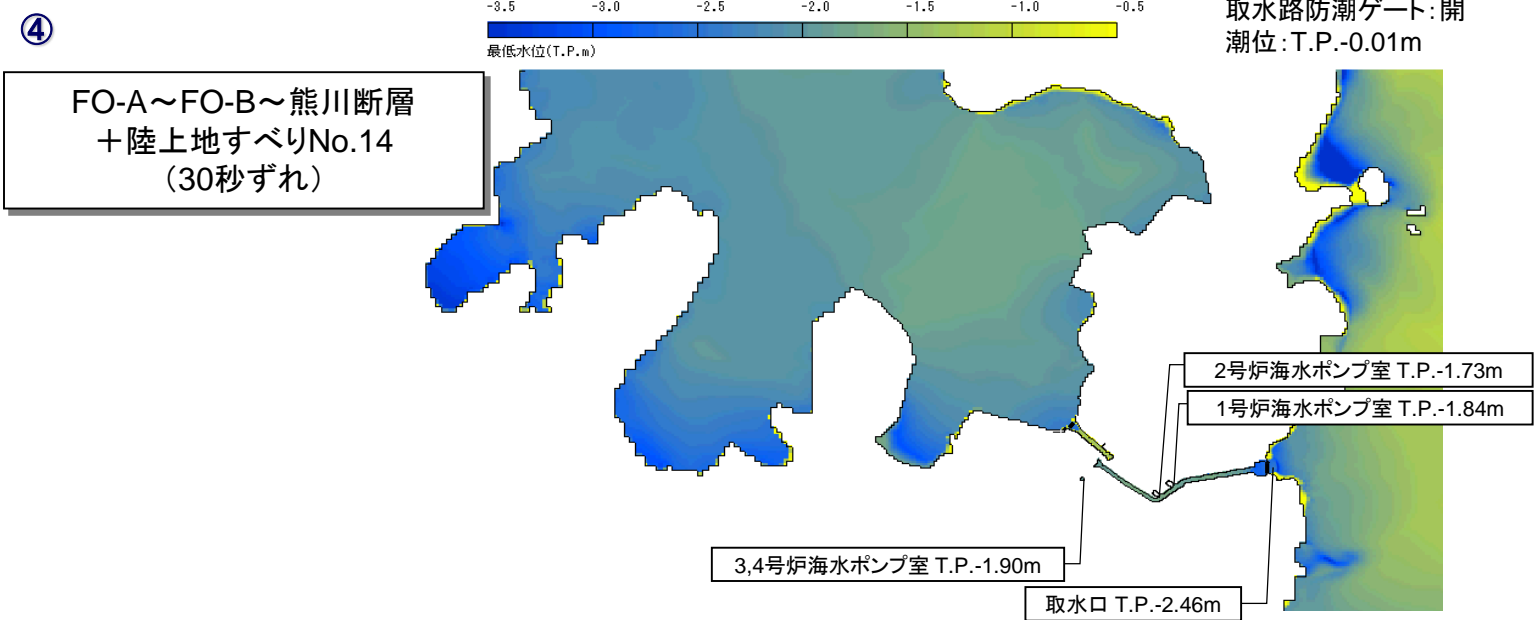
FO-A~FO-B~熊川断層
+陸上地すべりNo.14
(54秒ずれ)

基準津波2



6. 基準津波の選定

一体計算結果(水位下降側)



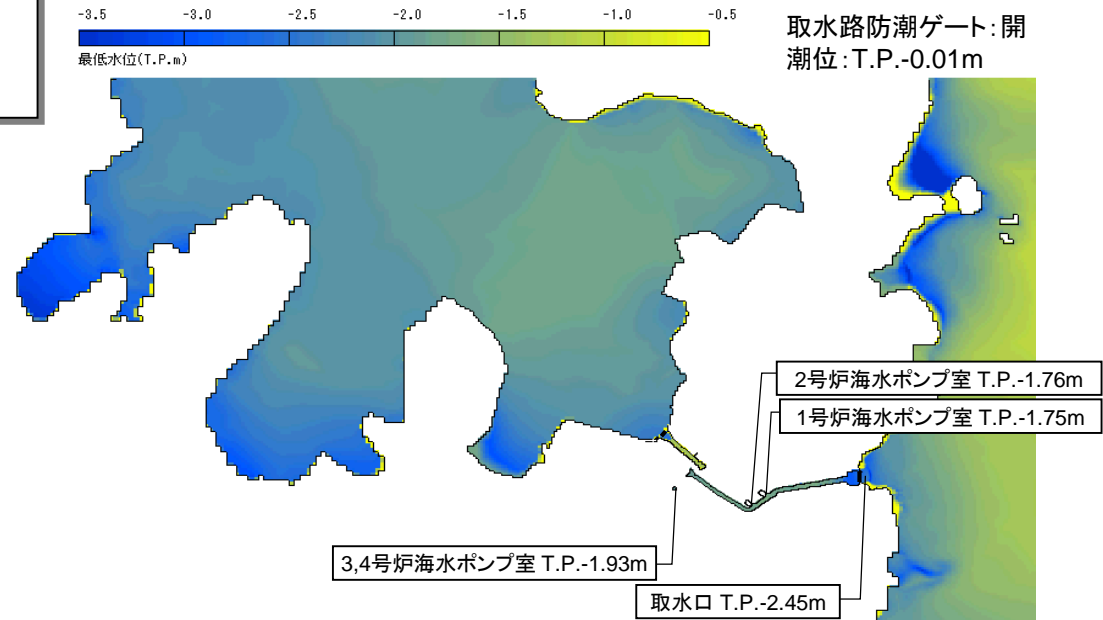
6. 基準津波の選定

一体計算結果(水位下降側)

⑦

FO-A~FO-B~熊川断層
+陸上地すべりNo.14
(54秒ずれ)

基準津波2

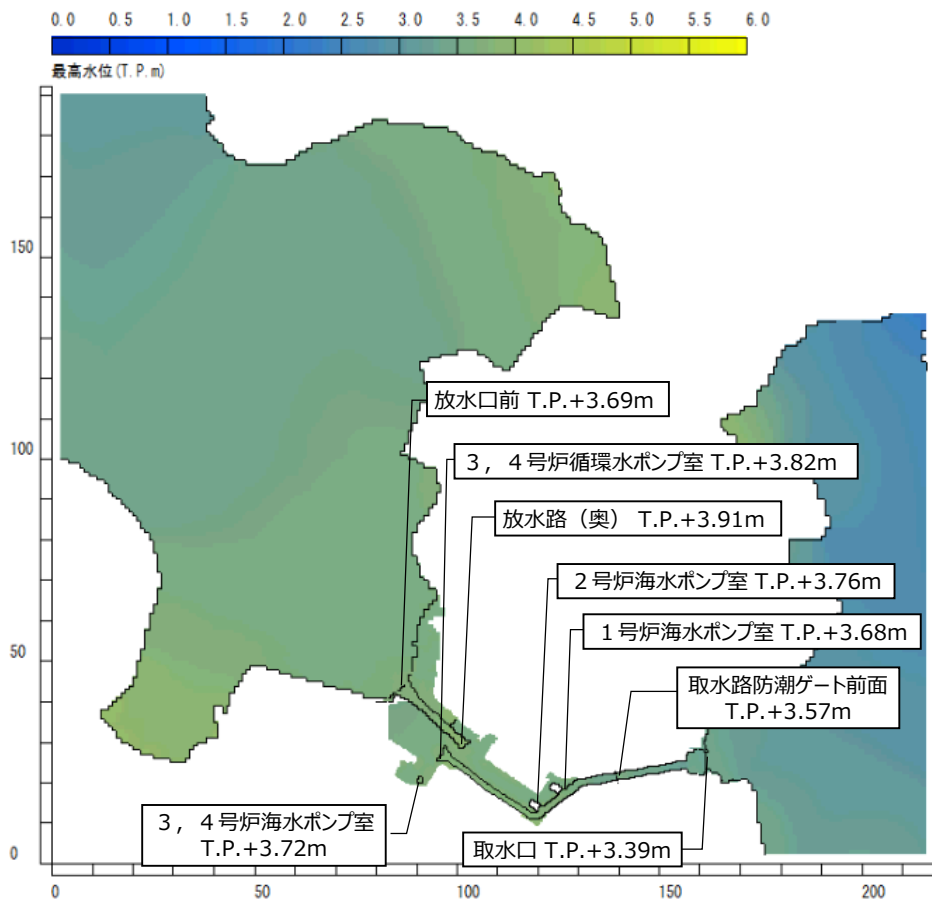


6. 基準津波の選定 計算結果

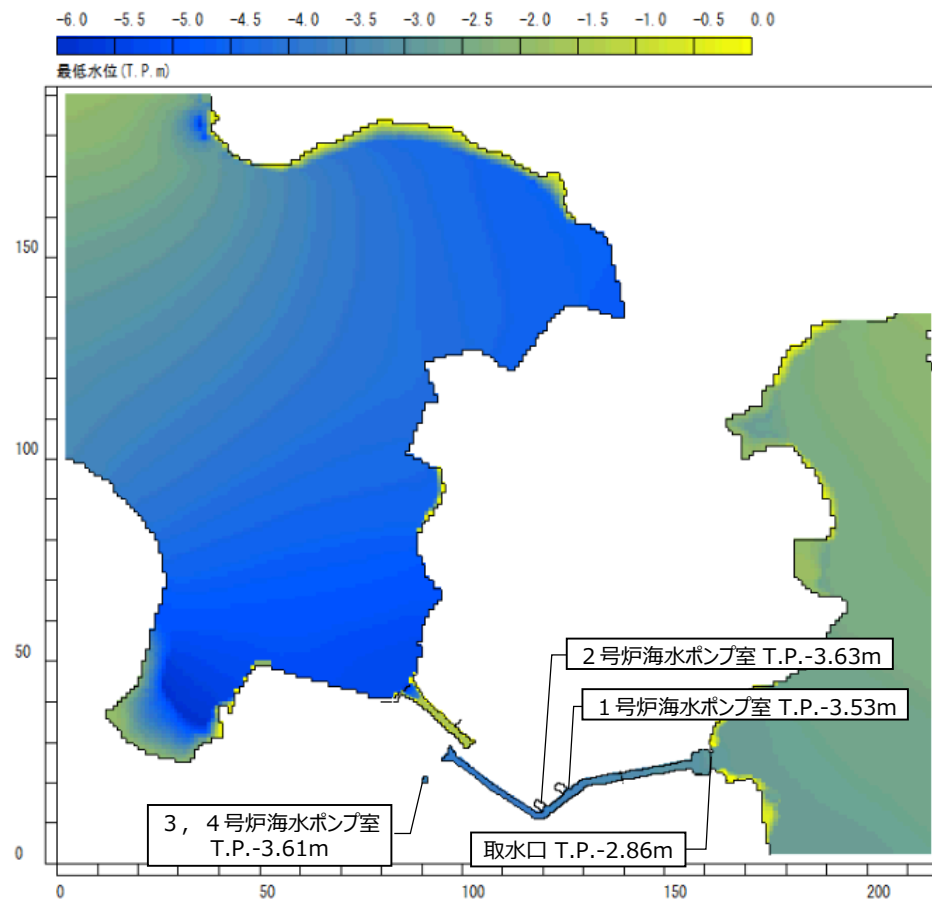
基準津波3

隠岐トラフ海底地すべり(エリアB)

水位上昇側



水位下降側

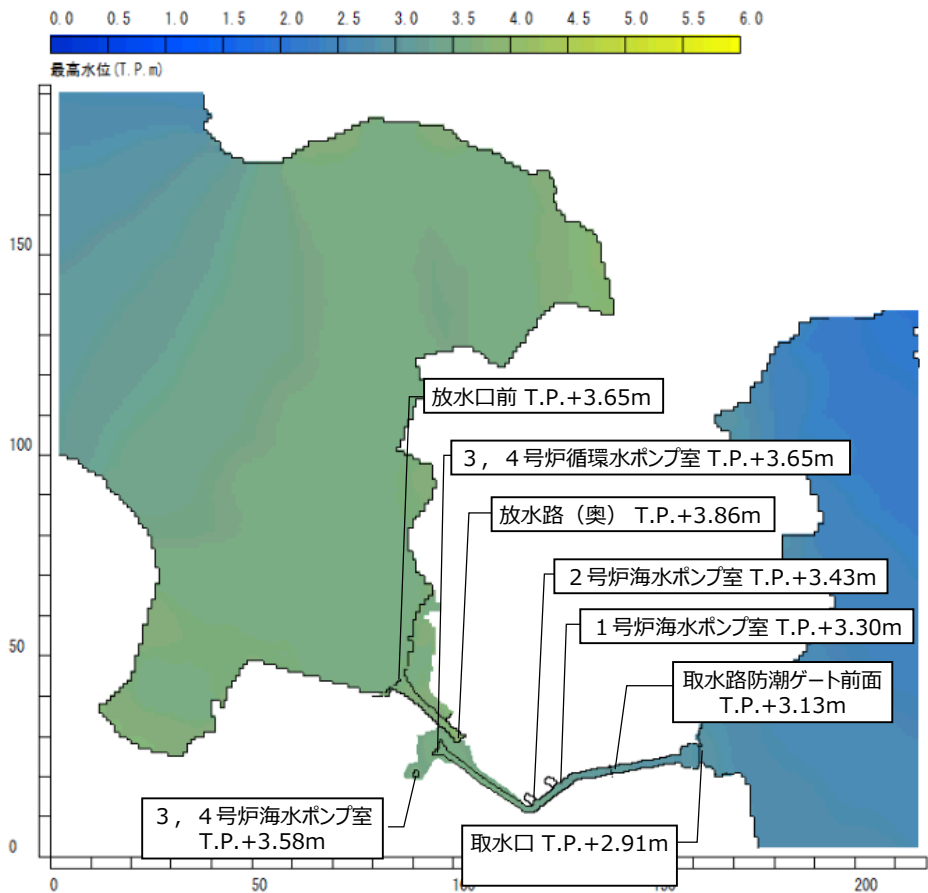


6. 基準津波の選定 計算結果

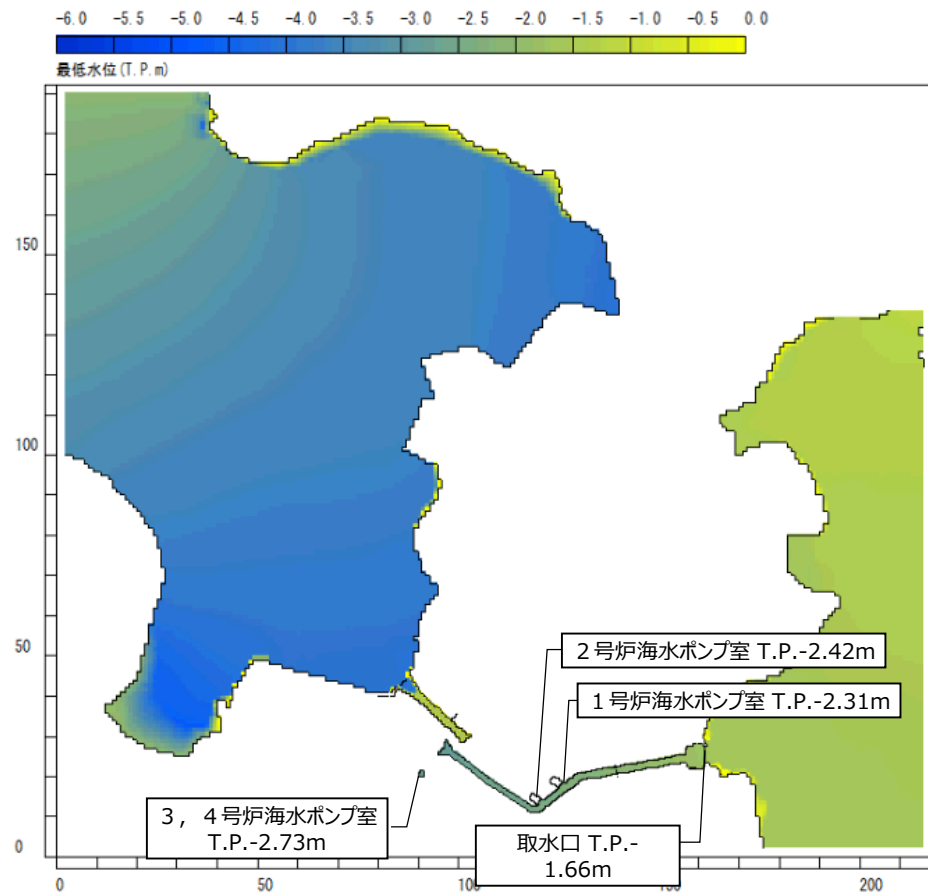
基準津波4

隠岐トラフ海底地すべり(エリアC)

水位上昇側

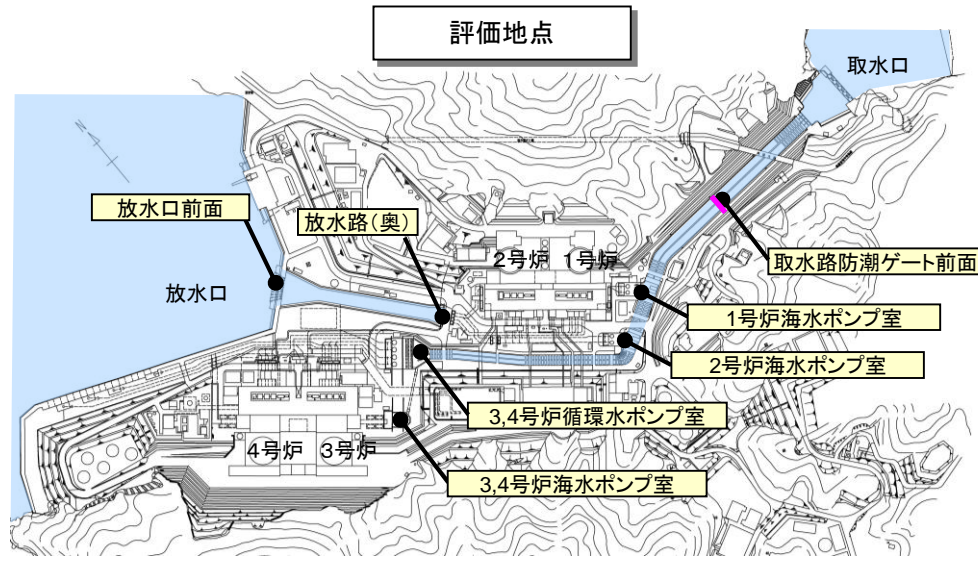


水位下降側

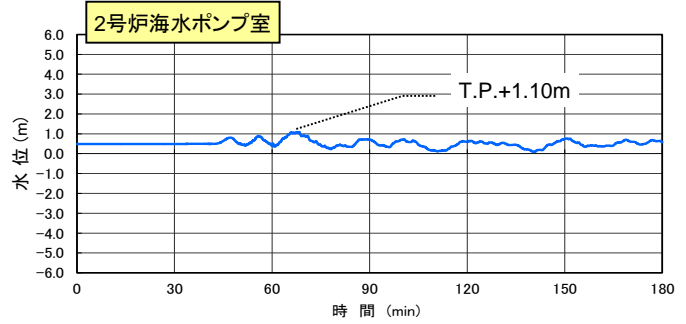
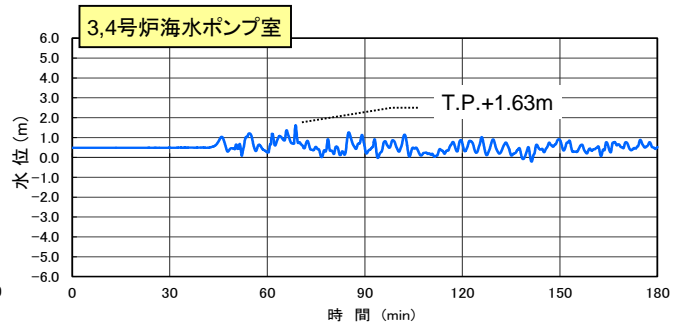
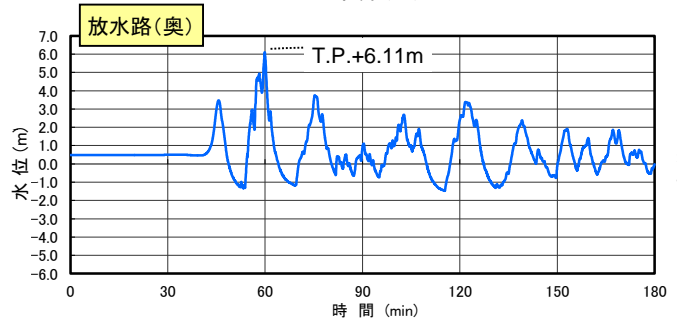
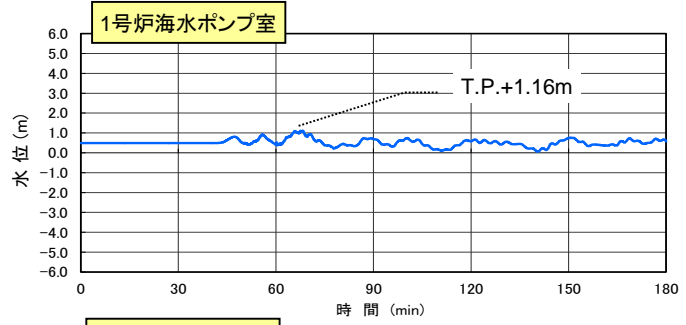
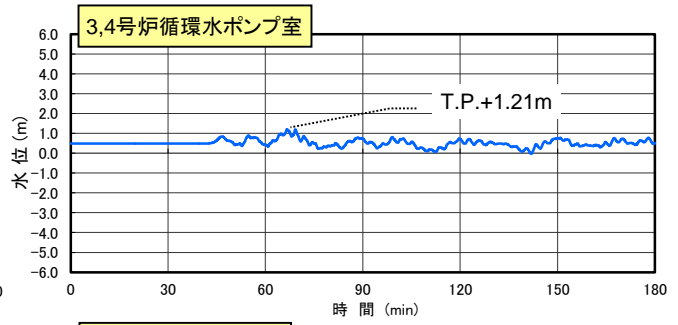
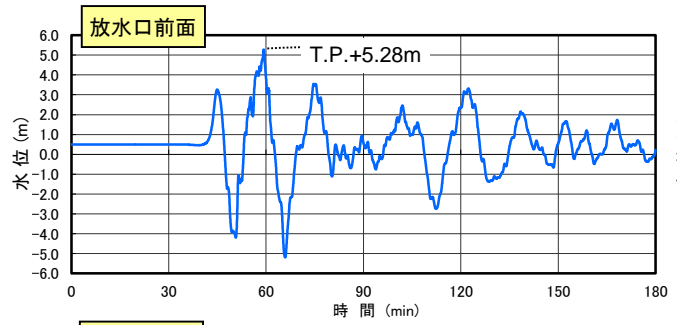
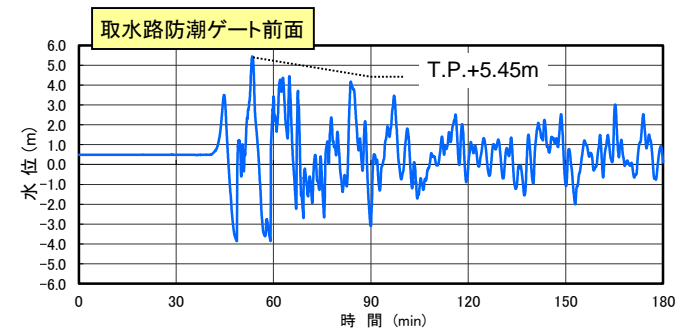


6. 基準津波の選定

時刻歴波形図(基準津波1:水位上昇側)

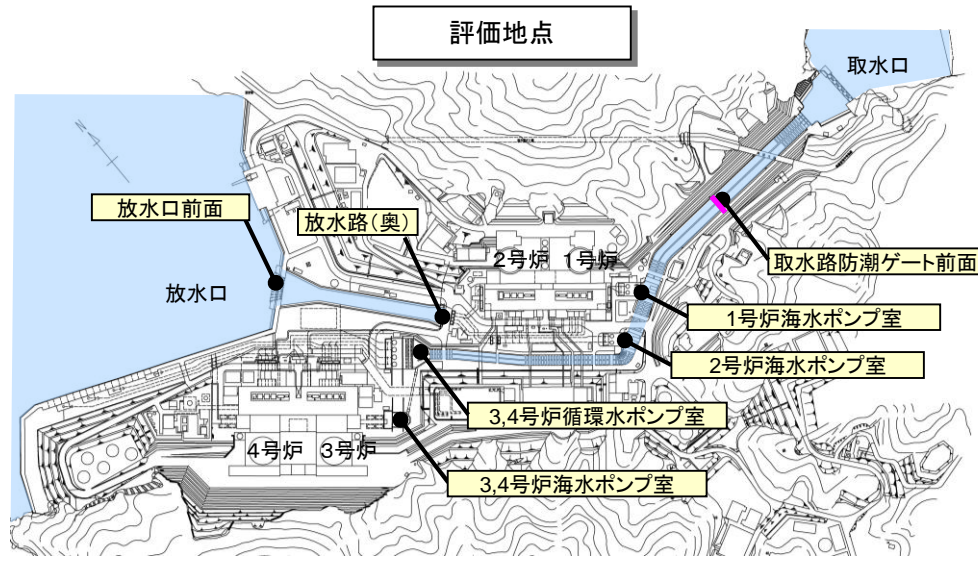


・潮位条件: 水位上昇側T.P.+0.49m
・取水条件: 水位上昇側:取水なし

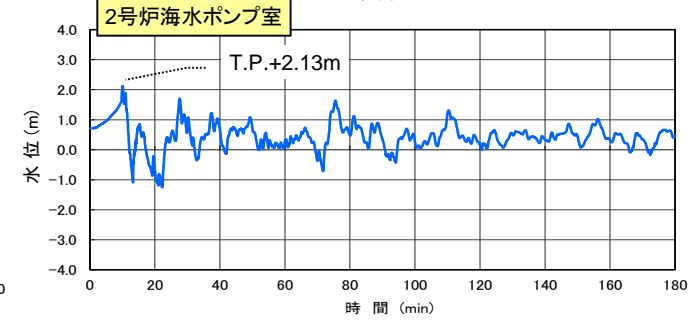
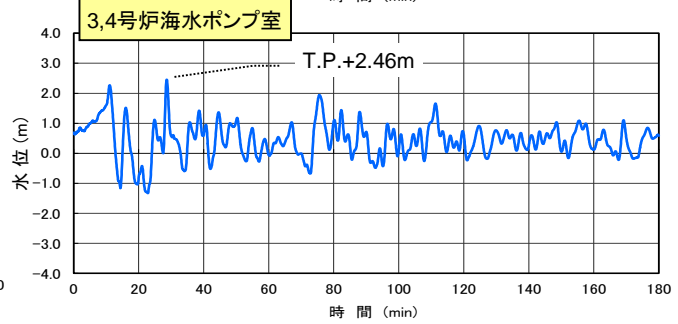
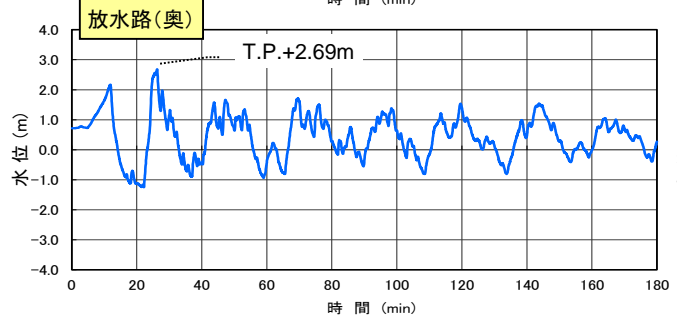
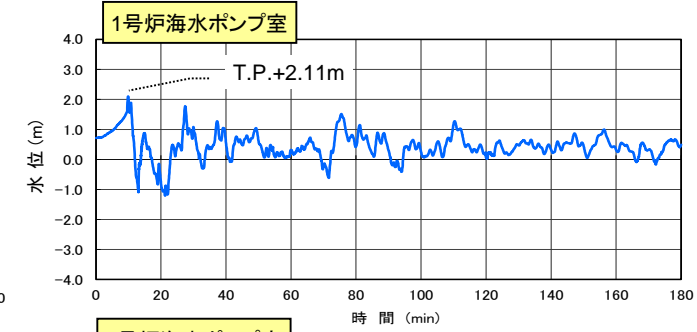
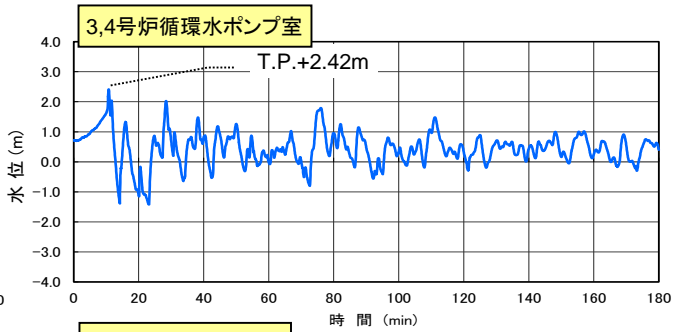
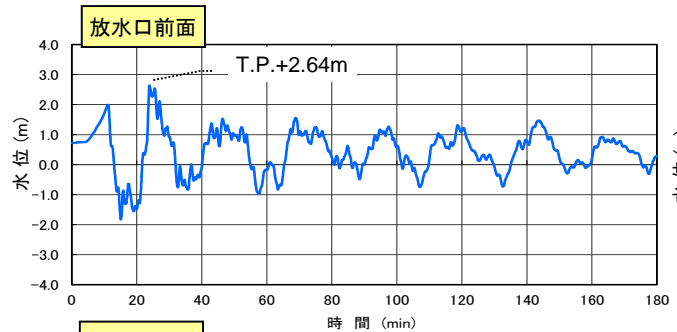
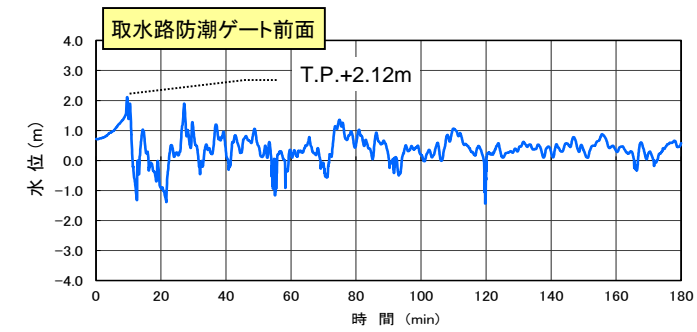


6. 基準津波の選定

時刻歴波形図(基準津波2:水位上昇側)



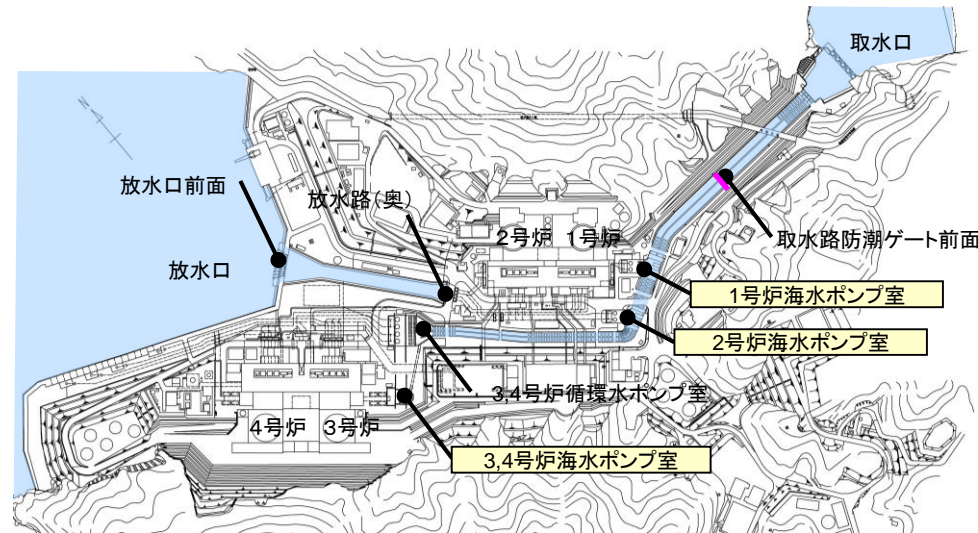
・潮位条件: 水位上昇側T.P.+0.49m
・取水条件: 水位上昇側:取水なし



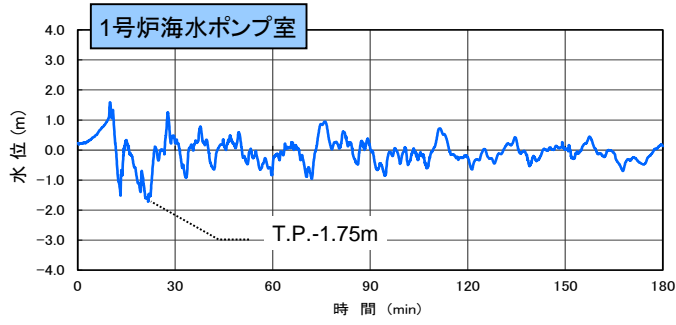
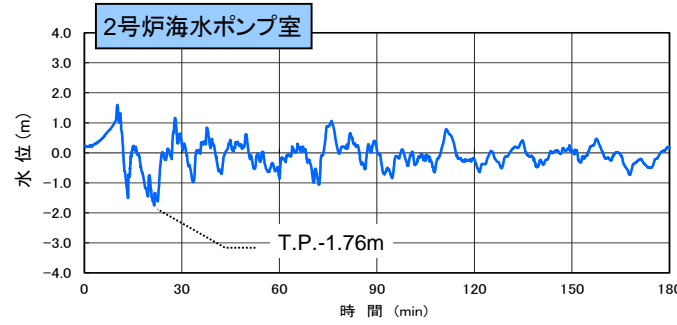
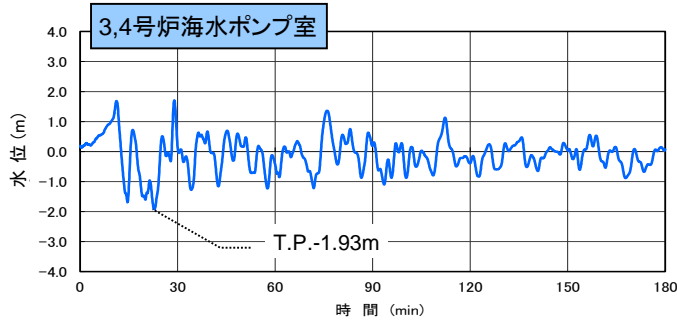
6. 基準津波の選定

時刻歴波形図(基準津波2:水位下降側)

評価地点



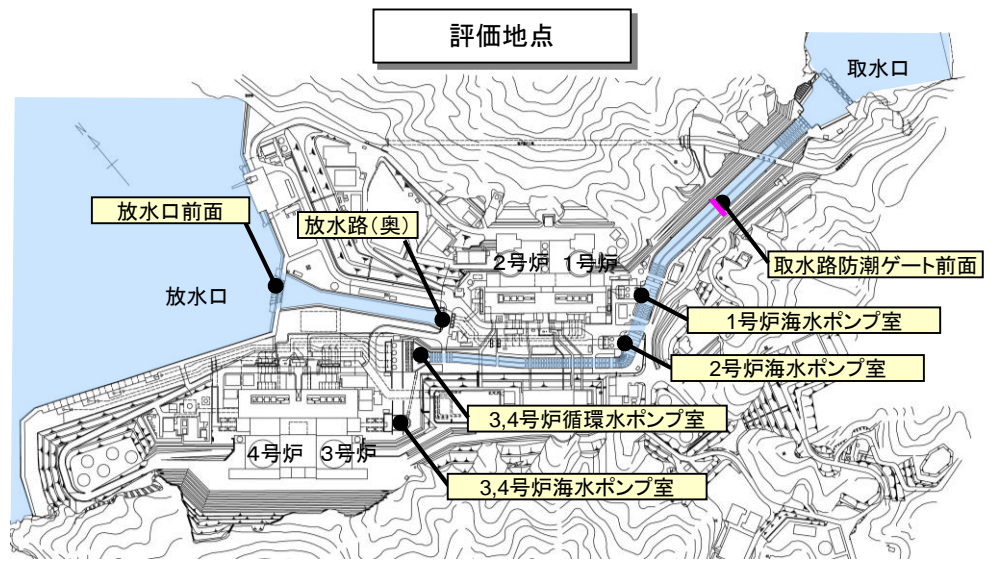
- ・潮位条件: 水位下降側T.P.-0.01m
- ・取水条件: 水位下降側: 1~4号非常用取水



6. 基準津波の選定

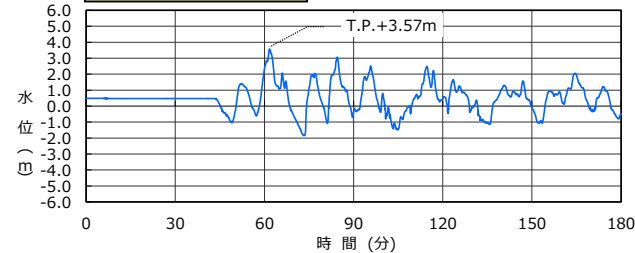
時刻歴波形図(基準津波3:水位上昇側)

※基準津波3及び基準津波4は、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持たせた波源を選定し策定することから、それらの値によって津波の計算結果は異なるが、一例として、崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値とした場合の時刻歴波形を示す。

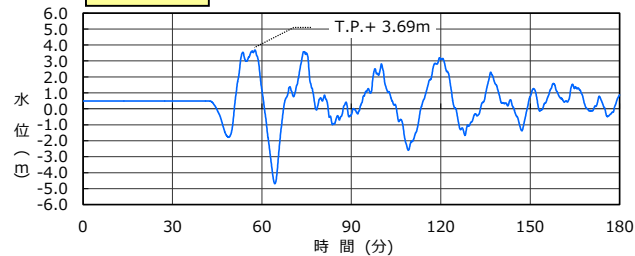


・潮位条件: 水位上昇側T.P.+0.49m
 ・取水条件: 水位上昇側:取水なし

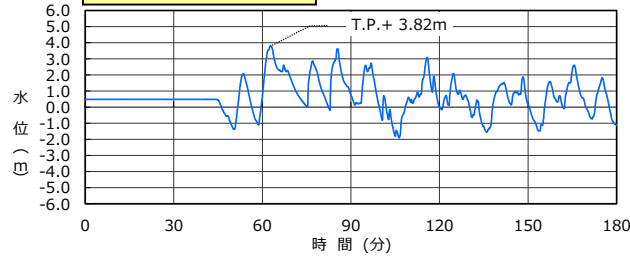
取水路防潮ゲート前面



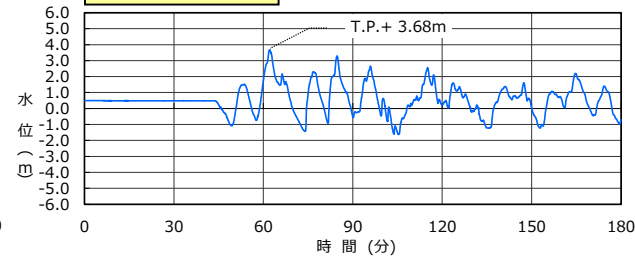
放水口前面



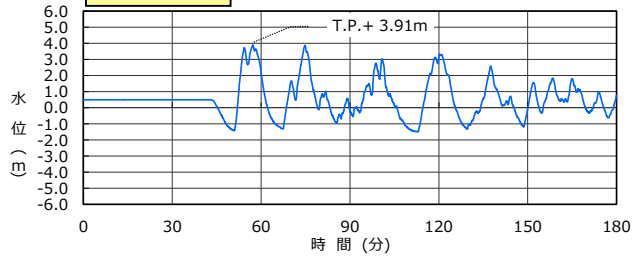
3,4号炉循環水ポンプ室



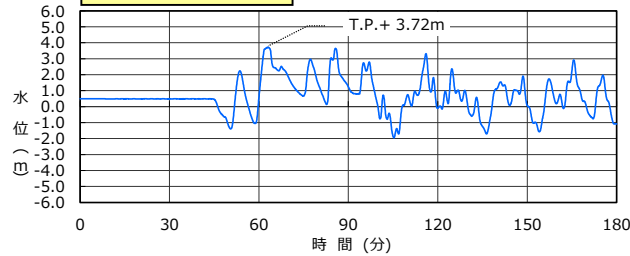
1号炉海水ポンプ室



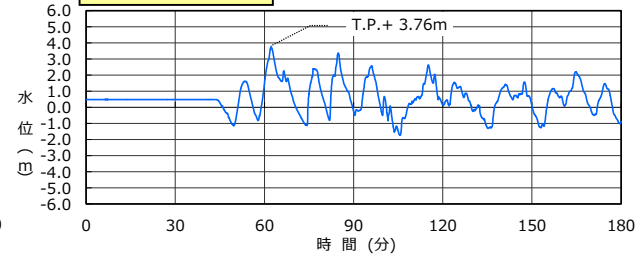
放水路(奥)



3,4号炉海水ポンプ室



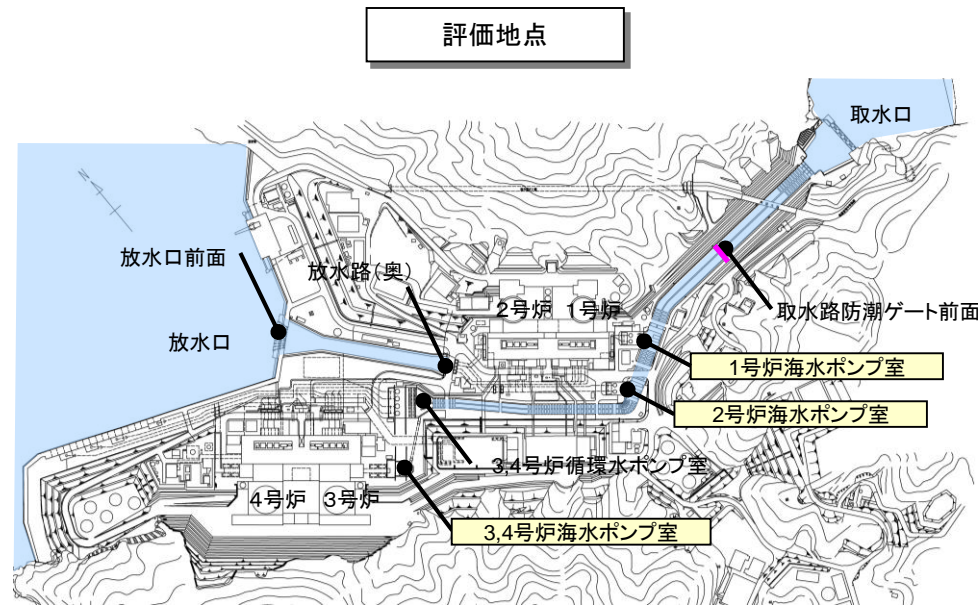
2号炉海水ポンプ室



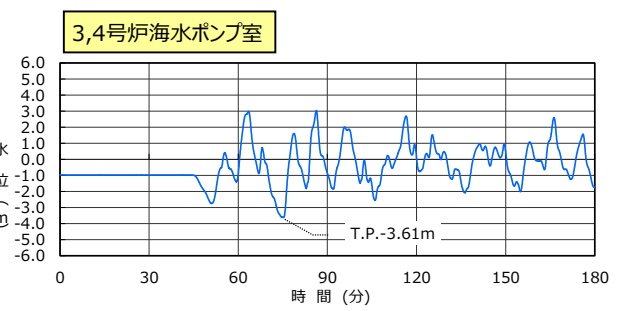
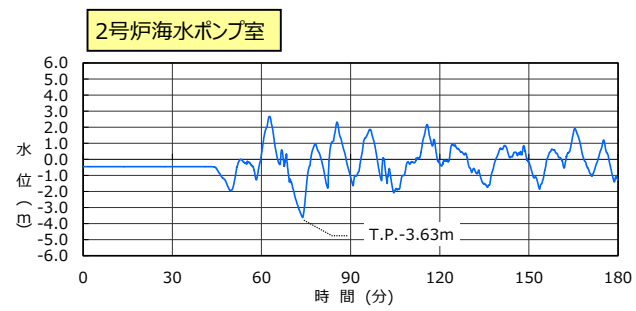
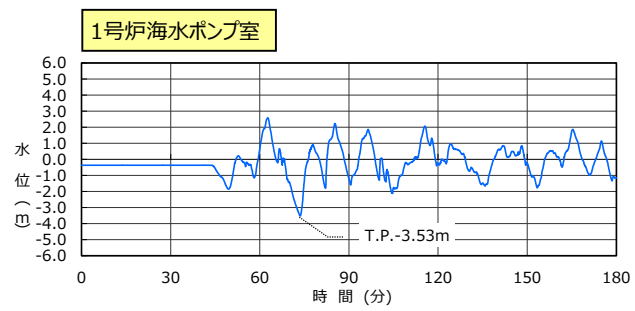
6. 基準津波の選定

時刻歴波形図(基準津波3:水位下降側)

※基準津波3及び基準津波4は、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持たせた波源を選定し策定することから、それらの値によって津波の計算結果は異なるが、一例として、崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値とした場合の時刻歴波形を示す。



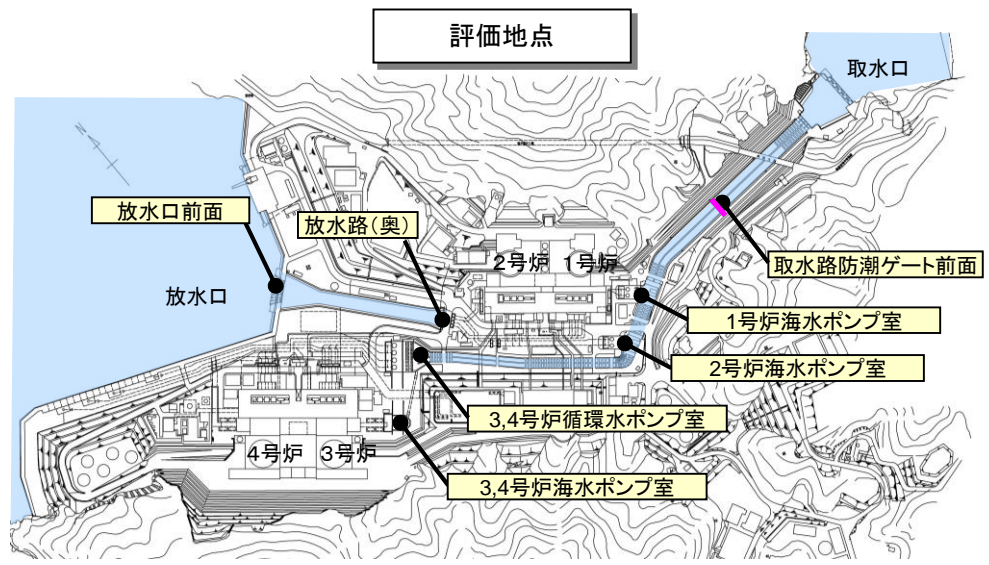
- ・潮位条件: 水位下降側T.P.-0.01m
- ・取水条件: 水位下降側: 1~4号非常用取水



6. 基準津波の選定

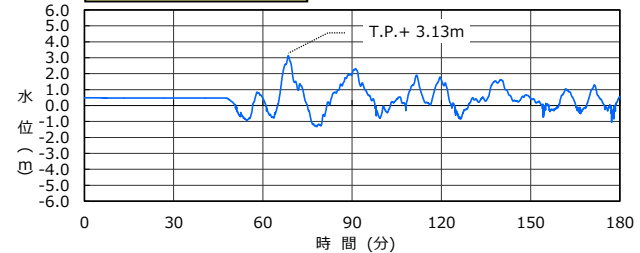
時刻歴波形図(基準津波4:水位上昇側)

※基準津波3及び基準津波4は、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持たせた波源を選定し策定することから、それらの値によって津波の計算結果は異なるが、一例として、崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値とした場合の時刻歴波形を示す。

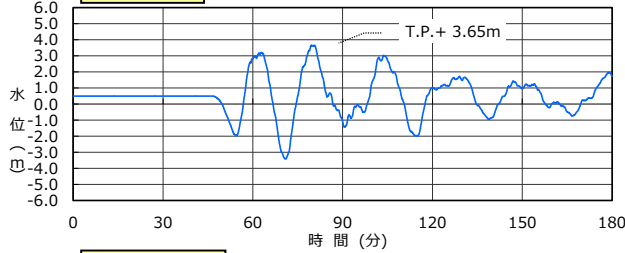


・潮位条件: 水位上昇側T.P.+0.49m
 ・取水条件: 水位上昇側:取水なし

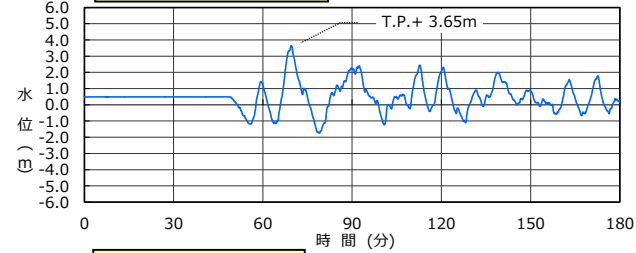
取水路防潮ゲート前面



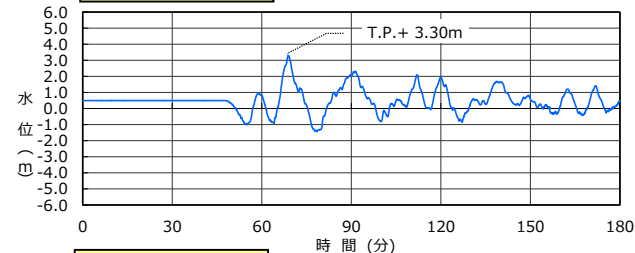
放水口前面



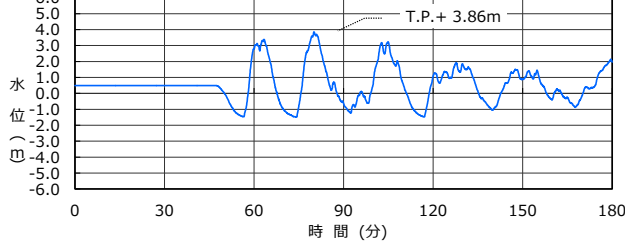
3,4号炉循環水ポンプ室



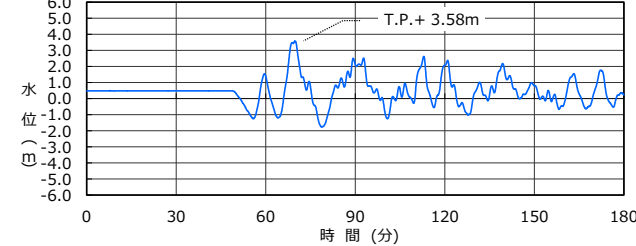
1号炉海水ポンプ室



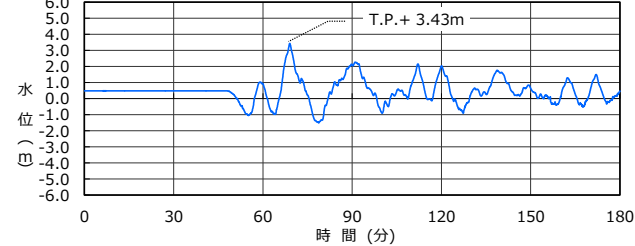
放水路(奥)



3,4号炉海水ポンプ室



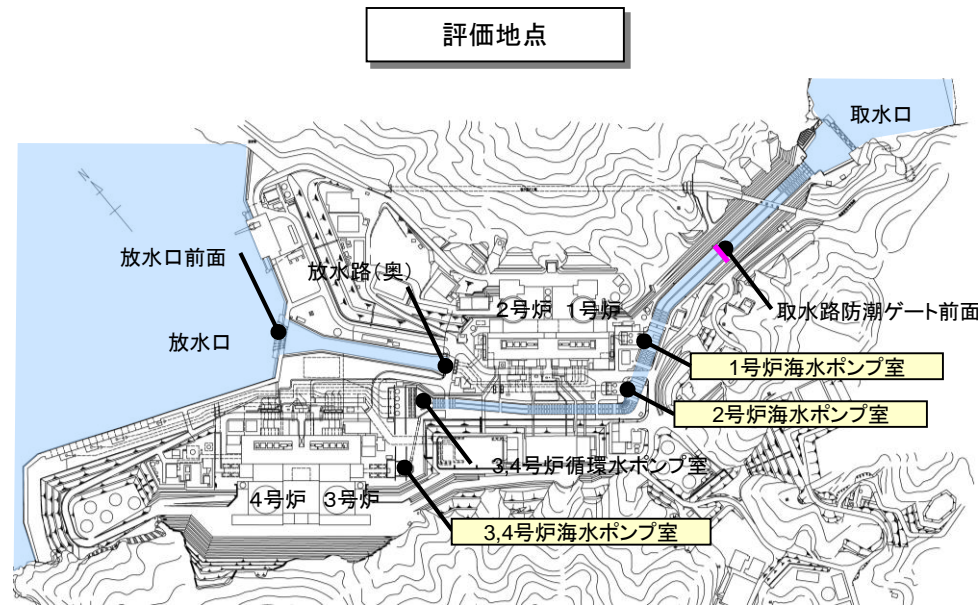
2号炉海水ポンプ室



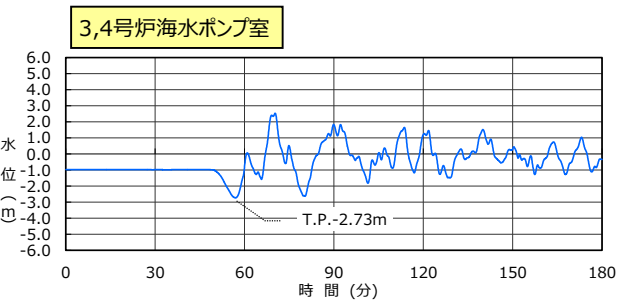
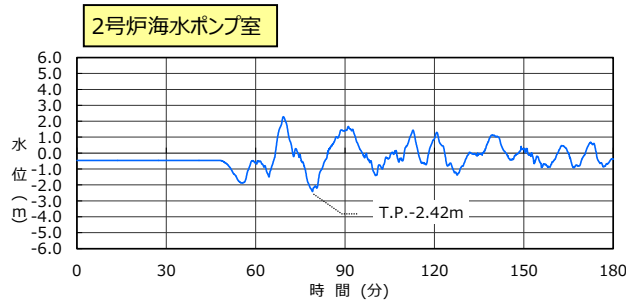
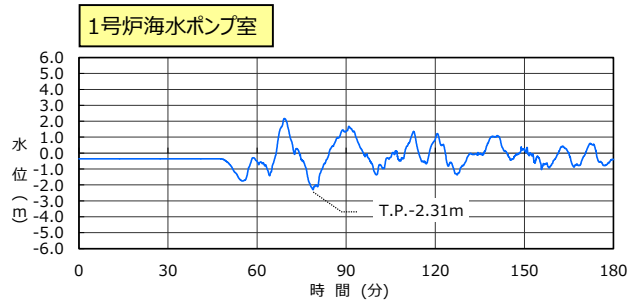
6. 基準津波の選定

時刻歴波形図(基準津波4:水位下降側)

※基準津波3及び基準津波4は、崩壊規模及び破壊伝播速度の値に幅を持たせた波源を選定し策定することから、それらの値によって津波の計算結果は異なるが、一例として、崩壊規模及び破壊伝播速度を最大値とした場合の時刻歴波形を示す。



- ・潮位条件: 水位下降側T.P.-0.01m
- ・取水条件: 水位下降側: 1~4号非常用取水



7. 基準津波の超過確率

7-1. 検討方針

検討方針と不確実さの取り扱いについて

【検討方針】

設計津波水位の超過確率については、「日本原子力学会標準 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2011」（2012年2月一般社団法人日本原子力学会）（以下、「津波PRA学会標準」）を参考に算定する。

【確率論的津波ハザード評価における不確実さの取り扱い】

確率論的津波ハザード評価（以降、津波ハザード評価という）における不確実さについては、「津波PRA学会標準」、及び「確率論的津波ハザード解析の方法（土木学会，2011）」を参考に以下のとおり扱う。

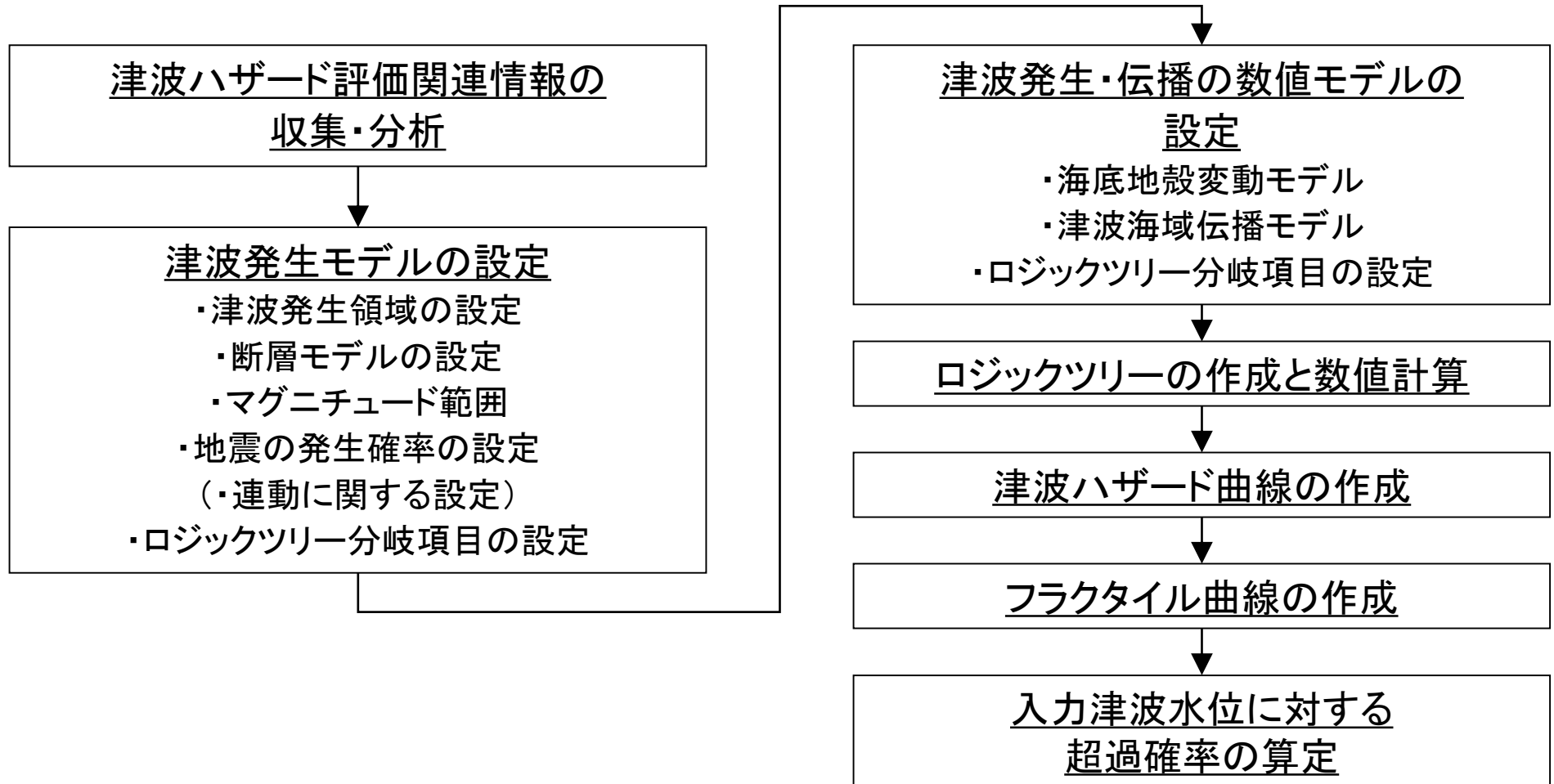
不確実さ		津波評価における扱い
偶然的 不確実さ	現実に存在しているが、現状では予測不可能と考えられるばらつき	津波水位の確率分布として表現する
認識論的 不確実さ	研究が進展すれば確定できるが現状では予測不可能なもの	ロジックツリーの分岐として選定する

7-2. 評価の流れ

7-2. 評価の流れ

津波ハザード評価手順

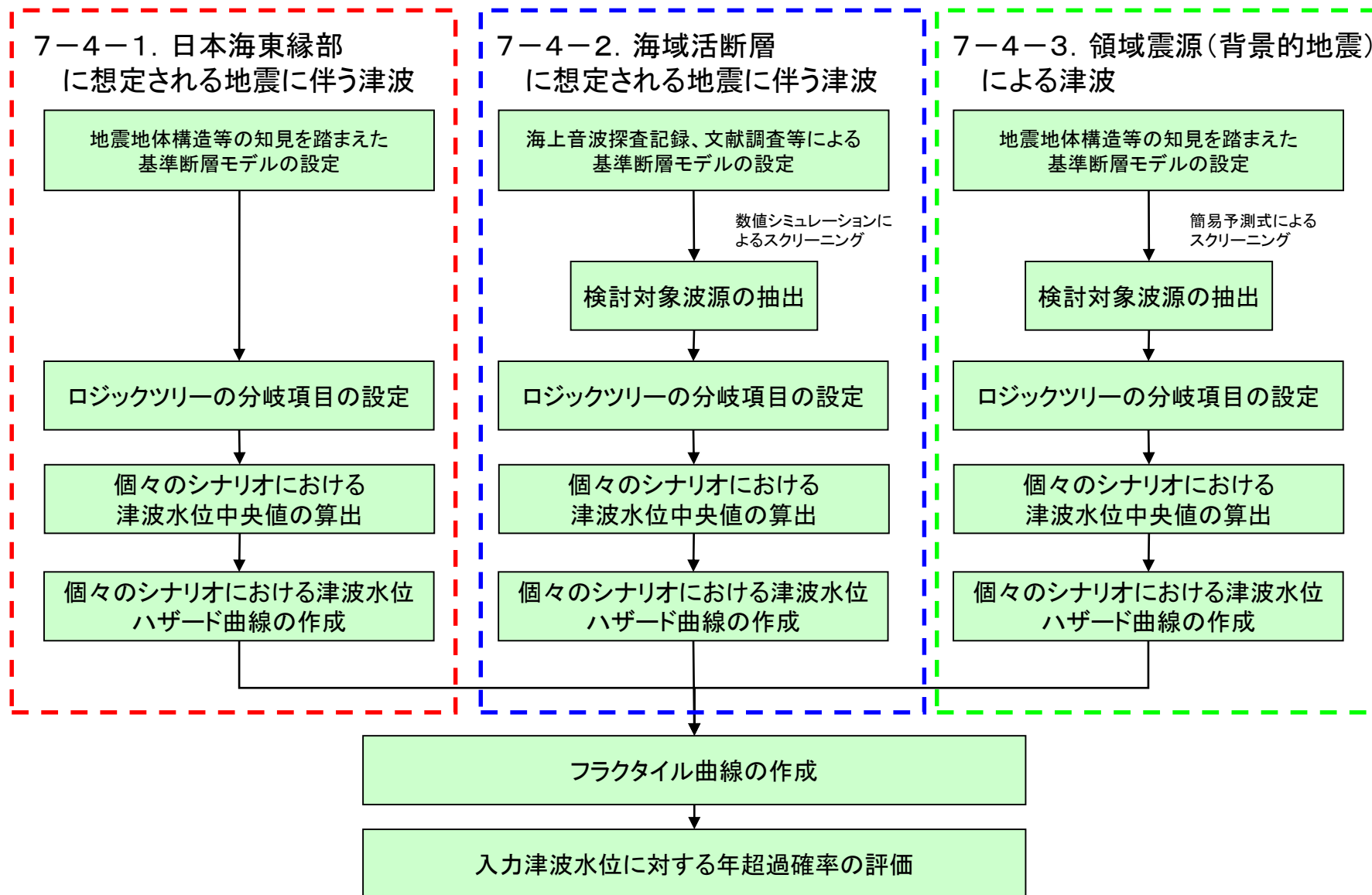
「津波PRA学会標準」を参考に以下の手順で評価を実施する。



7-3. 検討対象波源

7-3. 検討対象波源

津波ハザード評価における検討対象波源



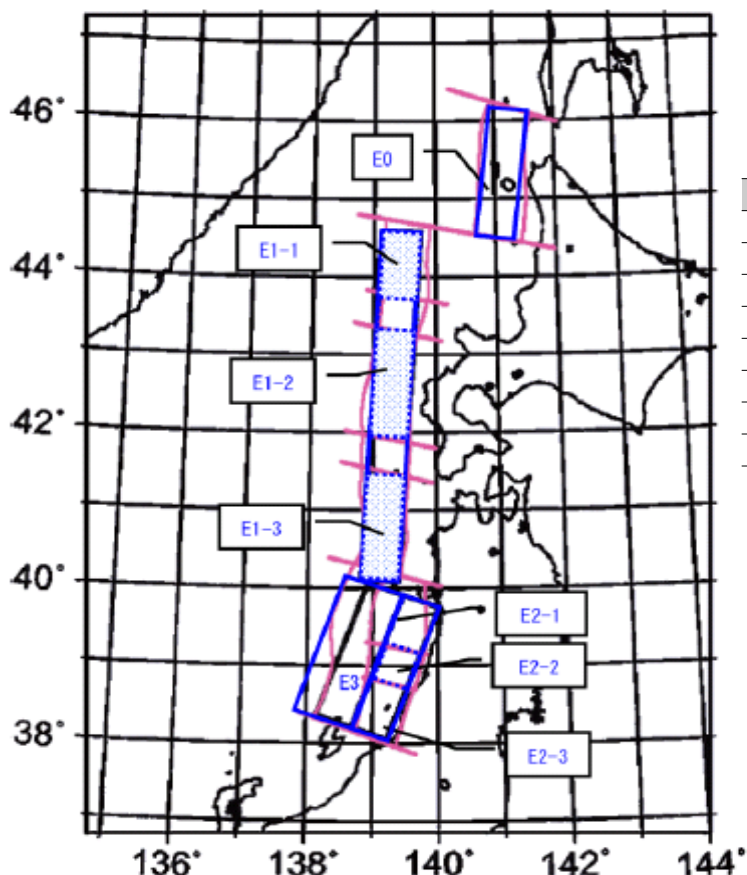
※: 海底地すべり及び陸上地すべりによる津波については、発生頻度を設定することが難しいため、評価に含めていない。

7-4. ロジックツリーの設定

7-4-1. 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波

日本海東縁部 対象とする活動域

【日本海東縁部海域の大地震活動域区分】
(津波PRA学会標準)



海域	
北海道北西沖	E0
北海道西方沖	E1-1
北海道南西沖	E1-2
青森県西方沖	E1-3
秋田県沖	E2-1
山形県沖	E2-2
新潟県北部沖	E2-3
佐渡島北方沖	E3

【日本海東縁部及び大地震活動域の既往最大Mw】
(津波PRA学会標準)

海域	発生年	津波モデルのMw	既往最大Mw (=Mmax)	「地震本部」による地震規模(信頼度)
北海道北西沖 (E0)	なし	—	—	M7.8程度 (D)
北海道西方沖 (E1-1)	1940	7.7	7.7	M7.5前後 (B)
北海道南西沖 (E1-2)	1993	7.8	7.8	M7.8前後 (B)
青森県西方沖 (E1-3)	1983	7.7	7.7	M7.7前後 (B)
秋田県沖 (E2-1)	なし	—	—	M7.5程度 (C)
山形県沖 (E2-2)	1833	7.8	7.8	M7.7前後 (B)
新潟県北部沖 (E2-3)	1964	7.5	7.5	M7.5前後 (B)
佐渡島北方沖 (E3)	なし	—	—	M7.8程度 (D)

○日本海東縁部については、地震の発生履歴や地質学的知見、地震調査研究推進本部(2003)「日本海東縁部の地震活動の長期評価」等の知見をもとに活動域区分を設定する。

○各活動域の既往最大マグニチュードから、各活動域ごとの既往最大Mwを考慮し、マグニチュード範囲の分岐を設ける。

日本海東縁部 地震発生間隔

【推本の平均発生間隔と津波ハザード解析における発生間隔】

海域	平均発生間隔(地震本部)	根拠	分布の考え方
北海道北西沖 (E0)	3900年程度	約2100年前と約6000年前に 2個のイベント	発生間隔データ1個
北海道西方沖 (E1-1)	1400～3900年程度	(連続性)	一様分布(1400～3900)
北海道南西沖 (E1-2)	500～1400年程度	6個のイベントの平均が 約1400年	一様分布(500～1400)
青森県西方沖 (E1-3)	500～1400年程度	3個のイベントの平均が 約500年	一様分布(500～1400)
秋田県沖 (E2-1)	1000年程度以上	(2列への配分)	一様分布(1000～1500)
山形県沖 (E2-2)	1000年程度以上	(2列への配分)	一様分布(1000～1500)
新潟県北部沖 (E2-3)	1000年程度以上	(2列への配分)	一様分布(1000～1500)
佐渡島北方沖 (E3)	500～1000年程度	中嶋(2003)	一様分布(500～1000)

出典: 確率論的津波ハザード解析の方法(土木学会, 2011)

上記データから、E1～E3の各領域において、地震発生間隔の分岐を設定

7-4-1. 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波 秋田県モデル(日本海東縁部の断層)の活動域と地震発生間隔

表-2.2.5 海域 A+B+C の津波断層モデル(断層長さ 350km, M=8.7)

目視的震源パラメータ	設定方法		
断層モデル原点	地中の上端における南端	38° 17' 36.8" N	
走向 θ		138° 5' 14.9" E	
傾斜角 δ	東傾斜	14°	
すべり角 λ	逆断層	20°	
断層モデル上端深さ		90°	
断層モデル長さ L_{model}	海域A、海域B、海域Cの運動	0 km	
断層モデル幅 W_{model}	W/L=0.38を摘要し、5kmメッシュでモデル化	350 km	
断層モデル面積 S_{model}		135 km ²	
マグニチュード M		47,250 km ²	R=122.6km
剛性率 μ		4.73E+14 cm ²	
平均すべり量 D_{model}		8.7	
地震モーメント M_0		3.50E+11 dyne-cm ²	
モーメントマグニチュード M_w		3.50E+10 N/m ²	
		811 cm	
		8.1 m	
		1.34E+29 dyne-cm	
		1.34E+22 Nm	
		8.69	

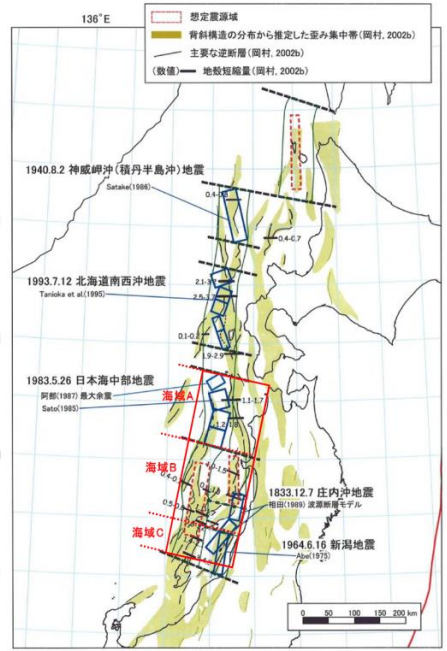
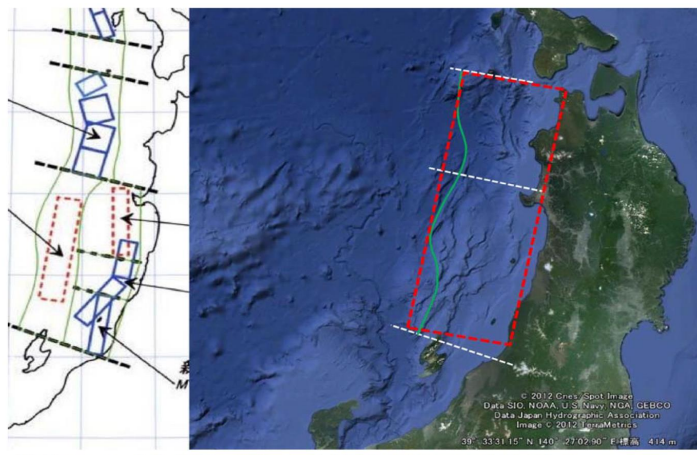


図-2.1.1 秋田県で想定した津波断層の概略の波源域
(「過去の地震の震源モデル・想定震源域、および活断層の分布」(地震調査研究推進本部、日本海東縁部の地震活動の長期評価について、平成15年6月20日、p.42)に加筆)



【海域 A+B+C、大すべり域(面積比 20%)を断層中央から 15km 北側に配置】

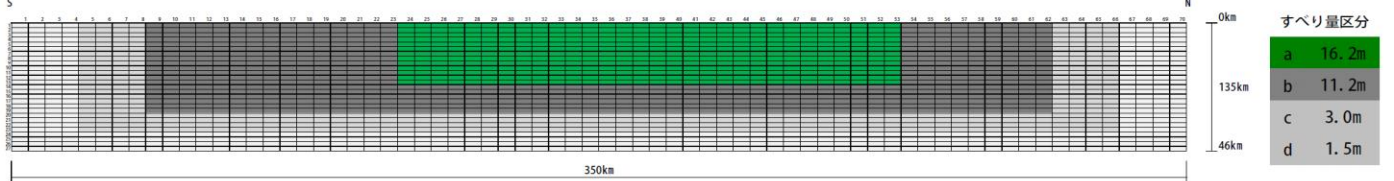


表-2.1.1 津波断層モデル一覧表

区分	ID	震源、想定地震	関連震源	想定した地震規模		傾斜角	すべり角	断層モデル上端深さ	断層モデル長さ	断層モデル幅	断層モデル面積	断層モデル下端深さ	地震モーメント	モーメントマグニチュード	平均すべり量	備考	
				断層長さL(km)	マグニチュードM _j												δ (°)
単独地震	1	海域A	日本海中部	130	7.9	東傾斜	35	90	0	130	50	6,500	29	6.85E+20	7.82	3.0	
	2	海域B	佐渡島北方沖、秋田県沖、山形県沖	140	7.9	東傾斜	35	90	0	140	54	7,560	31	8.59E+20	7.89	3.2	小断層を2km×2kmでモデル化
	3	海域C	新潟県北部沖、山形県沖	80	7.5	西傾斜	55	90	0	80	32	2,560	26	1.69E+20	7.42	1.9	
連動地震	4	海域A+海域B	新潟県北部沖、山形県沖	270	8.5	東傾斜	20	90	0	270	105	28,350	36	6.24E+21	8.46	6.3	
	5	海域B+海域C	佐渡島北方沖、秋田県沖、山形県沖	220	8.3	東傾斜	20	90	0	220	85	18,700	29	3.34E+21	8.28	5.1	小断層を5km×5kmでモデル化
	6	海域A+海域B+海域C	新潟県北部沖、山形県沖	350	8.7	東傾斜	20	90	0	350	135	47,250	46	1.34E+22	8.69	8.1	

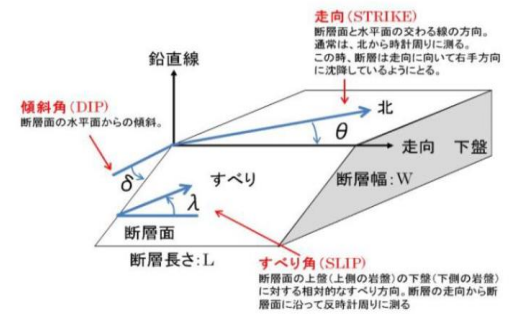


図-3.1.2 断層パラメータの定義

注) 海域Cの単独地震については、津波シミュレーションの概略計算で秋田県への影響が比較的小さいと想定されたため、最終的な詳細計算は省略した。

「地震被害想定調査」に係る津波関連データについて(2013年1月31日更新)津波浸水シミュレーション参考資料(秋田県HPより抜粋)

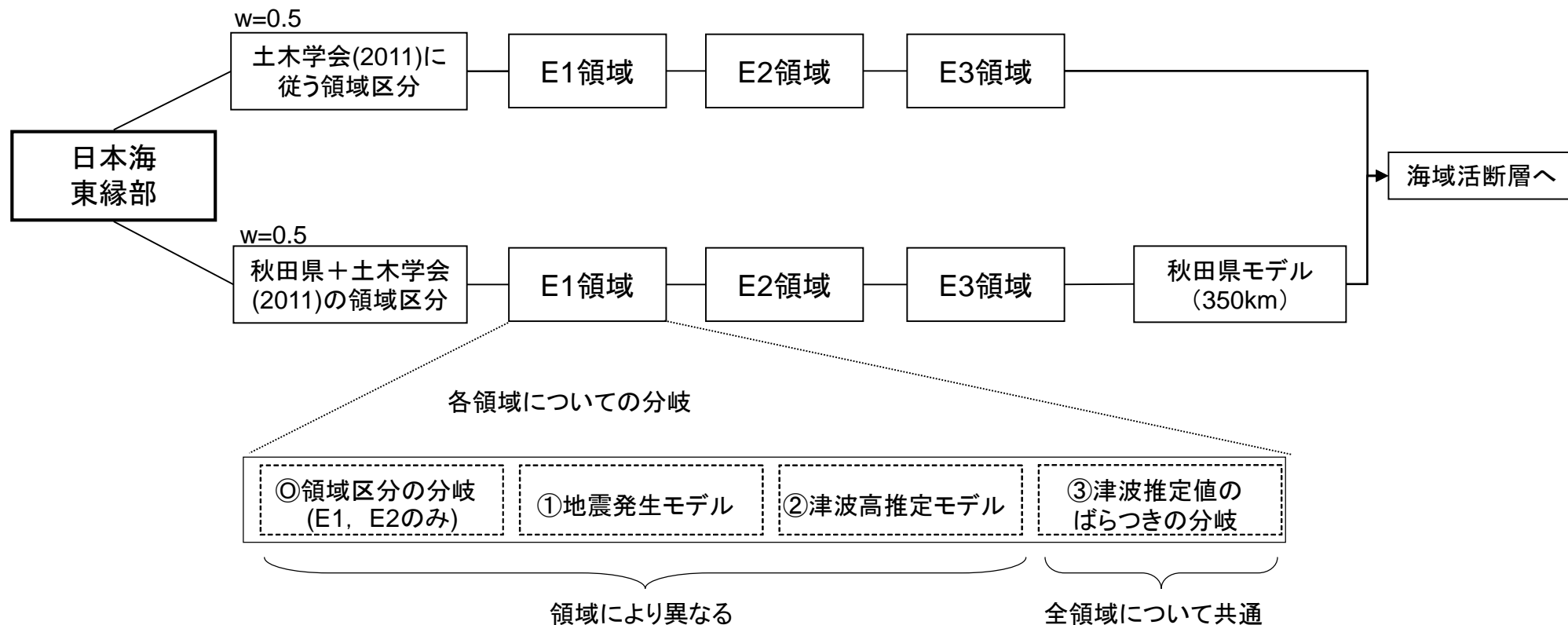
同波源の発生頻度は以下の考えに基づき設定した。
 ・秋田県の350km波源は、位置としては土木学会(2011)の E1-3領域及びE3領域の全体破壊に相当する。
 ・土木学会(2011)の再来期間に基づき、E3の同時破壊が3回に1回発生、その中でさらに2回に1回、E1-3領域との同時破壊が発生するという想定で再来期間を設定する。
 この場合、再来期間は6,000~12,000年となる。

日本海東縁部 ロジックツリーの構成

E1からE3までの領域についてそれぞれ評価を行い、各領域では、

- 領域区分の分岐(E1, E2の場合)
 - 地震発生モデル
 - 津波高推定モデル
 - 津波推定値のばらつきの分岐
- のそれぞれについて分岐を設ける。

【ロジック分岐の構成】

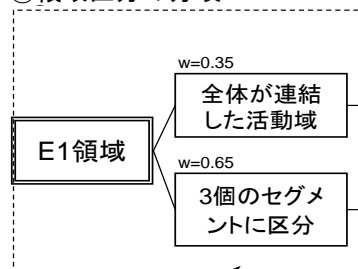


日本海東縁部 ロジックツリーの設定

【E1領域の

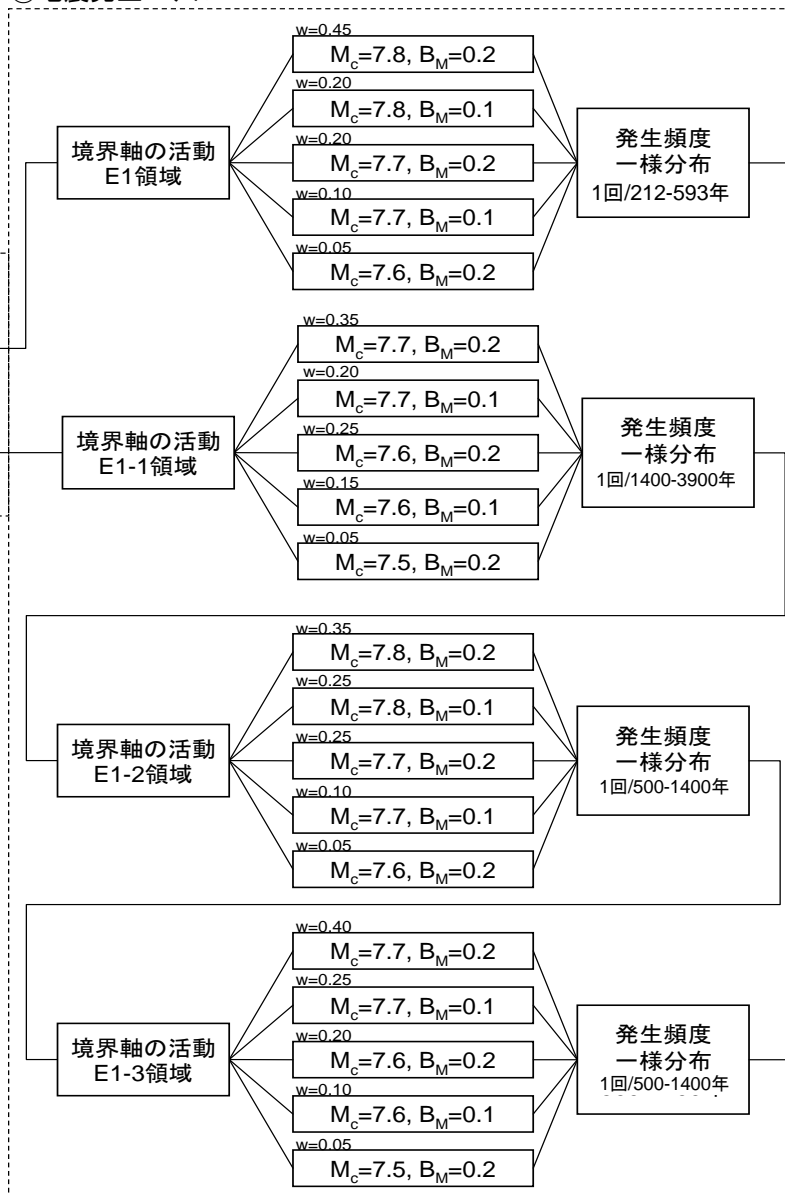
◎領域区分の分岐、①地震発生モデル】

◎領域区分の分岐



E1およびE2については、各領域を細分化した領域間をまたぐ破壊を想定するかの分岐を設ける

①地震発生モデル



津波高推定
モデルへ

※ロジックツリーは確率論的津波ハザード解析の方法
(土木学会, 2011)により設定

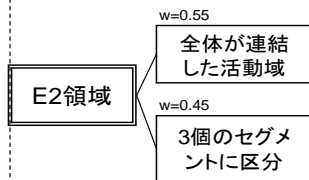
※w(重み)は土木学会及び地震専門家へのアンケートに
基づき決定

日本海東縁部 ロジックツリーの設定

【E2領域の

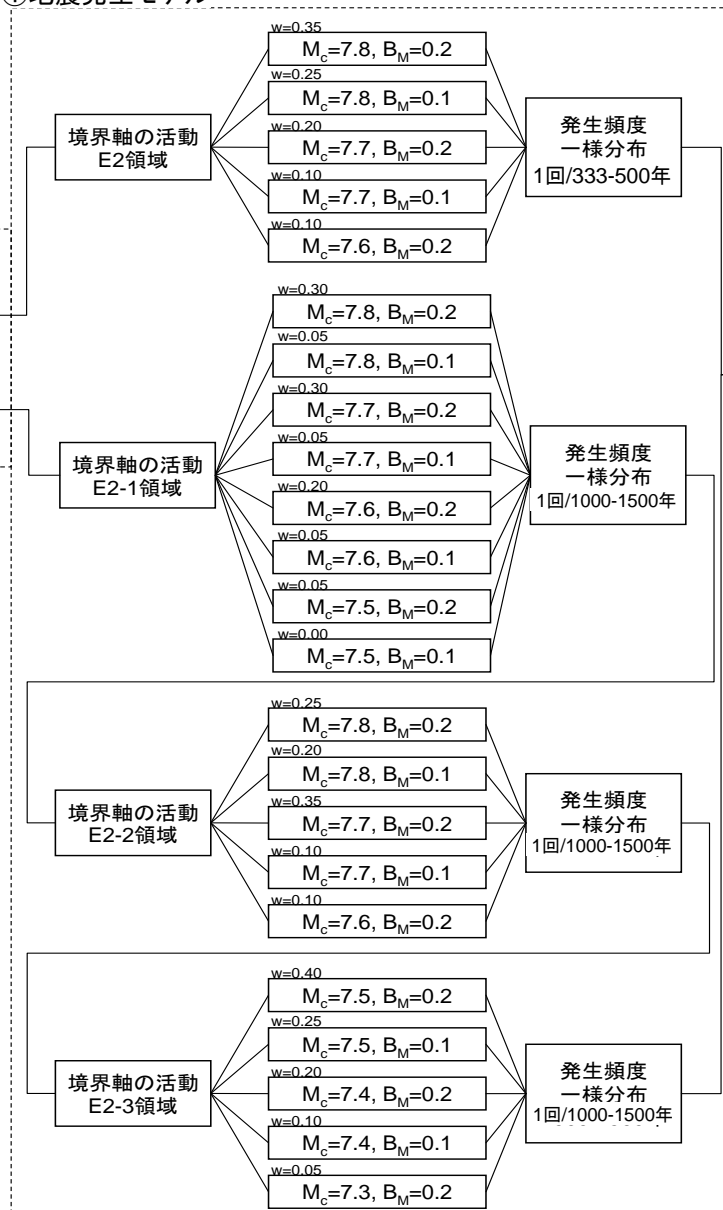
◎領域区分の分岐、①地震発生モデル】

◎領域区分の分岐



E1およびE2については、各領域を細分化した領域間をまたぐ破壊を想定するかの分岐を設ける

①地震発生モデル



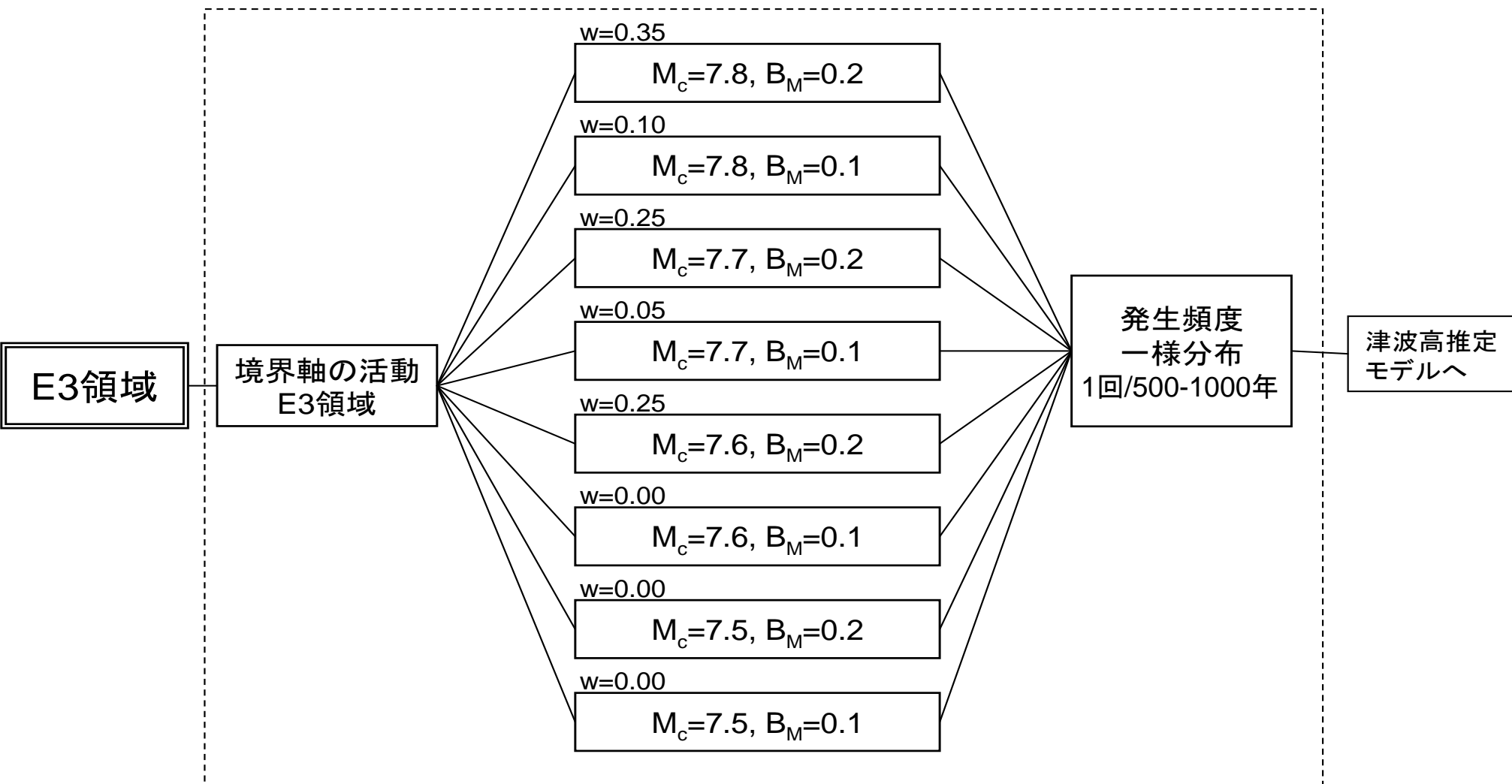
津波高推定モデルへ

※ロジックツリーは確率論的津波ハザード解析の方法 (土木学会, 2011)により設定

※w(重み)は土木学会及び地震専門家へのアンケートに基づき決定

日本海東縁部 ロジックツリーの設定

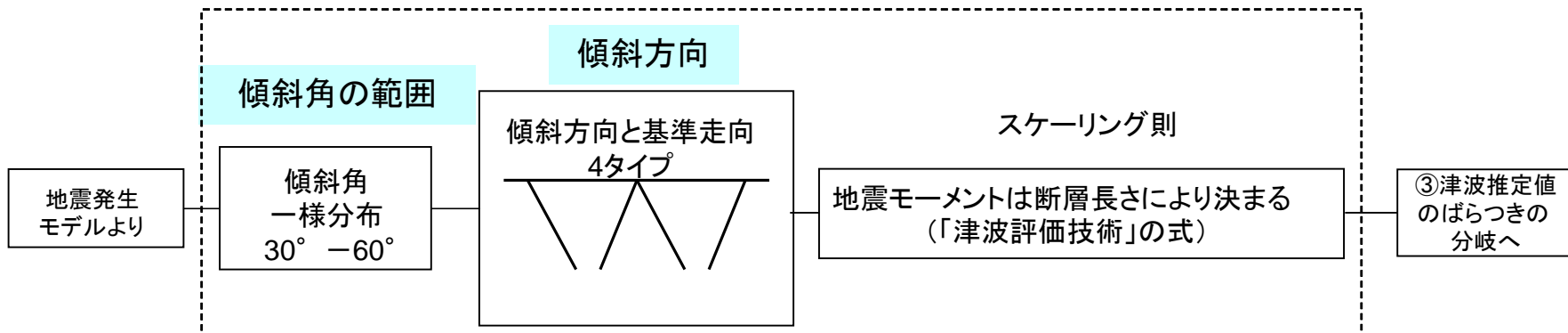
【E3領域の①地震発生モデル】



※ロジックツリーは確率論的津波ハザード解析の方法(土木学会, 2011)により設定

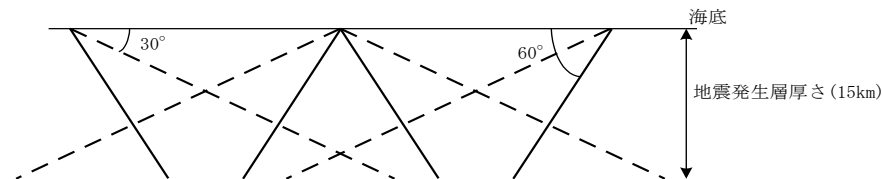
※w(重み)は土木学会及び地震専門家へのアンケートに基づき決定

【E1～E3領域の②津波高さの推定モデル】



断層長さ	スケーリング則に基づき、Mwから求める。
幅	地震発生層の厚さ(15km)を考慮し、傾斜角に応じて決める。
すべり量	$\log M_0(N \times m) = 1.5M_w + 9.1$, $D = M_0 / mLW$ により算出する。
上縁深さ	0kmとする。
走向	海底地形の走向に基づき設定する。
傾斜角	30~60° とする。西傾斜と東傾斜の双方を考慮する。
すべり角	90° とする。
剛性率	$3.5 \times 10^{10} (N/m^2)$ とする。
スケーリング測	幅(地震発生層厚さ)に上限あり。 スケーリングの変曲点を境に、Mwが大きいとき武村(1998)の関係 $\log L(km) = 0.75M_w - 3.77$, $L \propto D$, $W = \text{const.}$ がMwが小さいとき $W = 2L/3$, $L \propto W \propto D$ の関係が成り立ち、両者が連続的に接続するものとする。

日本海東縁部における鉛直断面内の断層パターン



日本海東縁部 ロジックツリーの設定

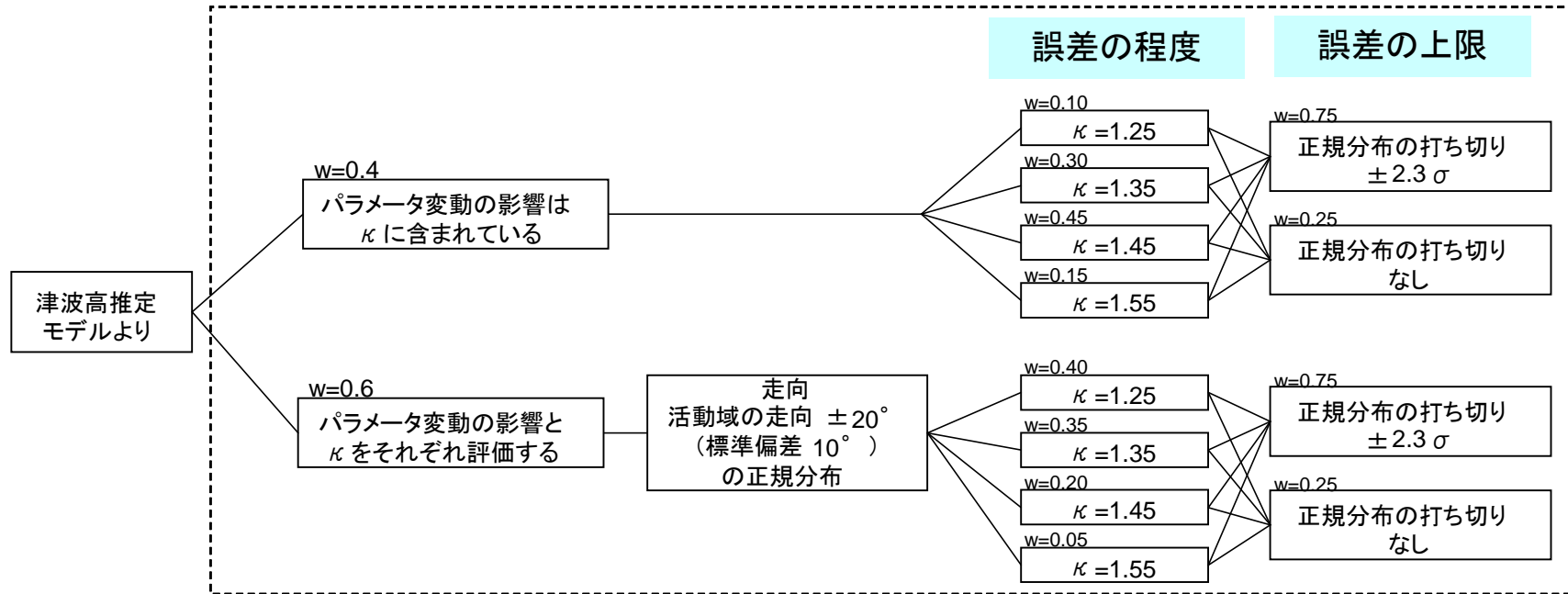
【秋田県モデルの①地震発生モデル、②津波高さの推定モデル】



※秋田県モデルの②津波高さの推定モデルについては、前出の秋田県の想定波源モデルを用いる

日本海東縁部 ロジックツリーの設定

【③津波推定値のばらつきの分岐】



※ロジックツリーは確率論的津波ハザード解析の方法(土木学会, 2011)により設定

※w(重み)は土木学会及び地震専門家へのアンケートに基づき決定

7-4-2. 海域活断層に想定される地震に伴う津波

海域活断層 対象とする活動域

- 発電所敷地前面海域及び敷地周辺海域における海域活断層について文献調査を実施する。
- 発電所敷地前面海域及び敷地周辺海域において、後期更新世以降の活動を考慮する断層のうち、敷地に影響が大きいと考えられるものを検討対象断層とする。

【敷地前面及び敷地周辺における検討対象断層】

① 安島岬沖～和布一 干飯崎沖～甲楽城断層	⑥ C断層
② ウツロギ峠北方一 池河内断層	⑦ 大陸棚外縁～B～ 野坂断層
③ 甲楽城沖～浦底一池河内 ～柳ヶ瀬山断層	⑧ 三方断層
④ 浦底一内池見断層	⑨ FO-A～FO-B～ 熊川断層
⑤ 白木一丹生断層	⑩ F _{GA} 3東部断層

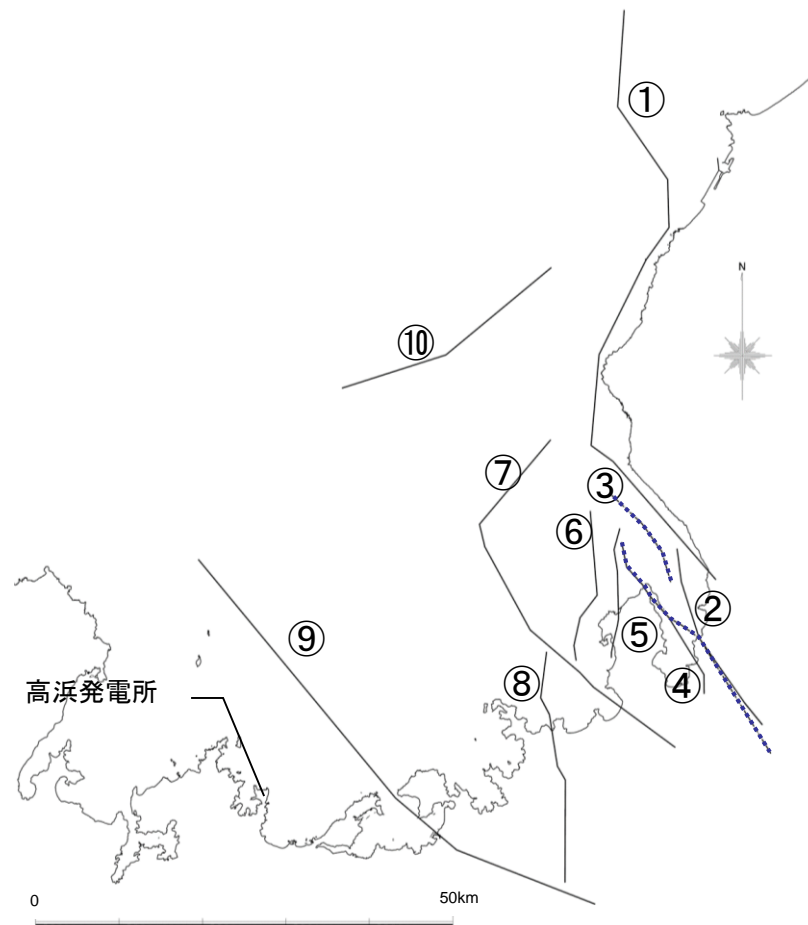
- ・検討対象断層で、多くの場合に津波高さが最も大きくなる条件(上縁深さ:0km、傾斜角:高角側)で数値シミュレーションを実施し、確率的津波ハザード解析の方法(土木学会, 2011)に示される以下の式により、スクリーニング※を実施

$$|X| > |H| \cdot \kappa^{2.3}$$

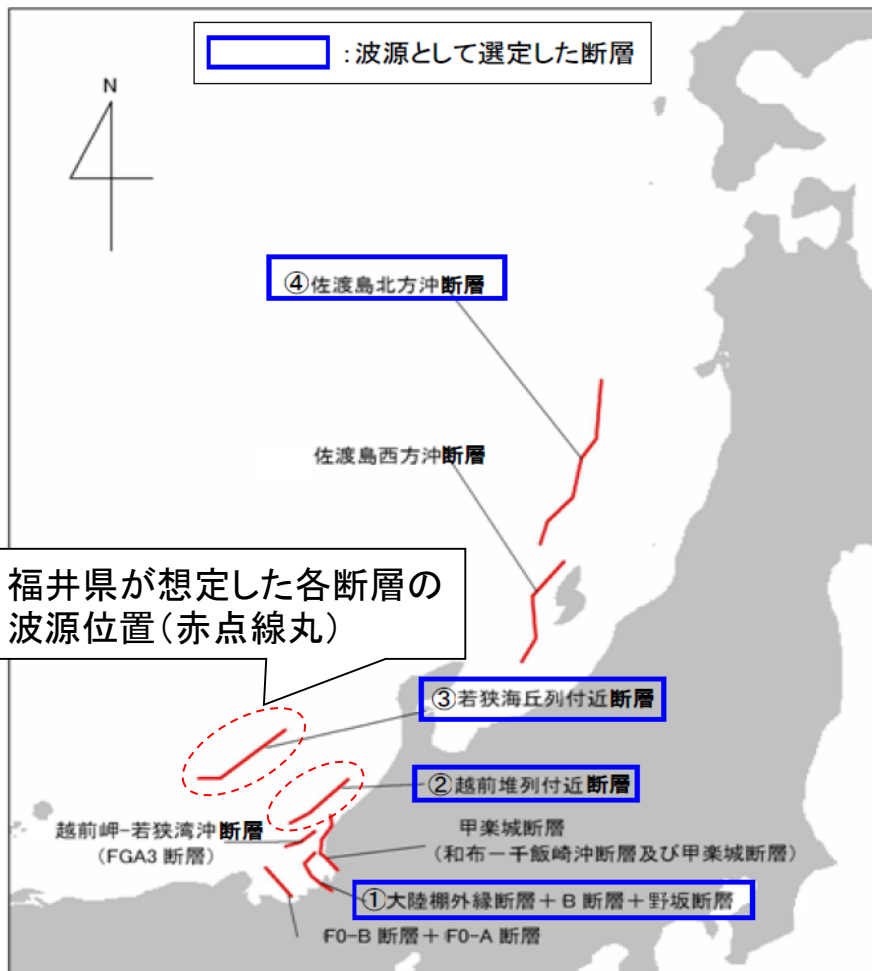
X: 評価対象となる水位
H: 数値シミュレーションにより計算された津波高さ
κ: 津波高さのばらつき(=1.55)

※スクリーニングは高浜、大飯、美浜3サイト共通で実施しており、全てのサイトで閾値を下回った波源のみを除外対象としている。

- ・結果として、②、④の2つ断層についてはサイトへの影響が小さく除外可能と判断された。



福井県が想定したモデル(若狭海丘列付近断層、越前堆列付近断層)の諸元



【福井県が想定した若狭海丘列付近断層の断層モデル】

断層長さ (km)	断層幅 (km)	地震規模 Mw	上端深さ (km)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
90	17.32	7.63	0.1	60	90	6.43

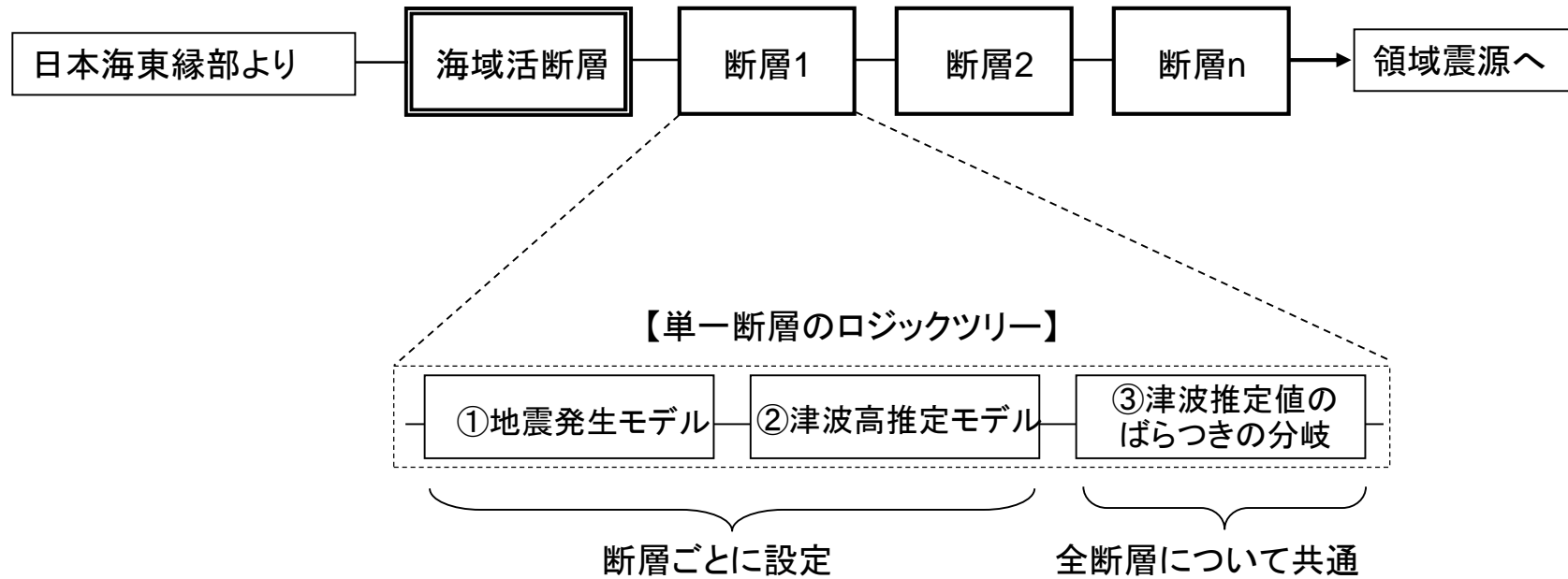
【福井県が想定した越前堆列付近断層の断層モデル】

断層長さ (km)	断層幅 (km)	地震規模 Mw	上端深さ (km)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
65	17.32	7.44	0.1	60	90	4.62

福井県(2012):「福井県における津波シミュレーション結果について」,
平成24年9月3日, 福井県 危機対策・防災課.

海域活断層 ロジックツリーの構成

【ロジック分岐の構成】

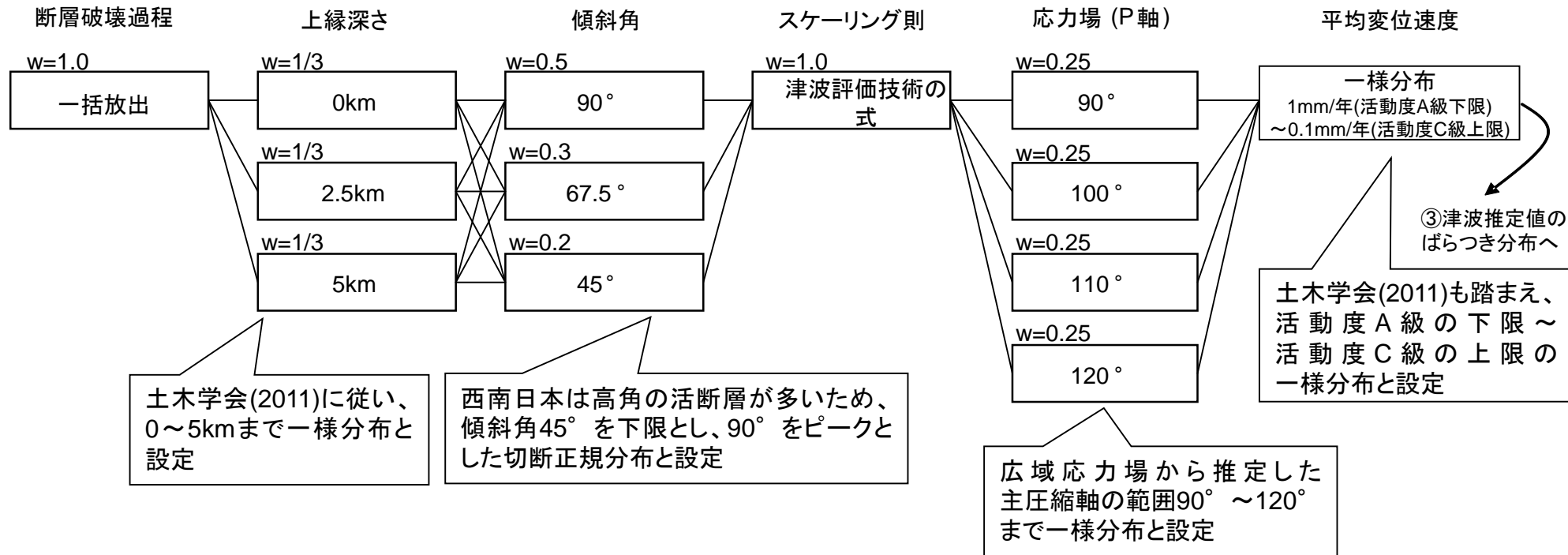


海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

- 海域活断層のロジックツリーについては、確率論的津波ハザード解析の方法(土木学会(2011))を参考に、下図を基本形として設定する。ただし、断層破壊過程及び傾斜角については、断層ごとに以下を考慮して設定する。
- 断層破壊過程については、複数の活断層の連動が考えられる場合には、個々に連動ケースの分岐を設定する。重みは一様分布を原則とする。
- 傾斜角については、調査結果等から既知の場合は、その角度を下限値とし、鉛直変位量の最も大きくなる傾斜角 90° を上限とした分岐を設ける。重みは、 90° または既知の場合はその角度を中心とした切断正規分布として設定する。
- スケールング則については、検討対象断層に比較的高角なものが多いことから、津波評価技術の式を採用する。

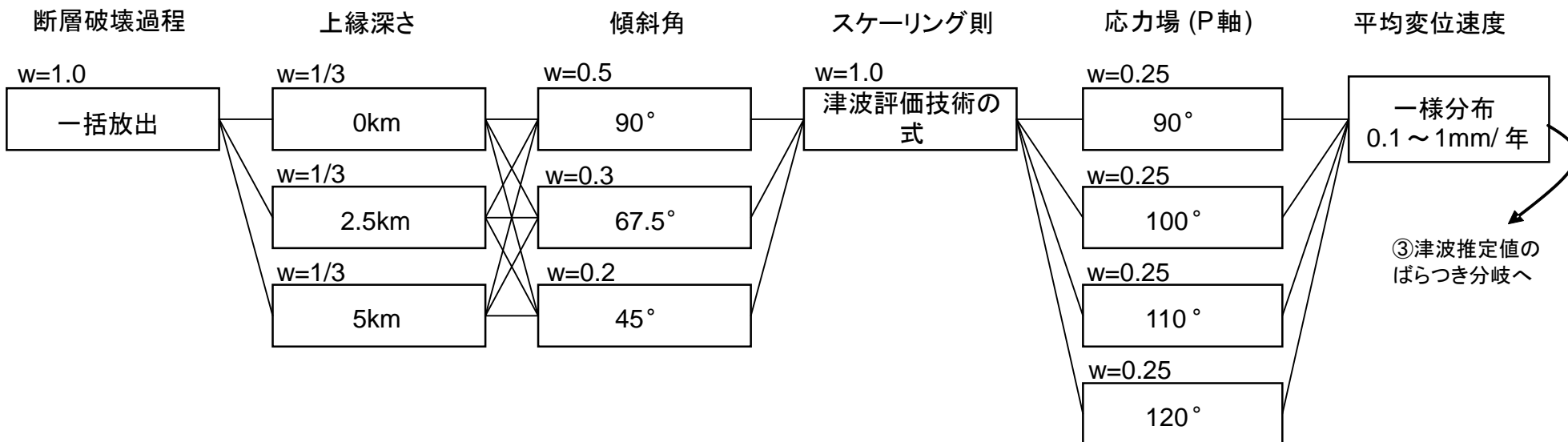
◆ 基本形



海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

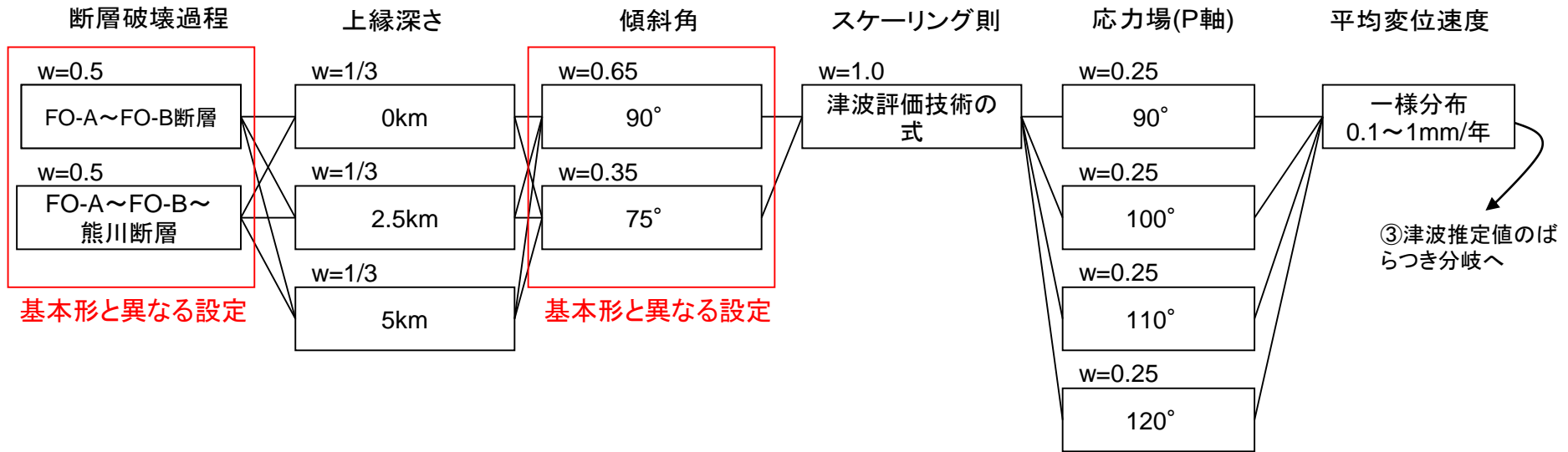
◆ F_{GA} 3東部断層



海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

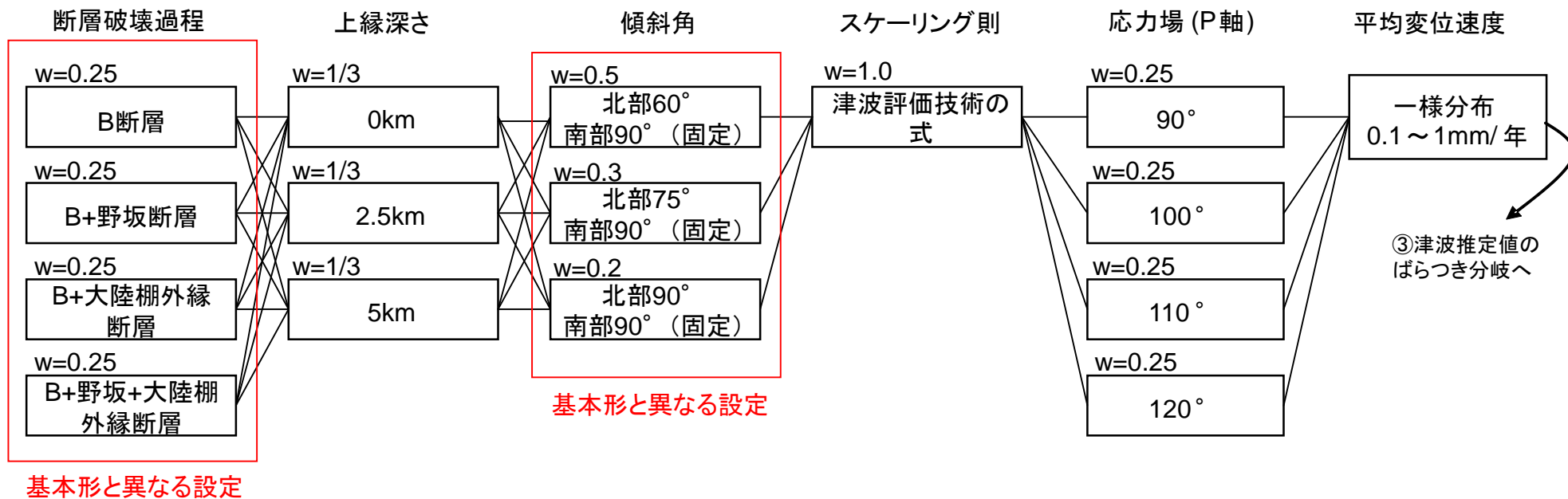
◆ FO-A~FO-B断層~熊川断層



海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

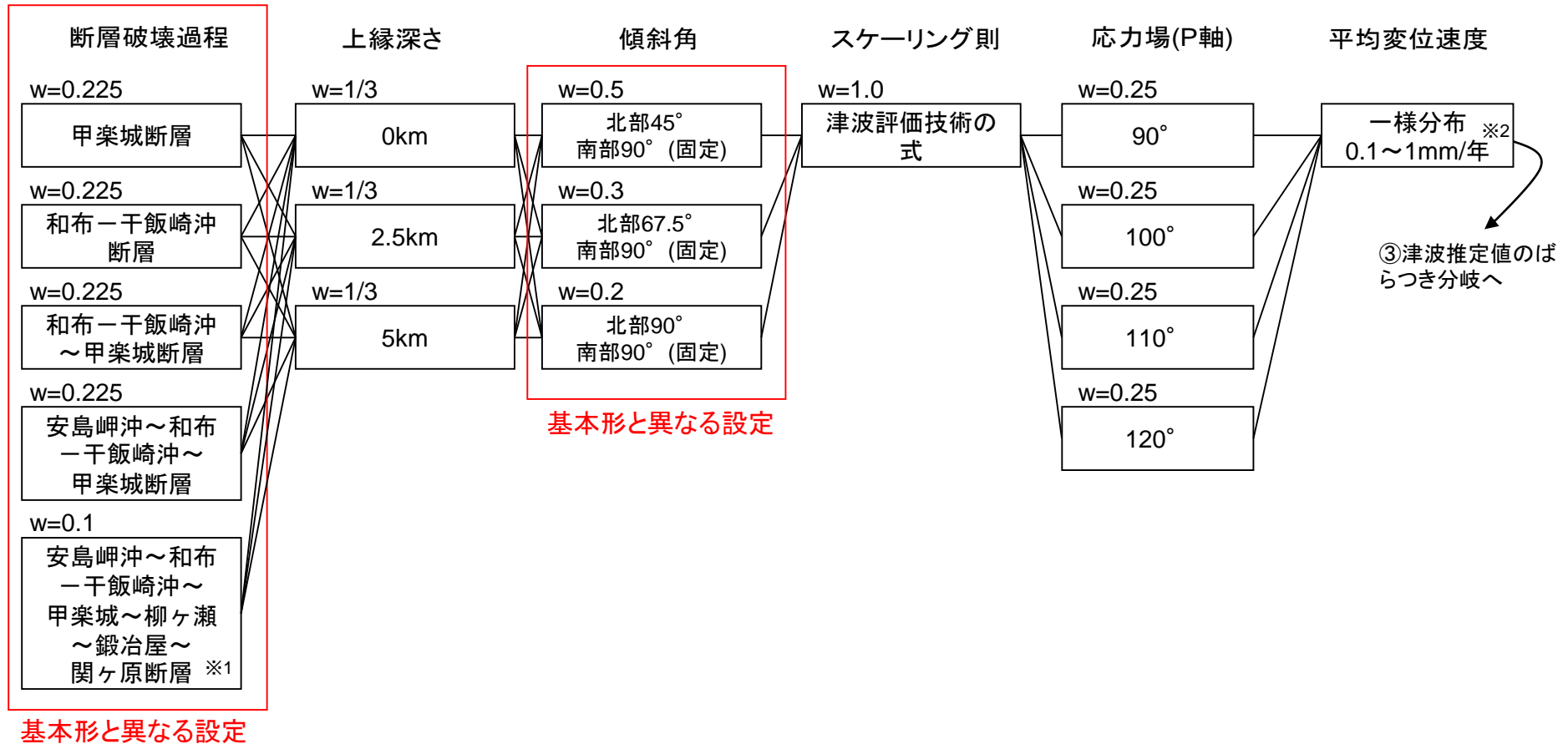
◆ 大陸棚外縁～B～野坂断層



海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

◆ 安島岬沖～和布一干飯崎沖～甲楽城～柳ヶ瀬～鍛冶屋～関ヶ原断層



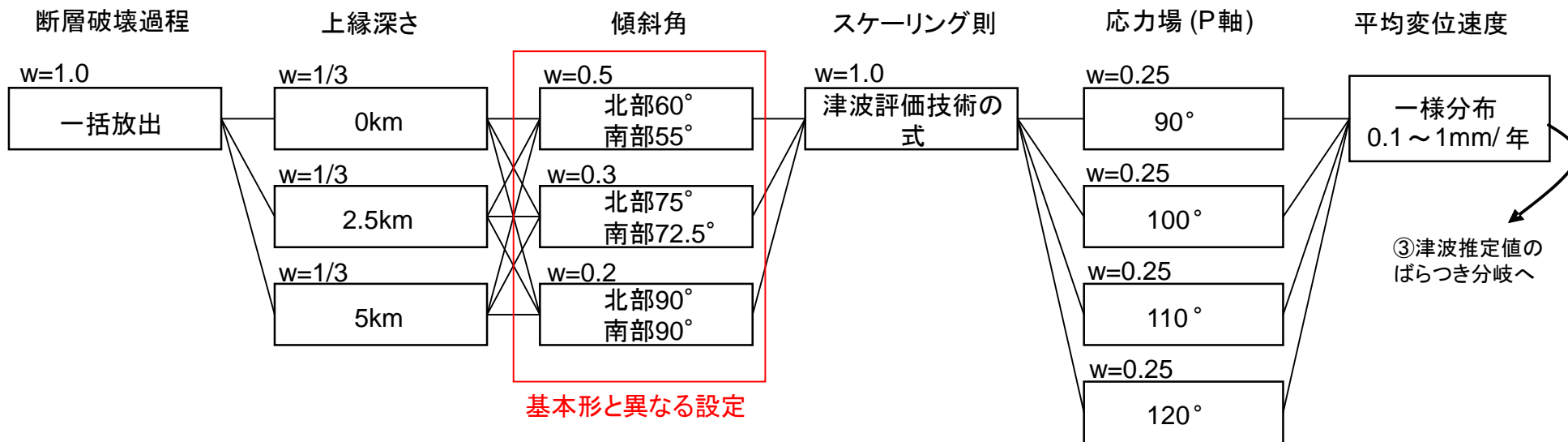
※1: 地震動評価における不確かさケースを考慮。100kmを超える長大断層の規模の算出については、【参考6】に記載。

※2: 和布一干飯崎沖断層は、比較的最近の平均変位速度として1mm/年を超える可能性がある調査結果も得られているが、段丘面調査などより長期間の調査結果や運動を考慮した場合には他の断層と差異がないと考えられることから、全体としては活動度は他と同様にA級下限～C級上限の範囲として設定。(【参考6】p.45)

海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

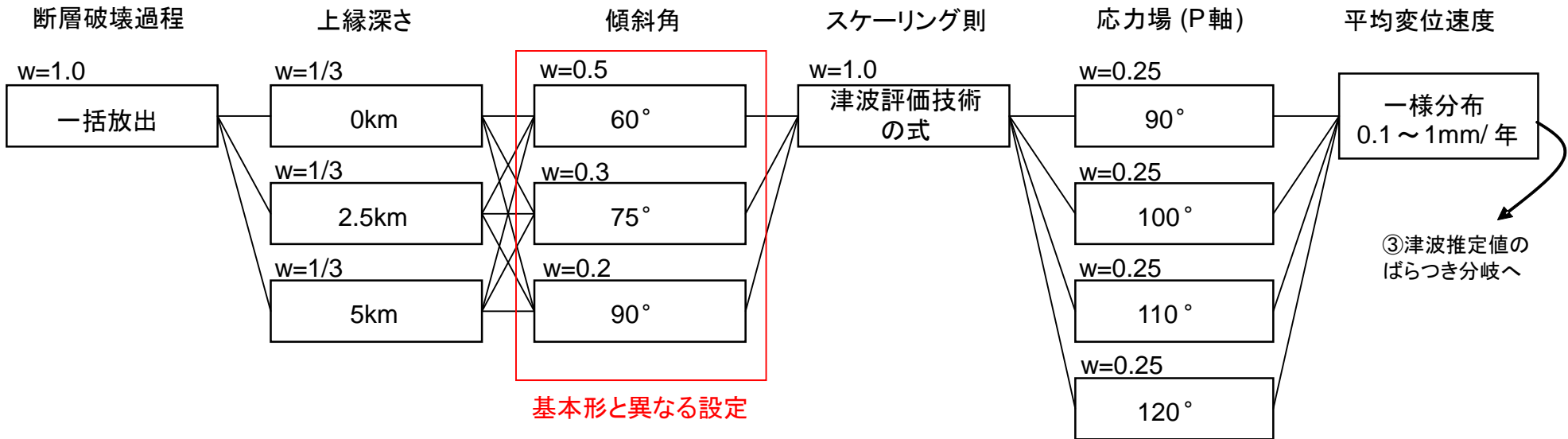
◆ C断層



海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

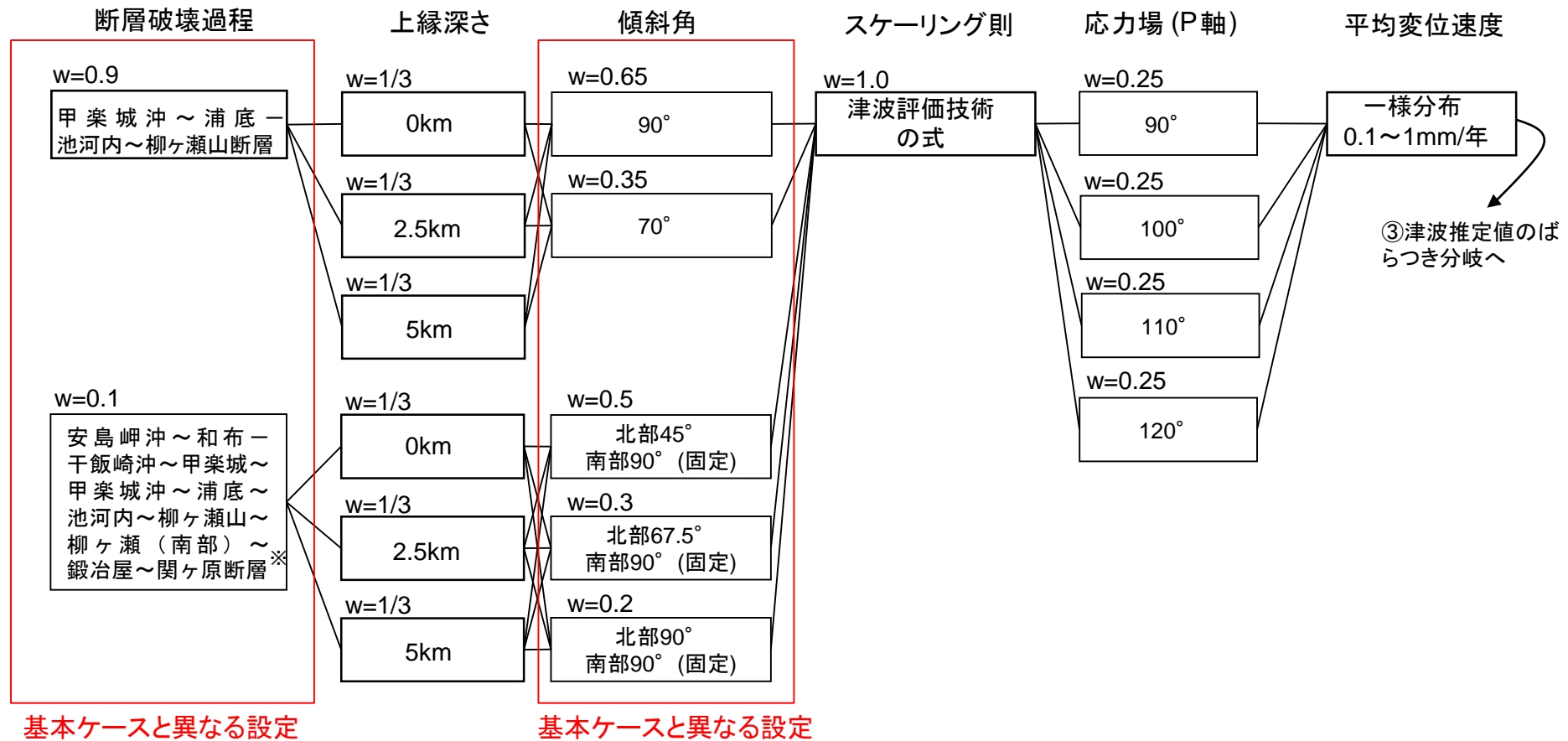
- ◆ 三方断層
- ◆ 白木-丹生断層



海域活断層 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

- ◆ 安島岬沖～和布～干飯崎沖～甲楽城～甲楽城沖～浦底～池河内～柳ヶ瀬山～柳ヶ瀬(南部)～鍛冶屋～関ヶ原断層



基本ケースと異なる設定

基本ケースと異なる設定

※:地震動評価における不確かさケースを考慮。100kmを超える長大断層の規模の算出については、【参考6】に記載。

海域活断層 ロジックツリーの設定(まとめ)

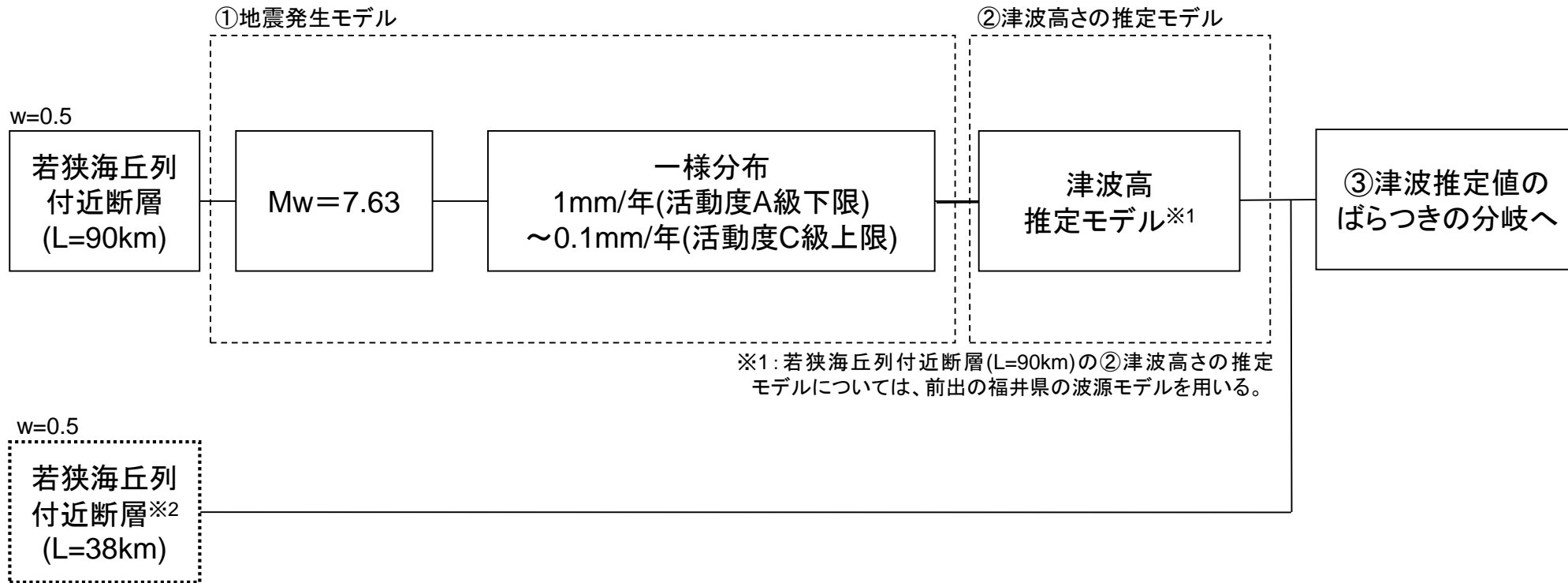
①地震発生、②津波高推定モデル

断層名	断層破壊過程	上縁深さ	傾斜角	スケーリング則	応力場(P軸)	平均変位速度
F _{GA} 3東部断層	基本形に従う (一括放出)	基本形に従う (0~5km)	基本形に従う (90° ~45°)	基本形に従う (津波評価技術の式)	基本形に従う (90° ~120°)	基本形に従う (0.1~1mm/年)
FO-A~FO-B~ 熊川断層	連動ケースの 分岐を設定		調査結果に基づき設定 (90° を基本とする)			
大陸棚外縁~B~ 野坂断層	連動ケースの 分岐を設定		調査結果に基づき設定 (北部:60° 南部:90° を基本とする)			
安島岬沖~和布~干飯 崎沖~甲楽城~柳ヶ瀬 ~鍛冶屋~関ヶ原断層	連動ケースの 分岐を設定		調査結果に基づき設定 (北部:45° 南部:90° を基本とする)			
C断層	基本形に従う (一括放出)		調査結果に基づき設定 (北部:60° 南部:55° を基本とする)			
三方断層	基本形に従う (一括放出)		調査結果に基づき設定 (60° を基本とする)			
白木~丹生断層	基本形に従う (一括放出)		調査結果に基づき設定 (60° を基本とする)			
安島岬沖~和布~干飯 崎沖~甲楽城~甲楽城 沖~浦底~池河内~ 柳ヶ瀬山~柳ヶ瀬(南部) ~鍛冶屋~関ヶ原断層	連動ケースの 分岐を設定		調査結果に基づき設定 (90° を基本とする)			

海域活断層(福井県モデル) ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

◆ 福井県モデル(若狭海丘列付近断層)

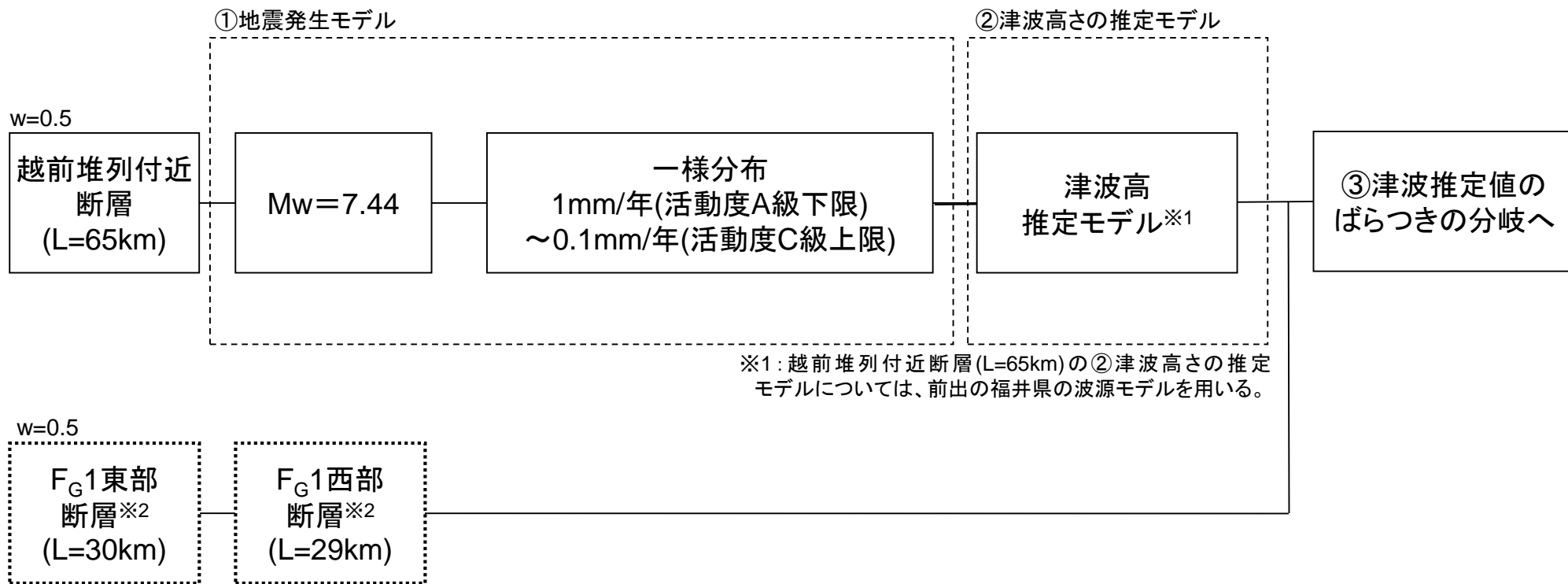


7-4-2. 海域活断層に想定される地震に伴う津波

海域活断層(福井県モデル) ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル

◆ 福井県モデル(越前堆列付近断層)

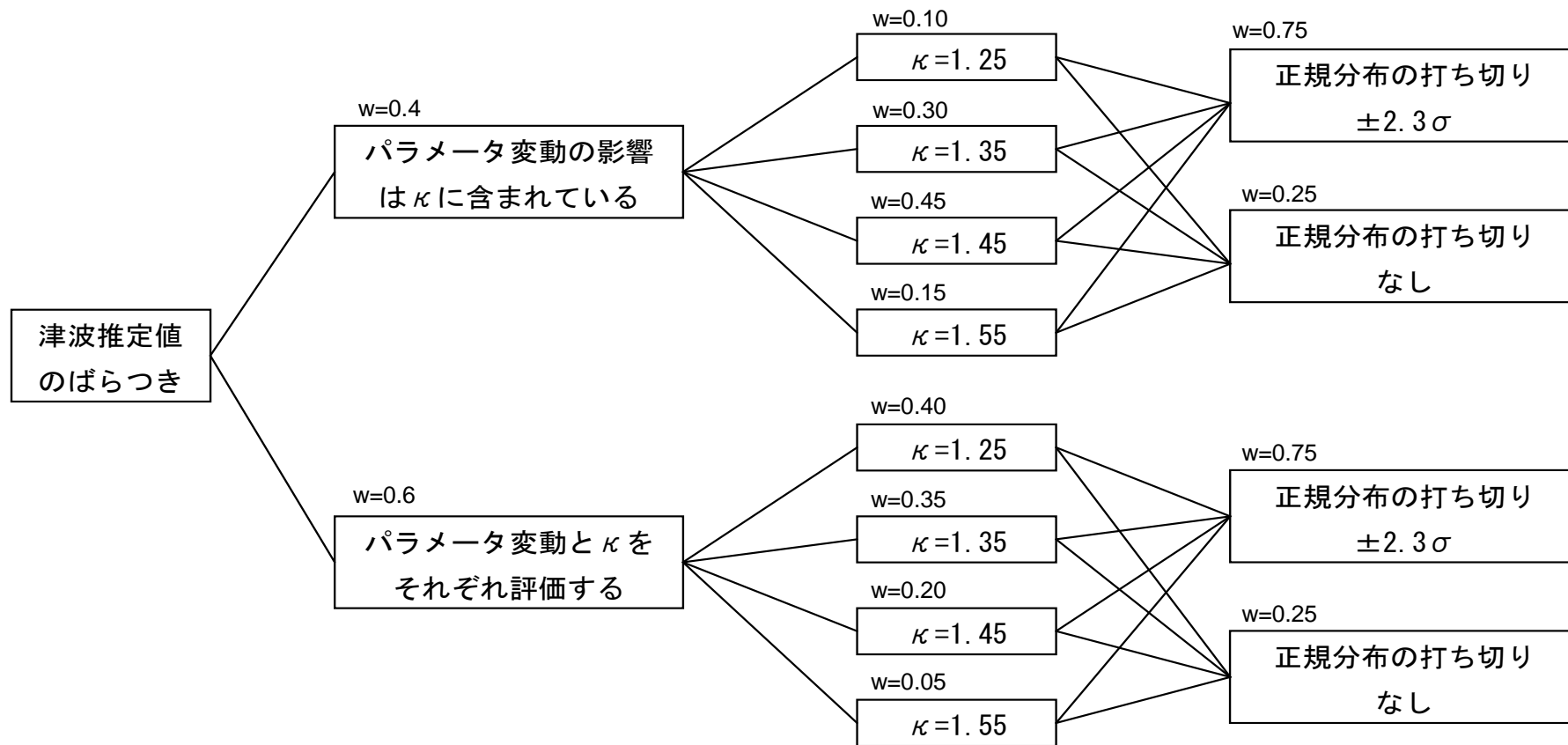


※1: 越前堆列付近断層(L=65km)の②津波高さの推定モデルについては、前出の福井県の波源モデルを用いる。

※2: F_G1東部断層(L=30km)及びF_G1西部断層(L=29km)は、津波水位が小さく年超過確率への影響が小さいため、計算を省略する。

海域活断層 ロジックツリーの設定

③津波推定値のばらつきの分岐



※ロジックツリーは確率論的津波ハザード解析の方法(土木学会, 2011)を参考に設定

※w(重み)は土木学会及び地震専門家へのアンケートに基づき決定

7-4-3. 領域震源(背景的地震)による津波

領域震源(背景的地震)

現時点で海域活断層として特定されていない震源により津波が生じる場合の年超過確率について評価する。

【対象とする活動域】

○領域震源(場所を特定できない点震源)の評価においては、地震ハザード評価で用いられている活動域と同一の設定を用いる。活動域の区分に関しては、

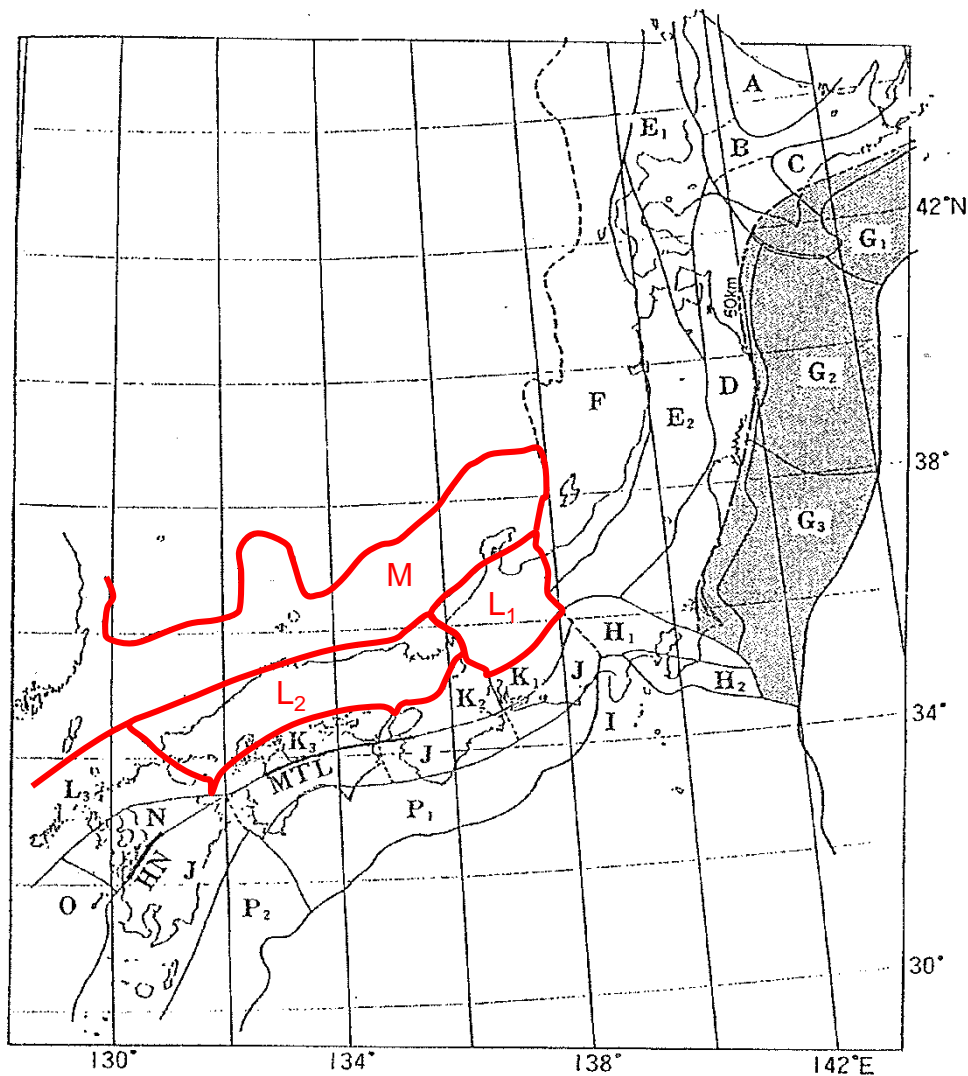
- ・萩原マップによる領域区分
- ・新垣見マップによる領域区分

についてロジック分岐を設定し、両方の区分により評価する。

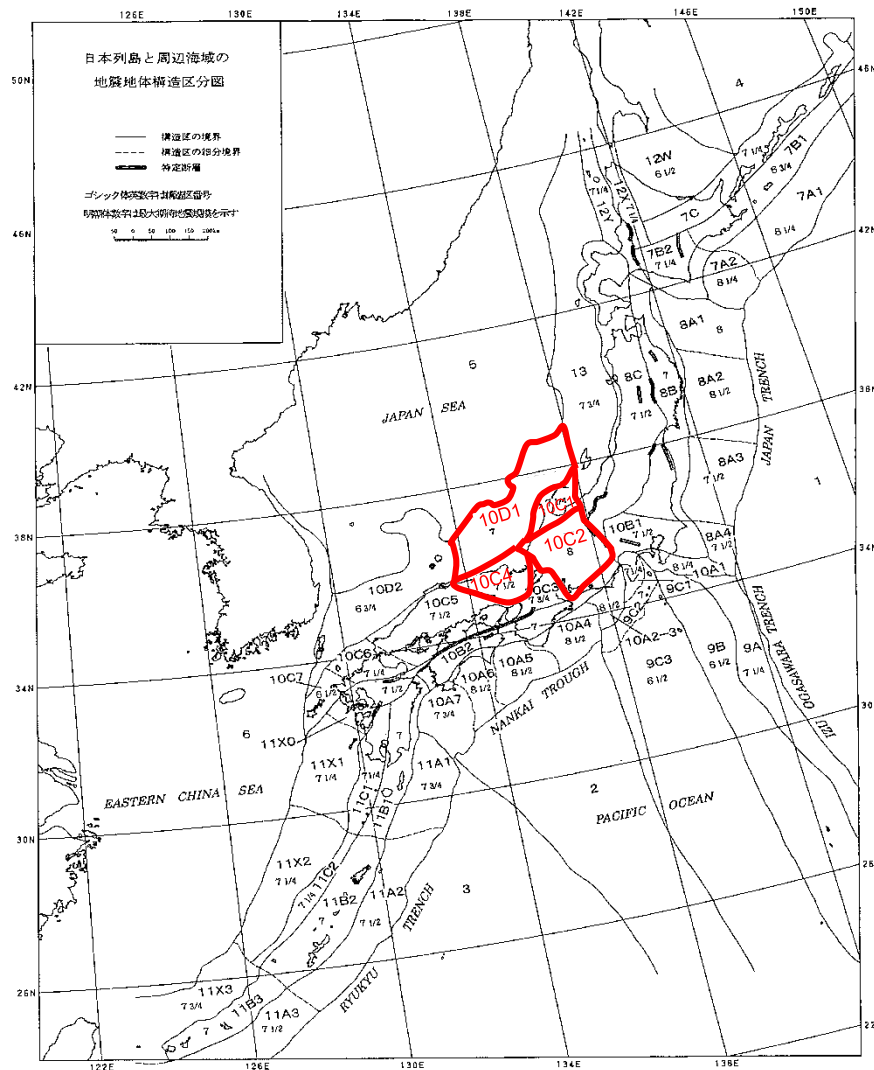
○敷地前面海域(約30km以内)については、海上音波探査結果等に基づいて将来の活動を否定できない活断層を評価していることから、点震源を設定しない。

サイトからの距離	
0~30km	30km以遠
領域震源による評価を実施しない ■ 海上音波探査結果等に基づいて将来の活動を否定できない海域の活断層を評価している。	領域震源による評価を実施 ■ 文献調査と主要地点の音波探査を行っているものの、場所が特定されていない断層が存在する可能性を排除できない。 ■ 一定程度の津波水位を生じるため、年超過確率への影響は無視できない。 ■ 簡易式およびシミュレーションによりサイトの評価レベルに影響を与えると判定された波源を対象に、評価を行う。

萩原マップ及び新垣見マップによる領域区分



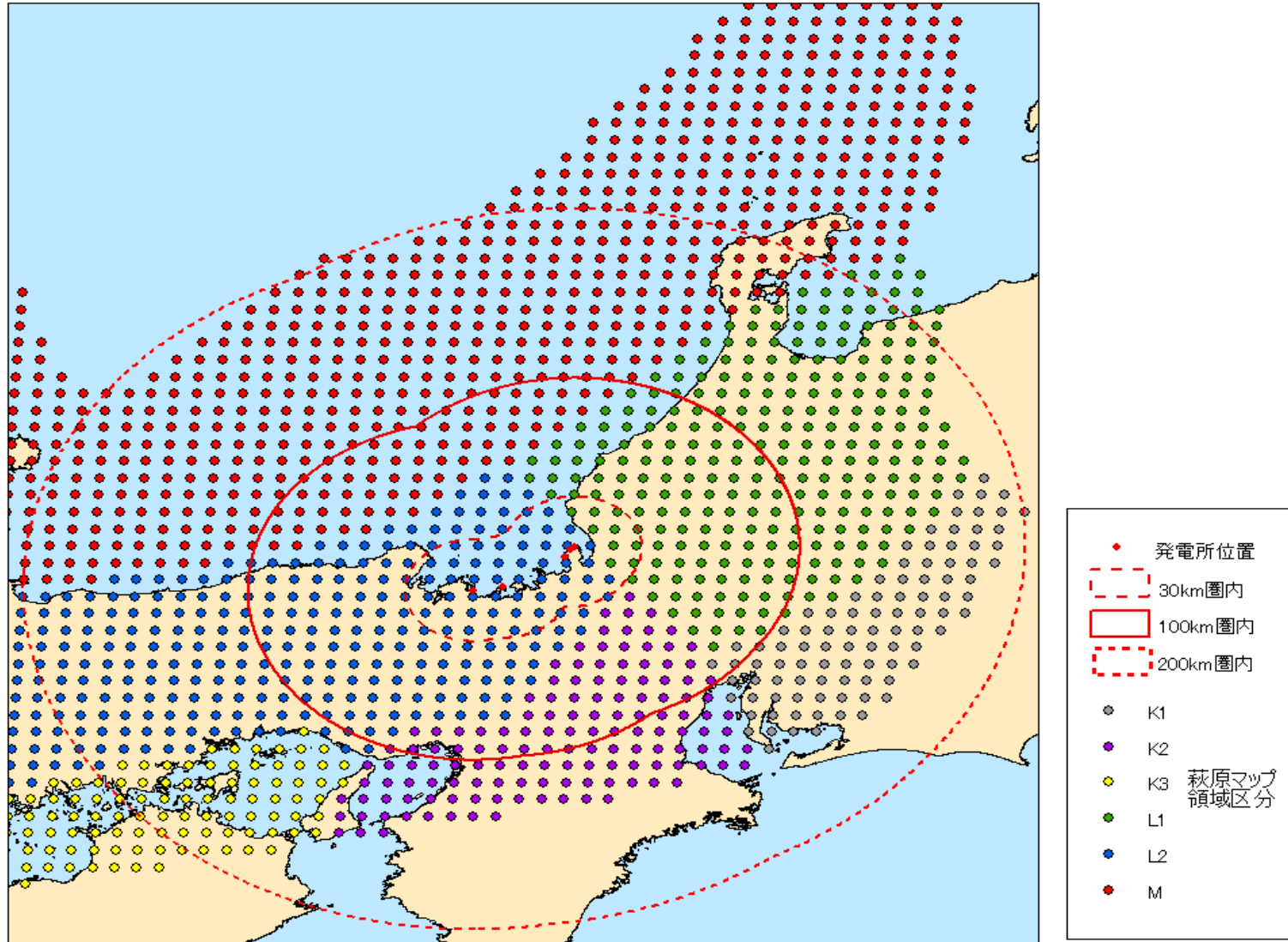
萩原編(1991)による地震地体構造区分図



垣見他(2003)による地震地体構造区分図

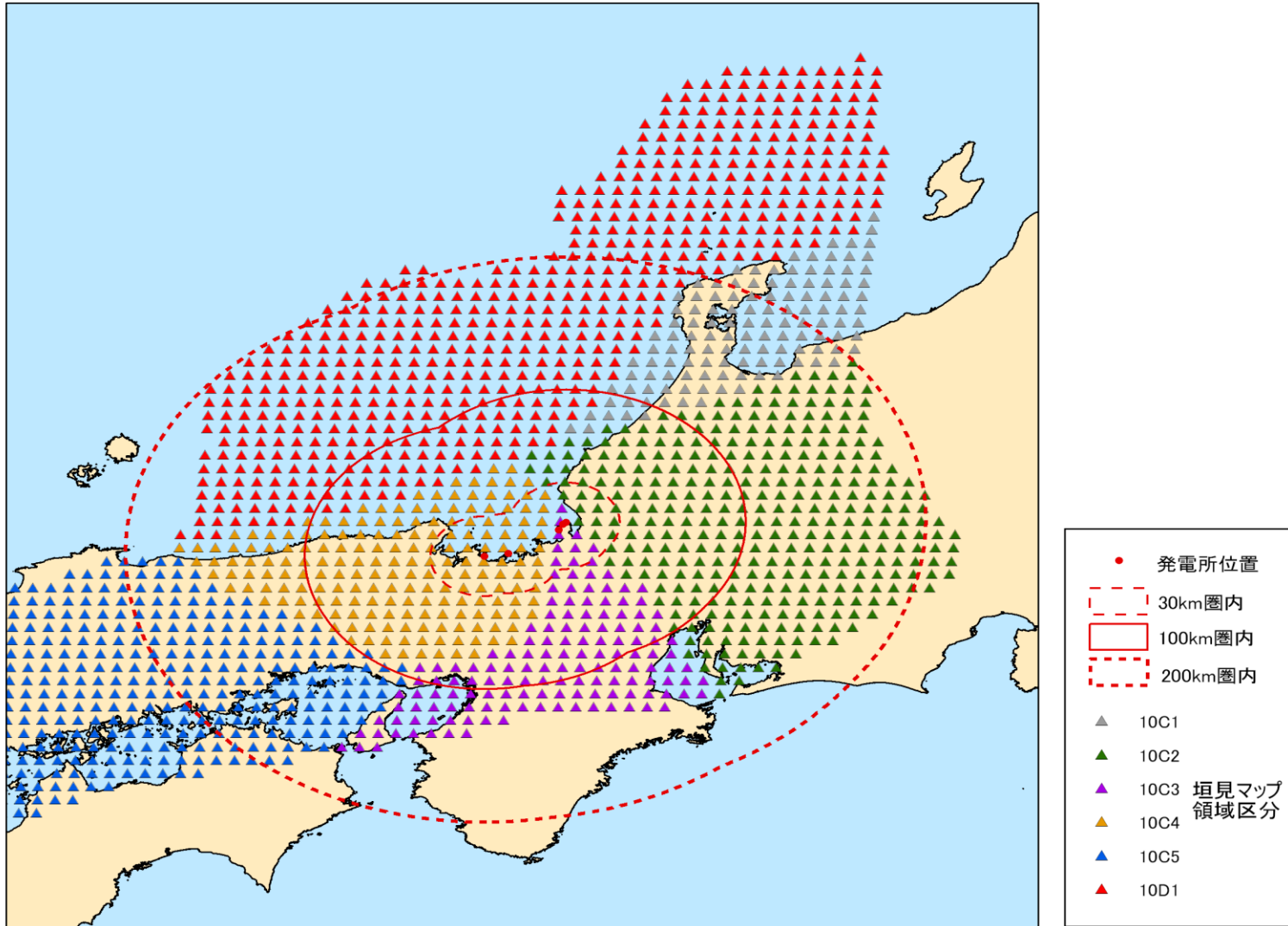
領域震源 対象とする活動域

【萩原マップによる領域区分】



領域震源 対象とする活動域

【新垣見マップによる領域区分】



領域震源 スクリーニング

ハザードに与える影響が非常に小さい波源の取り除くため、スクリーニング※を実施

【スクリーニングの手法】

- ・それぞれの検討対象断層で阿部(1989)の簡易予測式を用いて津波水位の推定を行う。
- ・サイトの、潮位を考慮した上昇側・下降側双方の評価レベルのうち、絶対値の小さい方に対して、以下の式を満たす断層については検討から除外する。

$$|X| > \alpha |H_e| \cdot \kappa^{2.3}$$

X : 評価対象となる水位(建屋付近の敷地レベル:T.P.+3.5m)

H_e : 簡易予測式により計算された津波高さ

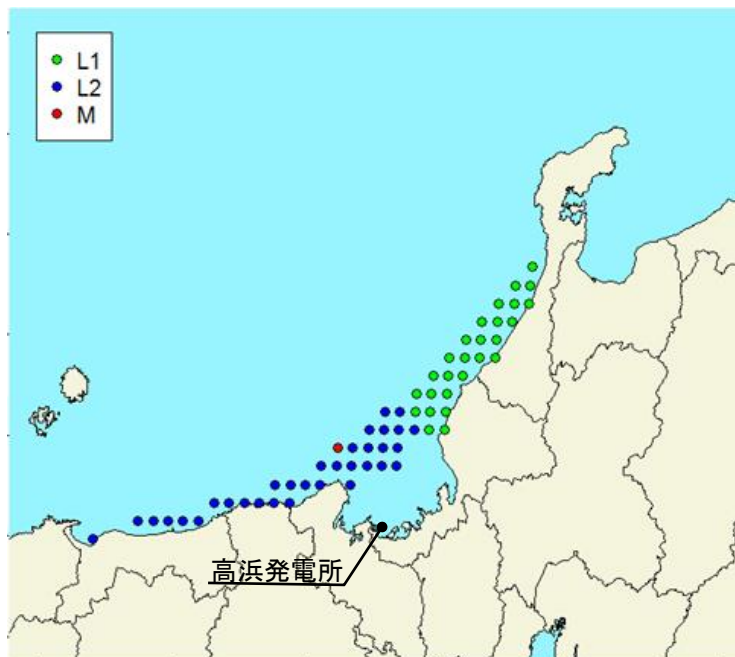
κ : 津波高さのばらつき($\kappa=1.55$)

α : 簡易予測式の精度を考慮した余裕幅($\alpha=2.0$)

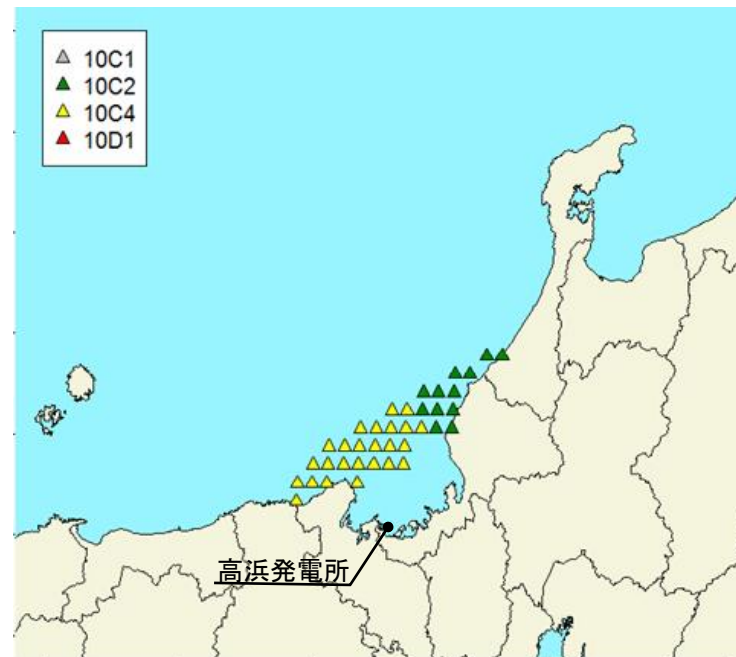
※スクリーニングは高浜、大飯、美浜3サイト共通で実施しており、全てのサイトで閾値を下回った波源のみを除外対象としている。

【スクリーニングの結果】

検討対象とする領域震源(萩原マップ)



検討対象とする領域震源(新垣見マップ)



領域震源の諸元

【萩原マップによる領域震源モデルの諸元】

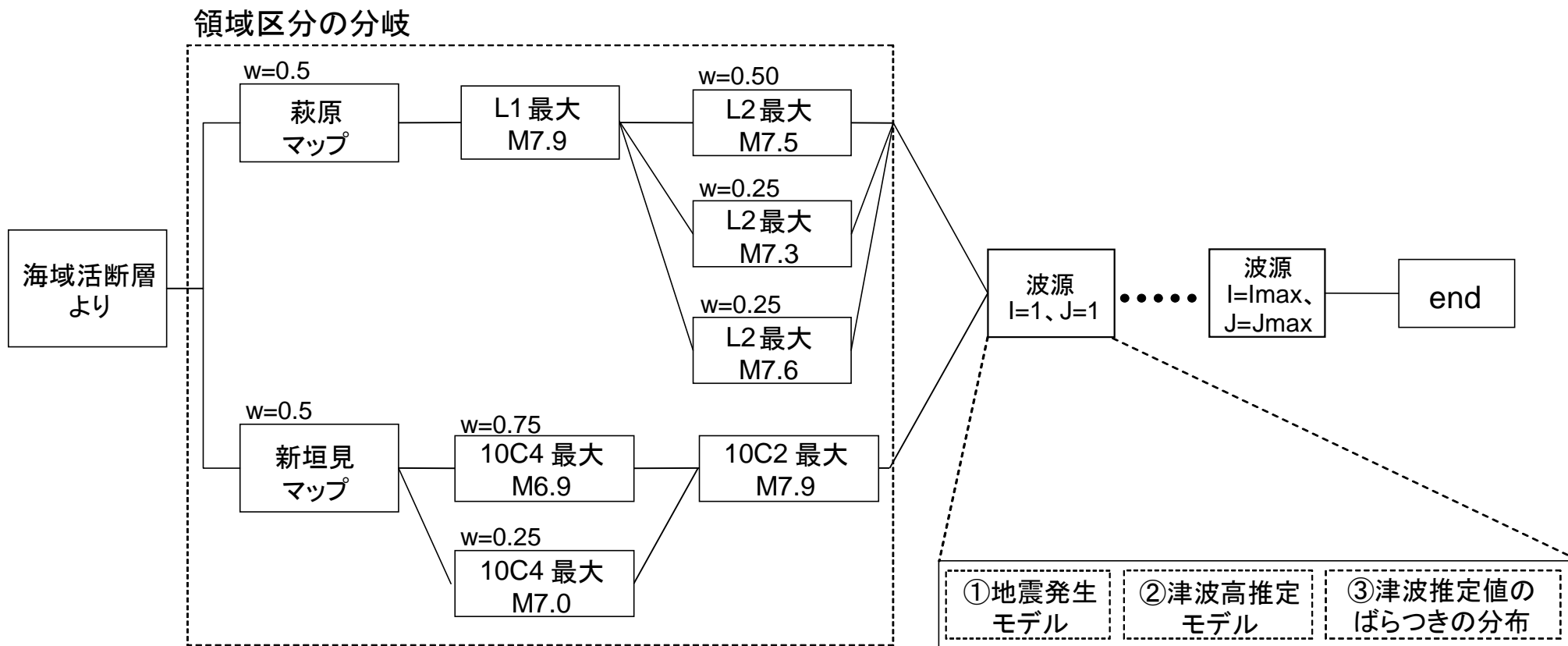
領域名	構造区		最小M	最大M	b値	発生頻度 (回/年)	上縁深さ (km)
L1	西南日本 内帯北部	中部山地	5.0	7.9	0.79	0.40	0~5km 一様分布
L2		中国山地	5.0	7.3 7.5 7.6	0.88	1.00	
M	西南日本内帯沿岸部		5.0	6.9	0.66	0.21	

【新垣見マップによる領域震源モデルの諸元】

領域名	構造区	最小M	最大M	b値	発生頻度 (回/年)	上縁深さ (km)
10C1	能登	4.0	6.9	0.60	0.52	0~5km 一様分布
10C2	中部山岳	5.0	7.9	0.79	0.48	
10C4	西近畿	5.0	6.9 7.0	0.74	0.38	
10D1	能登・若狭沖海域	4.0	6.6	0.83	1.02	

領域震源 ロジックツリーの構成

【領域震源のロジック分岐の構成】



領域震源の断層パラメータ

【大地震以外の上部地殻内地震(背景的地震)の断層パラメータ設定方針】

	考えられる 不確実性	基本方針	分布形	備考
震源とサイトの 位置関係 (距離)	断層長さ	Mwから武村(1998)の関係で設定	—	
	断層幅	$W=2L/3$ (地震発生層15kmを上限)	—	
	断層上縁深さ	断層面の範囲を地表～地震発生層 上端まで	一様分布	
	傾斜角	$45\sim 90^\circ$	切断正規 分布	西南日本における値 傾斜方向は地形から決定
	すべり角	広域応力場の範囲 (一様分布)	一様分布	
	走向	各領域内における海域活断層の走向 より設定 (下記参照)	一様分布	
	位置	点震源位置に断層中心	—	

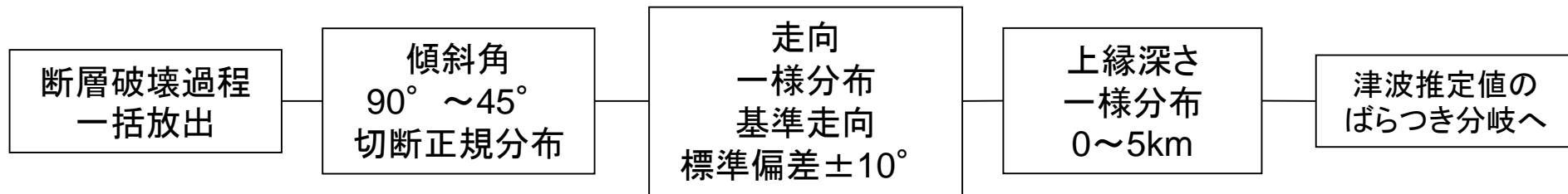
確率論的津波ハザード解析の方法(土木学会, 2011)を参考に設定

【領域震源の走向の設定】

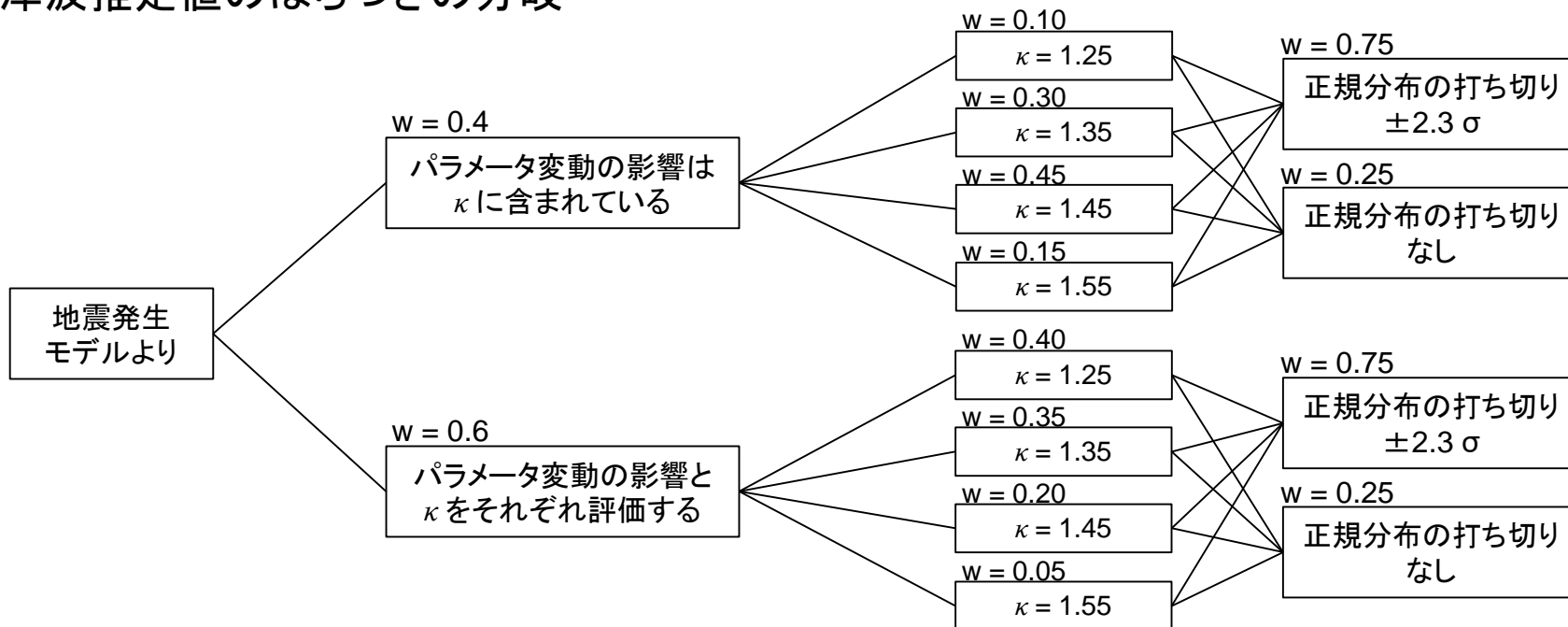
- ・領域内のセグメントの単純平均
- ・海域活断層の諸元を使用し、断層セグメントに分割
- ・どの領域に属するかの判断は、セグメント中心により実施
- ・角度の平均値は、落ち方向が異なるがセグメントの形状が同じもの(0° / 180°)を同一とみなして、最も標準偏差が小さくなるように算出。落ち方向は多数決により決定。

領域震源 ロジックツリーの設定

①地震発生、②津波高推定モデル



③津波推定値のばらつきの分岐



領域震源の地震発生モデル及び津波高推定モデルのロジックツリー

※ロジックツリーは確率論的津波ハザード解析の方法(土木学会, 2011)を参考に設定

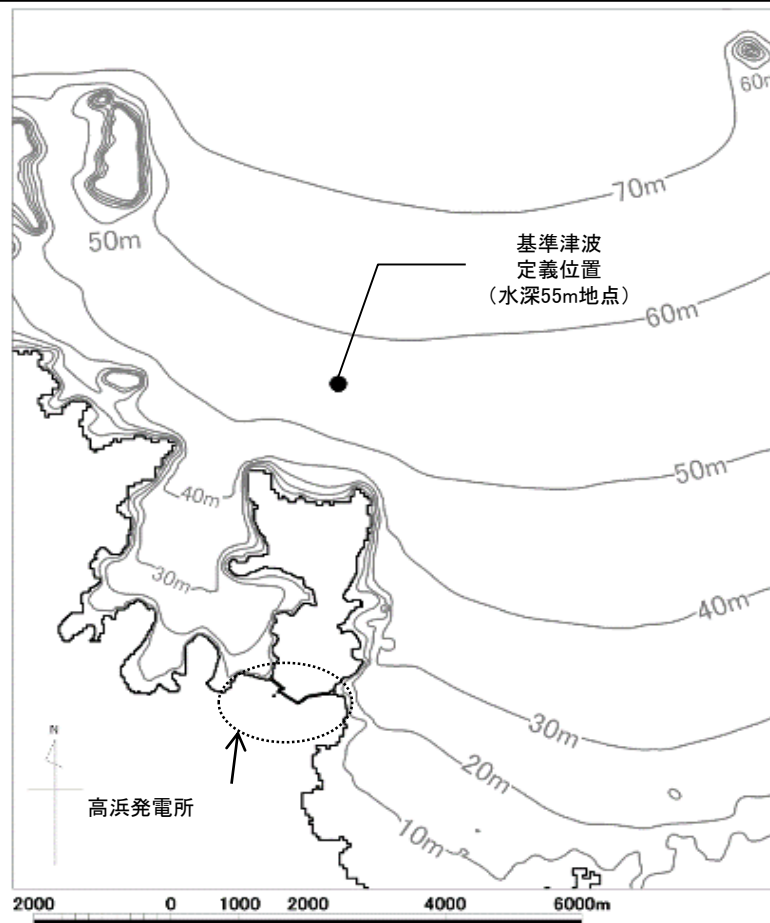
※w(重み)は土木学会及び地震専門家へのアンケートに基づき決定

7-5. 評価結果

7-5. 評価結果

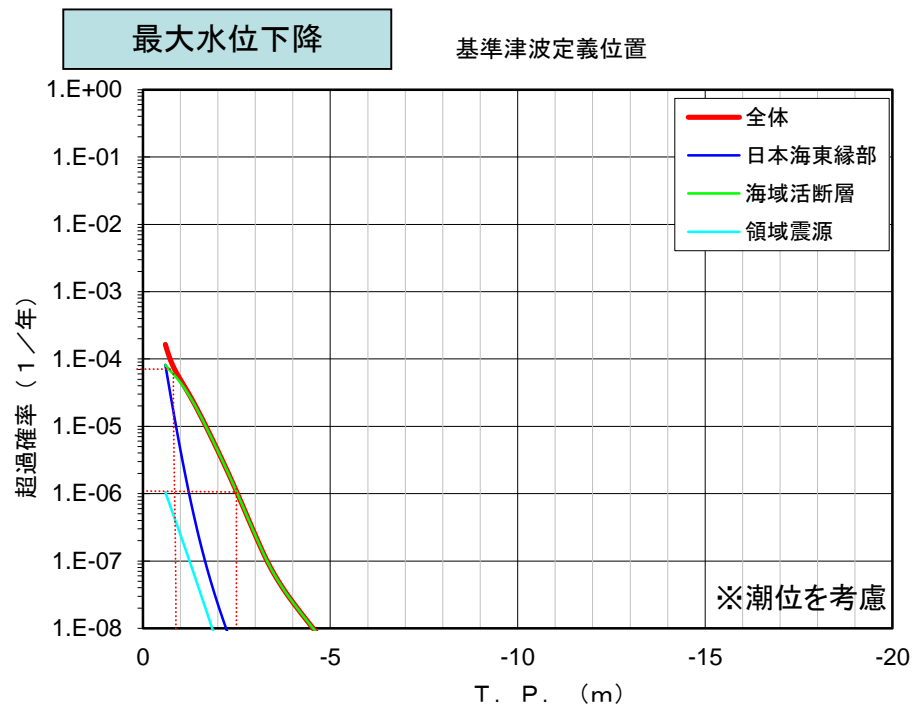
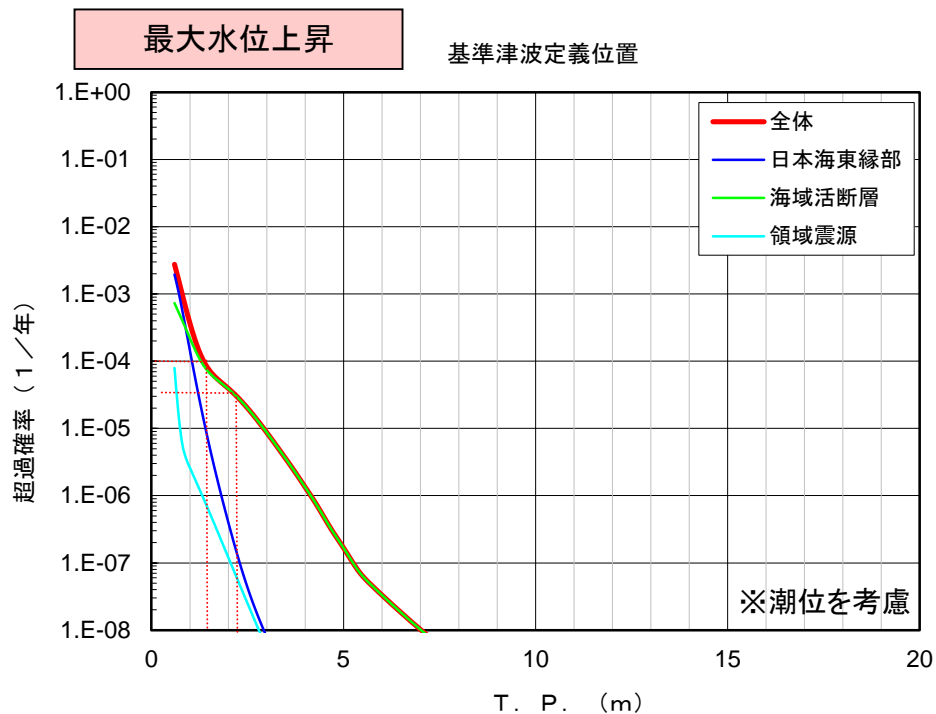
高浜発電所 津波ハザード評価結果

- ロジックツリーに基づき、モンテカルロシミュレーション(サンプル数:4,000)を用いて津波ハザード評価を行い、フラクタイル曲線、平均ハザード曲線として取りまとめた。
- なお、津波中央値計算に用いたモデルは、概略モデル(12.5mメッシュ)を用いており、取水口及び放水口前面において完全反射条件としている。



高浜発電所における評価地点(基準津波定義位置)

高浜発電所 津波ハザード評価結果(波源毎の平均ハザード曲線)

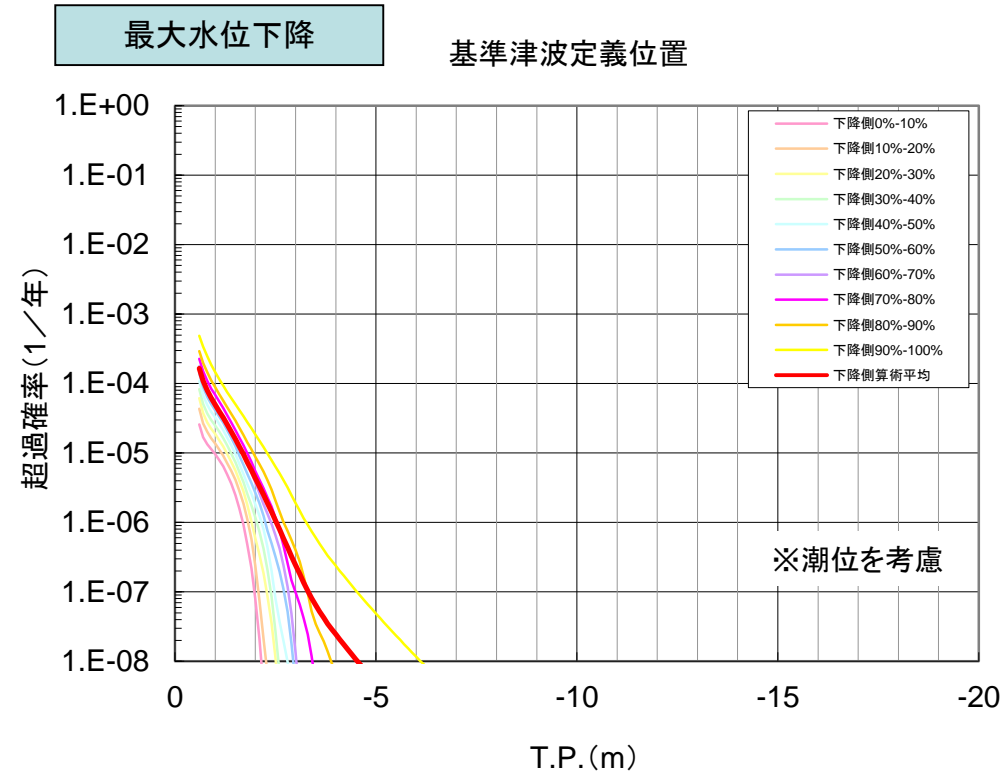
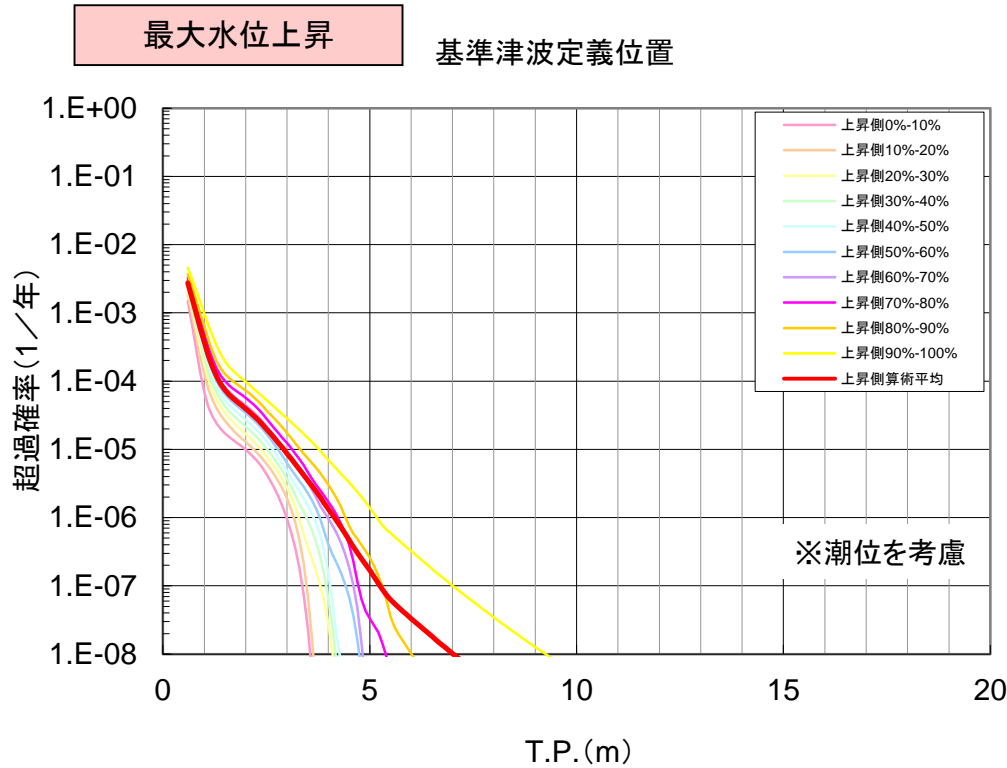


評価点		基準津波による水位	年超過確率(1/年) (平均ハザード曲線)
最大水位 上昇側	基準津波1 定義位置 (水深55m)	T.P.+2.2m	3.1×10^{-5}
	基準津波2 定義位置 (水深55m)	T.P.+1.4m	9.1×10^{-5}

評価点		基準津波による水位	年超過確率(1/年) (平均ハザード曲線)
最大水位 下降側	基準津波1 定義位置 (水深55m)	T.P.-2.5m	1.1×10^{-6}
	基準津波2 定義位置 (水深55m)	T.P.-0.9m	6.2×10^{-5}

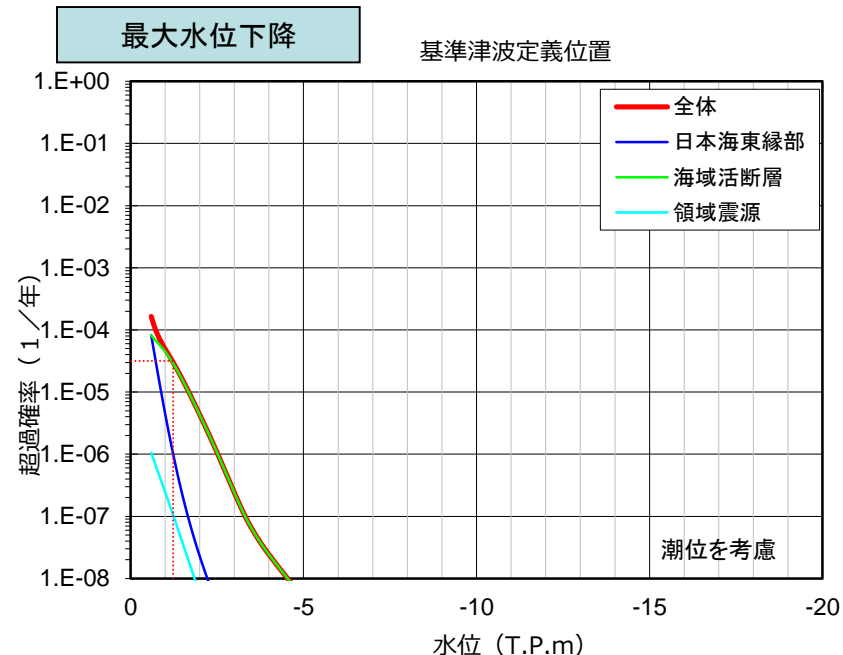
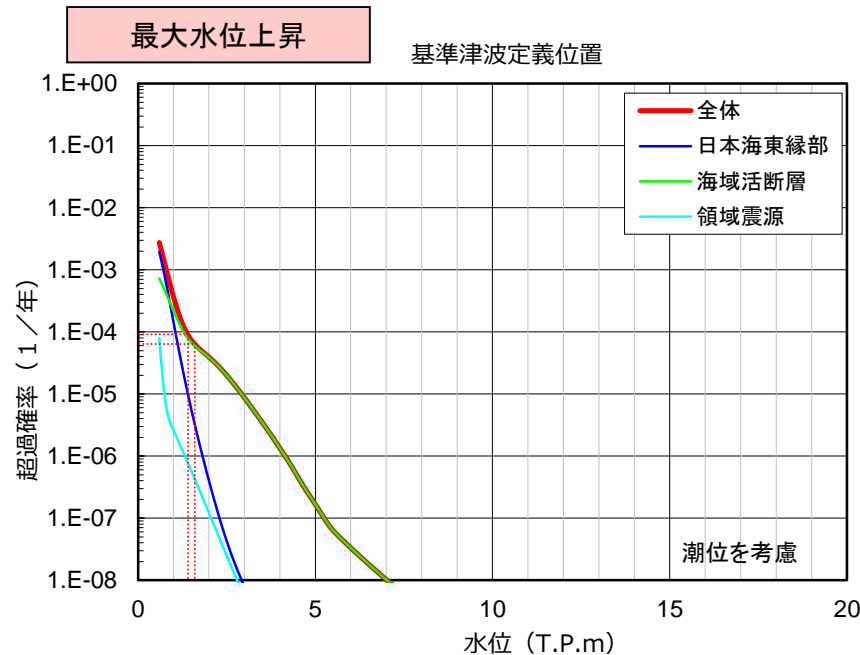
- 基準津波定義位置における、各基準津波水位に対する年超過確率は、水位上昇側で $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度、水位下降側で $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度である。
- 波源毎の平均ハザード曲線を確認した結果、 10^{-4} 以上は日本海東縁部、 10^{-4} 以下は海域活断層が支配的である。
- これは、日本海東縁部波源においては相対的に発生頻度が高く、海域活断層波源では逆の傾向となっているためと考えられる。

高浜発電所 津波ハザード評価結果(10%毎のフラクタイル曲線)



基準津波3及び基準津波4の年超過確率に関する検討

●高浜発電所 津波ハザード評価結果(波源毎の平均ハザード曲線)



評価点 (基準津波定義位置:水深55m)		基準津波 による水位	年超過確率(1/年) (平均ハザード曲線)
最大水位 上昇側	基準津波3	T.P.+1.6m	6.3×10^{-5}
	基準津波4	T.P.+1.4m	9.1×10^{-5}

評価点 (基準津波定義位置:水深55m)		基準津波 による水位	年超過確率(1/年) (平均ハザード曲線)
最大水位 下降側	基準津波3	T.P.-1.2m	3.2×10^{-5}
	基準津波4	T.P.-1.2m	3.2×10^{-5}

- 確率論的津波ハザード評価において、海底地すべりについては発生頻度を設定することが難しいことから評価に含めないこととしている。
- 基準津波3及び基準津波4は海底地すべりによる津波であることから水位の年超過確率を求めることはできないが、基準津波3・基準津波4による水位は、ハザード曲線上では水位上昇側・水位下降側ともに年超過確率 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度に相当する。

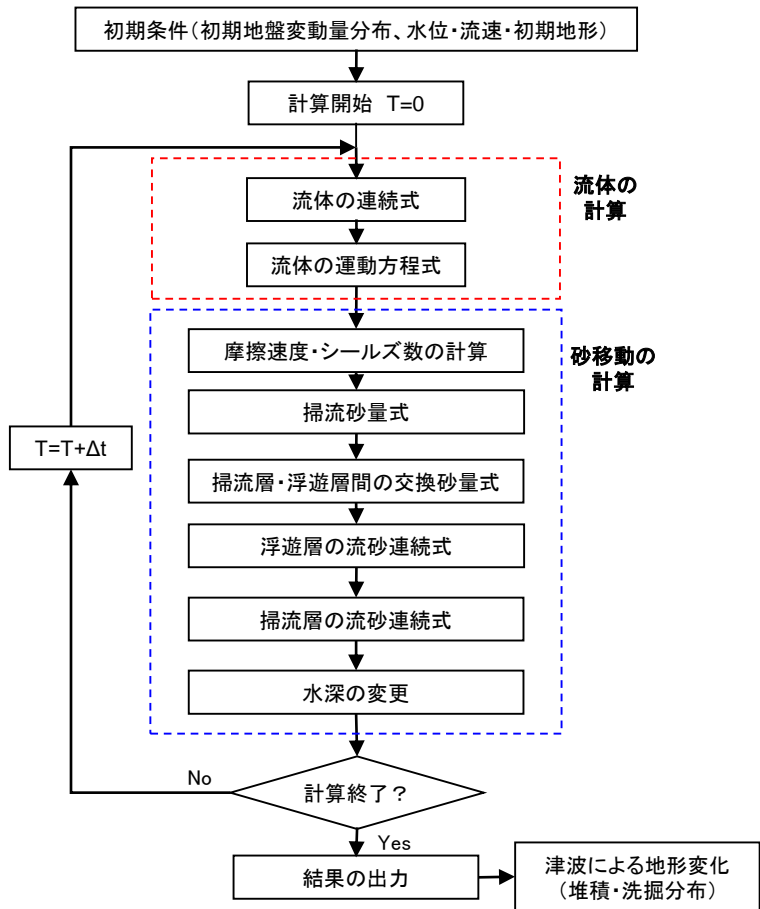
8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

8. 津波に対する安全性(砂移動評価等)

概要

○津波水位変動以外の事象に対する評価として、基準津波に伴う砂移動について評価を実施する。
○砂移動評価にあたっては、藤井他(1998)及び高橋他(1999)の手法に基づき、津波による砂の巻き上げ、沈降を考慮した移動床モデルによる数値シミュレーションを行った。

【数値シミュレーションのフロー】



	藤井他(1998)の手法	高橋他(1999)の手法
掃流層の流砂連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{E-S}{\sigma(1-\lambda)} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{E-S}{\sigma} \right) = 0$
浮遊層の流砂連続式	$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial(C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial(MC_s)}{\partial x} - \frac{E-S}{\sigma} = 0$
流砂量式	小林他(1996)の実験式 $Q = 80\tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋他(1999)の実験式 $Q = 21\tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
浮遊砂層への巻き上げ量算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{ \frac{-wD}{k_z} \right\} \right]}$	高橋他(1999)の実験式 $E = 0.012\tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$
沈降量の算定式	$S = wC_b$	$S = wC_s \cdot \sigma$
摩擦速度の計算式	log-wake則 ($u_* / U = \kappa / \{\ln(h/Z_0) - 1\}$ に wake関数を付加した式)を鉛直方向に積分した式より算出	マンニング則より算出 $u_* = \sqrt{gn^2 U U / D^{1/3}}$

Z: 水深変化量(m) t: 時間(s) x: 平面座標
 τ_* : シールズ数 σ : 砂粒の密度(g/cm³) ρ : 海水の密度(g/cm³)
 g: 重力加速度(m/s²) d: 砂の粒径(mm) U: 流速(m/s)
 η : Manningの粗度係数(=0.03m^{1/3}・s 土木学会(2016)より)
 α : 局所的な外力のみに移動を支配される成分が全粒砂量に占める比率(=0.1, 藤井他(1998)より)
 k_z : 鉛直拡散係数(0.2 $\kappa \cdot u_* \cdot h$, 藤井他(1998)より)(m²/s)
 h: 水深(m) Z₀: 粗度高さ(=ks/30)(m)
 C, C_b: 浮遊砂濃度, 底面浮遊砂濃度(浮遊砂層の連続式より算出)(kg/m³)
 C_s: 浮遊砂体積濃度(浮遊砂層の連続式より算出)(kg/m³)
 κ : カルマン定数(=0.4, 藤井他(1998)より)
 ks: 相当粗度(=d)(m)
 λ : 空隙率(=0.4, 高橋他(1992)より)

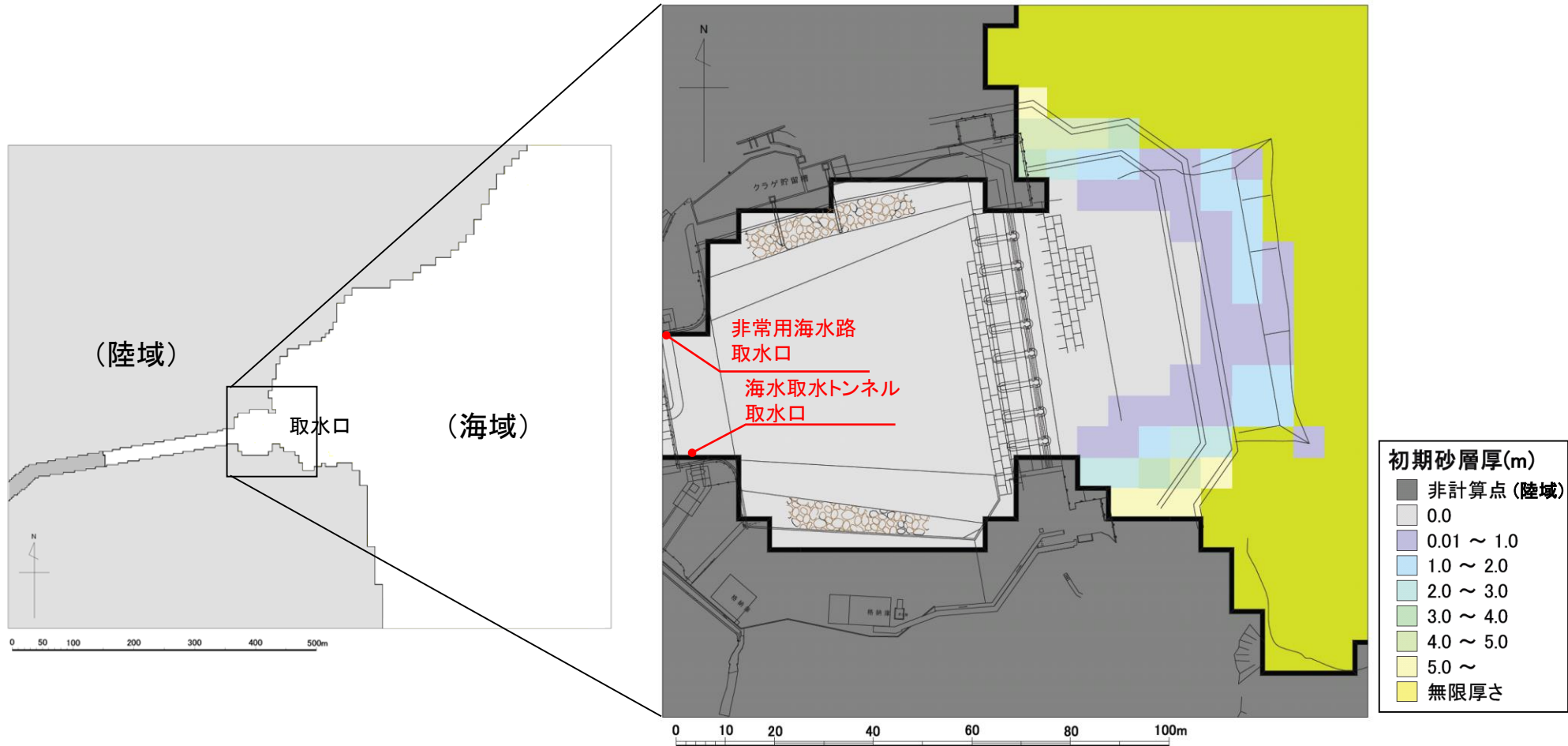
- 藤井直樹・大森政則・高尾誠・金山進・大谷英夫(1998):津波による海底地形変化に関する研究,海岸工学論文集,第45巻,pp.376-380.
- 小林昭男・織田幸伸・東江隆夫・高尾誠・藤井直樹(1996):津波による砂移動に関する研究,海岸工学論文集,第43巻,pp.691-695.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1992):土砂移動を伴う津波計算法の開発,海岸工学論文集,第39巻,pp.231-235.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999):掃流砂層・浮遊層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発,海岸工学論文集,第46巻,pp.606-610.

計算条件

設定項目	設定値
砂移動モデル	・藤井他(1998)による手法 ・高橋他(1999)による手法
解析領域	高浜発電所周辺海域(東西約11.4km、南北約10.2km)の範囲)
空間格子間隔	6.25m→3.125m
時間格子間隔	最小0.10秒
沖側境界条件	・津波の数値シミュレーションで得られる水位及び線流量を砂移動の数値シミュレーションの沖側境界条件とする ・解析領域境界での砂の流入出を考慮する
陸側境界条件	完全反射条件
浮遊砂体積濃度 上限値	藤井他(1998)の手法 1%, 5% 高橋他(1999)の手法 1%
砂の粒径	0.117mm (海底土質調査より設定)
砂粒の密度	2.686g/cm ³ (海底土質調査より設定)
海水の密度	1.03g/cm ³
空隙率	0.4(高橋他(1992))
マンングの粗度係数	0.03(土木学会(2016))
限界摩擦速度	岩垣式で算定
計算潮位	T.P.±0.0m
計算時間	地震発生後3.0時間
初期砂層厚	次ページのとおり

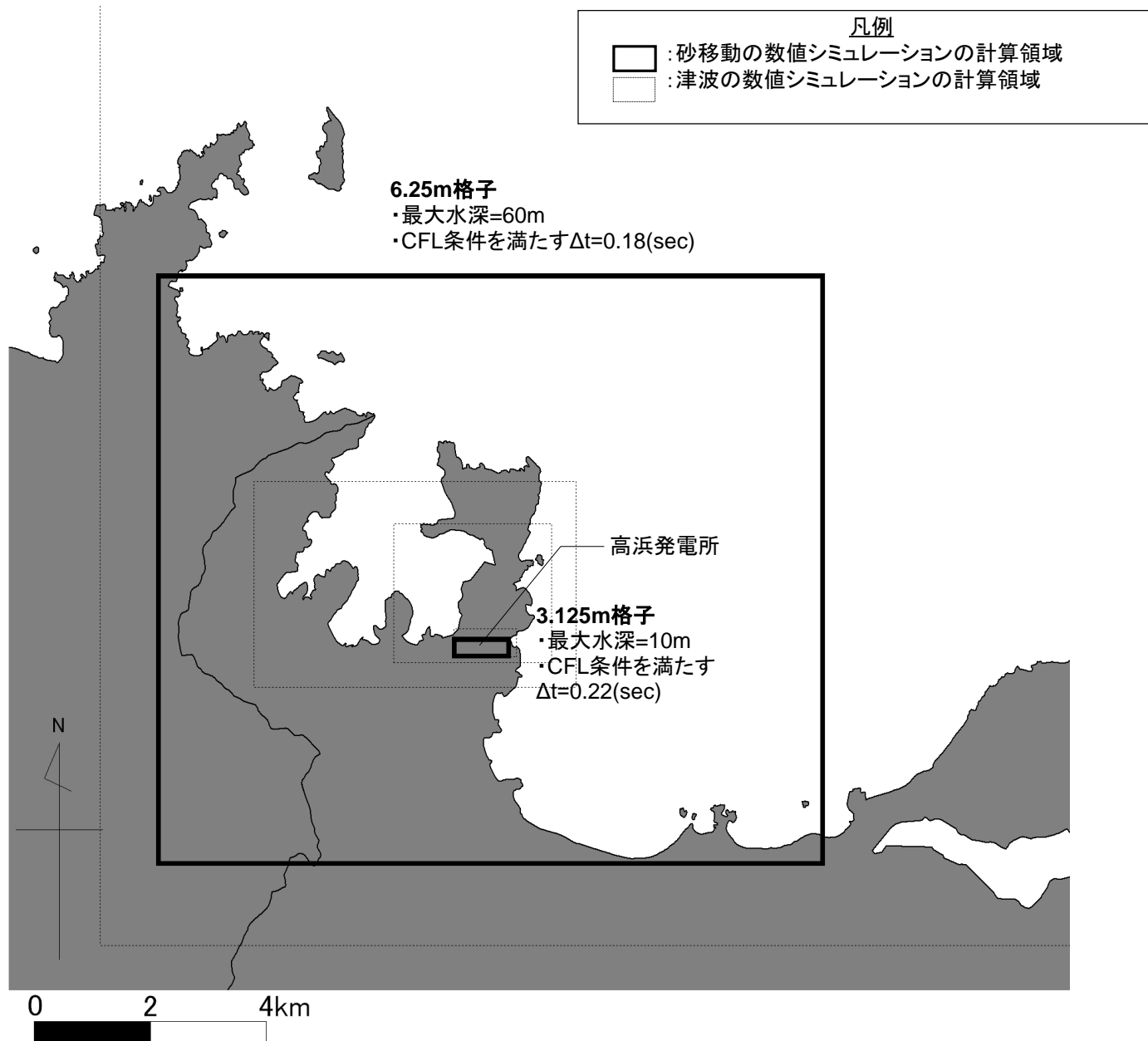
初期砂層厚の設定

- コンクリートブロック、捨石等による海底面被覆部を除いて沖合まで初期砂層厚は無限厚とする。
- 被覆部は、竣工図を基本とし、深浅測量の結果から砂の堆積が考えられる部分は初期砂層厚を設定し、被覆面天端以深には洗掘が生じないとする。



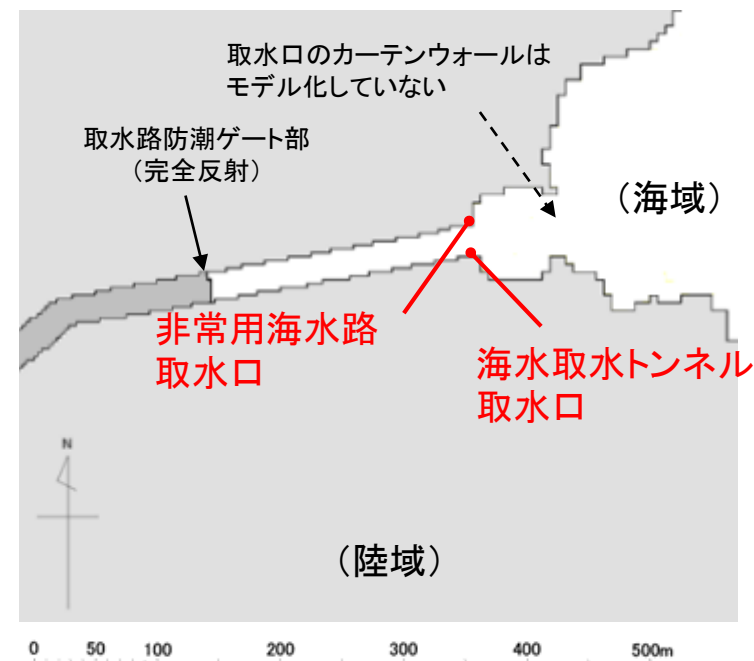
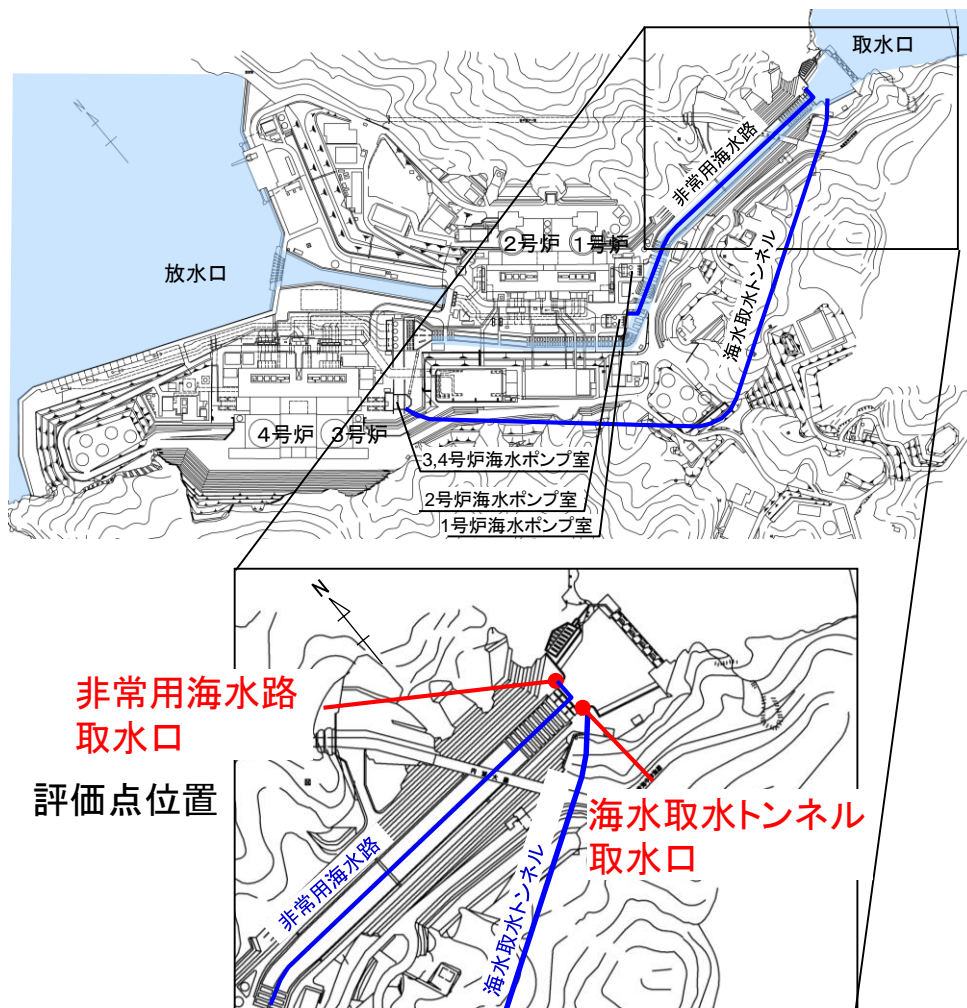
8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算領域及び空間格子間隔



8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

評価点と周辺のモデル化(基準津波1)

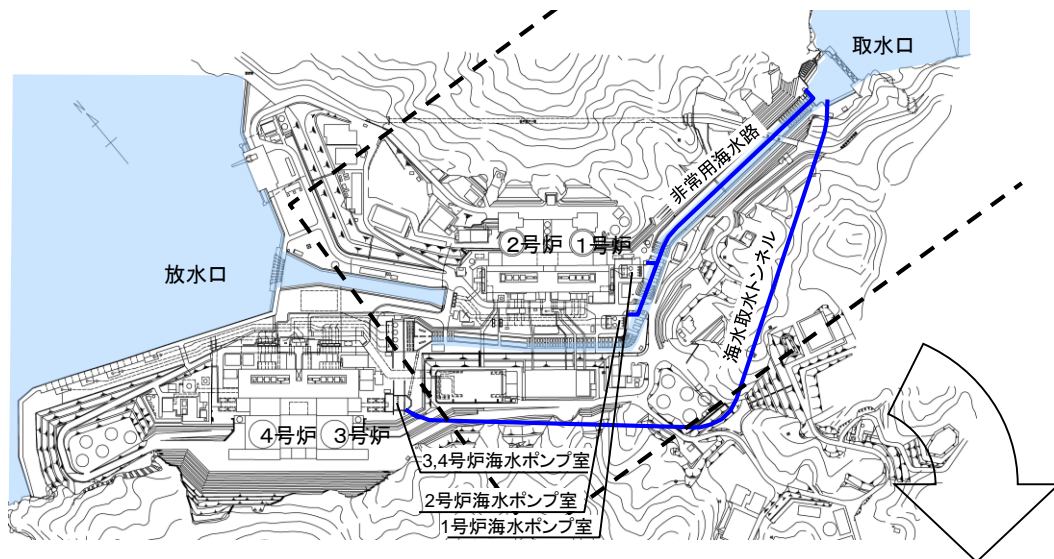


周辺のモデル化

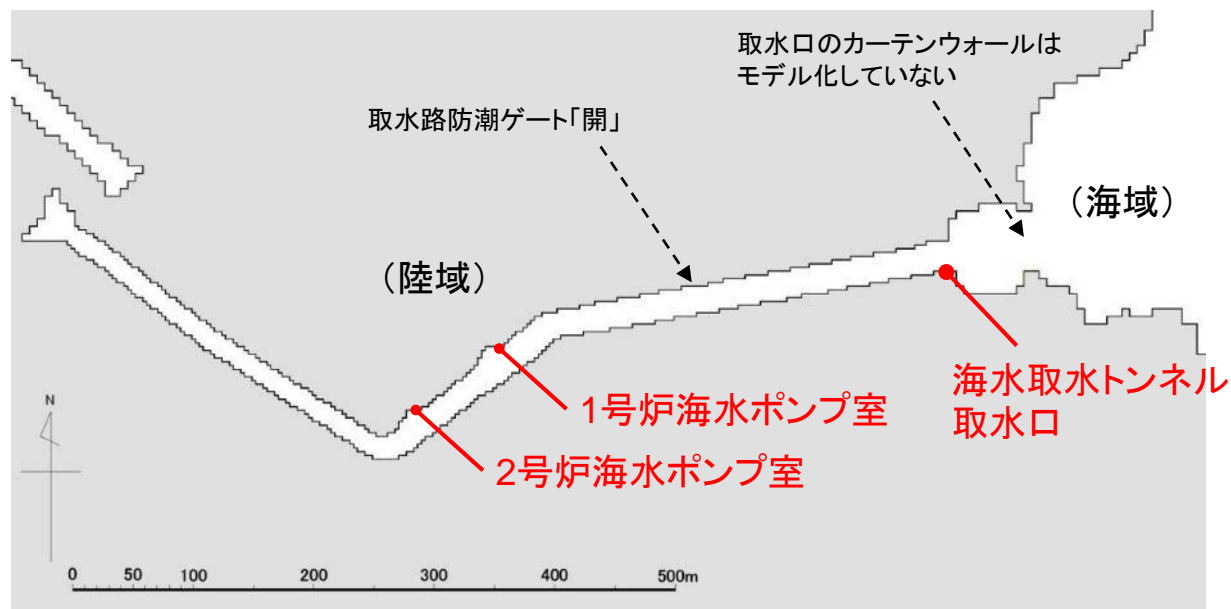
- 基準津波1来襲時には取水路防潮ゲートを閉塞するため、取水路防潮ゲート部までをモデル化し、全ての陸域境界で完全反射条件とする。
- 取水口のカーテンウォール、非常用海水路、海水取水トンネルはモデル化していない。
- 非常用海水路取水口及び海水取水トンネル取水口を評価点とし、1号炉、2号炉、3,4号炉の各海水ポンプ室における堆積量は別途計算する。

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

評価点と周辺のモデル化(基準津波2)



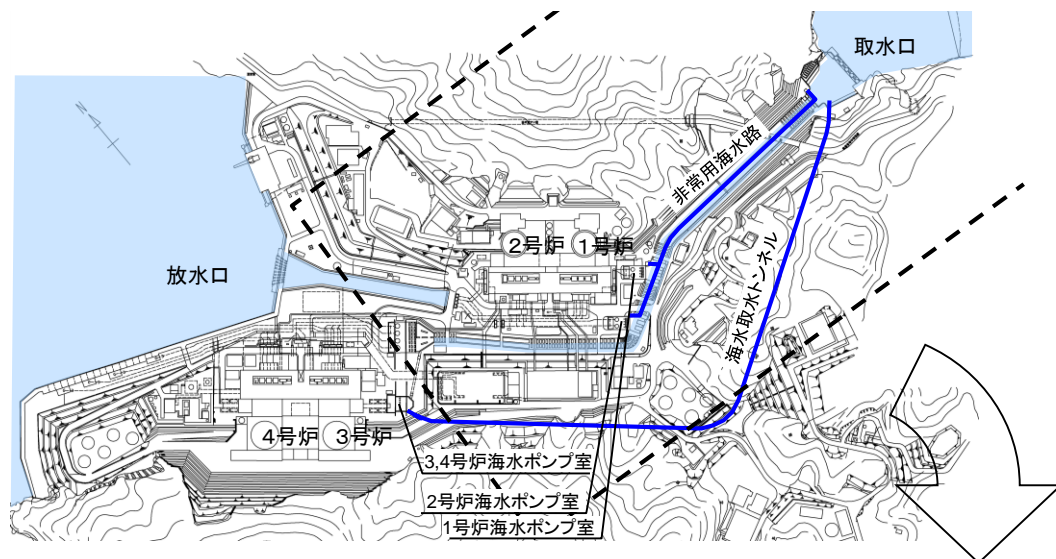
- 基準津波2来襲時には取水路防潮ゲートを閉塞できないため、取水路内をモデル化し、全ての陸域境界で完全反射条件とする。
- 取水口のカーテンウォール、非常用海水路、海水取水トンネルはモデル化していない。
- 1号炉及び2号炉海水ポンプ室ならびに海水取水トンネル取水口を評価点とし、3,4号炉海水ポンプ室における堆積量は別途計算する。



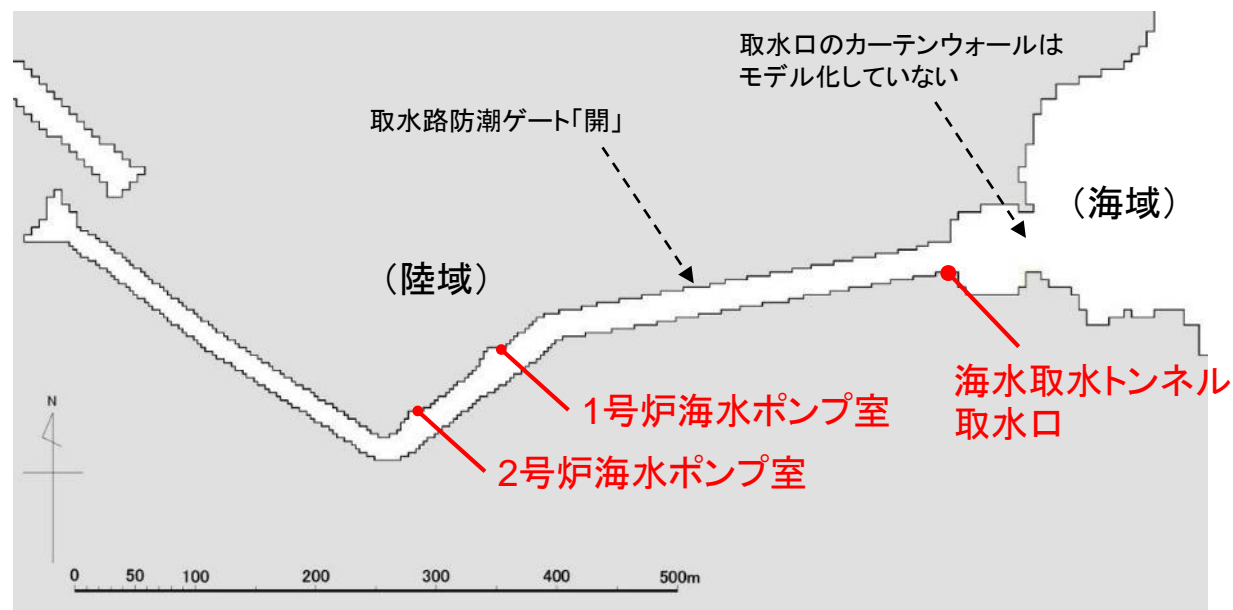
周辺のモデル化

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

評価点と周辺のモデル化(基準津波3、基準津波4)



- 基準津波3及び基準津波4の来襲時には取水路防潮ゲートを閉塞できないため、取水路内をモデル化し、全ての陸域境界で完全反射条件とする。
- 取水口のカーテンウォール、非常用海水路、海水取水トンネルはモデル化していない。
- 1号炉及び2号炉海水ポンプ室ならびに海水取水トンネル取水口を評価点とし、3,4号炉海水ポンプ室における堆積量は別途計算する。



周辺のモデル化

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

高橋(2012)に述べられている高橋他(1999)の手法の課題

4. 数値モデルの課題

高橋ら(1999)によるモデルの課題を以下に列記する。

① 現行モデルでは単一粒径の砂を仮定している。しかし、実海岸は混合砂で形成されているため、混合砂を取り扱えるモデルが必要である。高橋ら(2011)は津波による砂移動を再現するための大型実験水路を開発して、粒径ごとの水理実験を実施した。その結果、以下の値を得ており、これらを用いたモデルの拡張が期待される。

$$\alpha = \begin{cases} 5.6 & (d=0.166\text{mm}) \\ 4.0 & (d=0.267\text{mm}) \\ 2.6 & (d=0.394\text{mm}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta = \begin{cases} 7.0 \times 10^{-5} & (d=0.166\text{mm}) \\ 4.4 \times 10^{-5} & (d=0.267\text{mm}) \\ 1.6 \times 10^{-5} & (d=0.394\text{mm}) \end{cases} \quad (9)$$

・現行モデルでは、② せん断応力の計算に Manning 則(式(2)および式(3)の左辺第5項)を用いているが、全水深が小さい場合に底面でのせん断応力を過大に評価する傾向がある。特に遡上時にはこの傾向が強くなるため、津波堆積物のシミュレーションにおいてはせん断応力の計算方法を見直して、流速の鉛直分布を考慮することが必要である。

・底面でのせん断応力の増加に伴い浮遊砂層に巻き上げ砂が供給され、浮遊砂濃度が増大する。浮遊砂濃度が極めて大きくなると、乱れ強度が抑制され、浮遊砂を保持する力が減少すると考えられる。従来の河川流や波浪を対象とした場合では浮遊砂が希薄であるため問題にならないが、③ 津波の場合は巻き上げ砂が過大に見積もられる危険性がある。そのため、浮遊砂濃度の上限を便宜的に導入しているが、物理的なメカニズムを考慮した飽和浮遊砂濃度のモデル化が必要である。飽和浮遊砂濃度を水理実験で発生させることは難しいため、固液混相流に関する砂粒子レベルの数値実験が期待される。

・④ 複雑な実地形や波形勾配が大きな津波を対象とした場合、流速が時空間的に急激に変化することがあり、せん断応力の不連続性が強くなることがある。そのような流況が発生すると、現行モデルでは計算が不安定になりやすいため、計算スキームの改良が必要である。

⑤ 固定床計算領域(流水のみを計算する領域)と移動床計算領域(流水と流砂の両方を計算する領域)の境界条件が確立されていない。特に浅海域では流砂量の不連続が生じて、計算の不安定性を招きやすいため、物理的な境界条件の検討と計算スキームの改良が必要である。

高橋智幸:津波による砂移動に関する数値シミュレーションの現状と課題, 堆積学研究, 第71巻, 2号, pp.149-155, 2012

- ① 粒径依存性(高橋他(2011)において提案)
- ② Manning則による全水深が小さい場合の底面のせん断応力の過大評価(特に遡上時)
- ③ 便宜的に導入している浮遊砂濃度の上限值の物理的メカニズムを考慮したモデル化
- ④ 複雑な実地形や波形勾配が大きな津波を対象とする場合の計算の不安定性
- ⑤ 固定床計算領域と移動床計算領域の境界条件の確立

②、③では巻き上げ砂が過大に見積もられる危険性があると述べられており、便宜的に導入している浮遊砂濃度上限値については、適切に設定する必要があると考えられる。

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

砂移動モデルの検証事例

文献	実規模検証	計算使用 砂粒径	計算格子 間隔	計算手法		浮遊砂濃度上限に関する知見等
				砂移動 モデル	浮遊砂 濃度上限	
玉田他 (2009)	気仙沼湾 (チリ津波)	0.001mm ~1mm	25m 5m	高橋他 (1999)	1% 5%	・詳細格子計算の結果、浮遊砂濃度上限5%では実績値より浸食深を過大評価
藤田他 (2010)	八戸港 (チリ津波)	0.26mm	10.3m	高橋他 (1999)	1% 2% 5%	・浮遊砂濃度上限5%は過大評価 ・浮遊砂濃度上限1~2%の場合の再現性が良好
近藤他 (2012)	宮古港 (東北地方太平洋沖地震津波)	0.08mm	10m	高橋他 (1999)	1%	・全体的な土砂移動傾向は良く一致 ・最大洗掘深や断面地形も定量的に概ね良い一致
森下他 (2014)	気仙沼湾 (東北地方太平洋沖地震津波)	0.3mm	10m	高橋他 (1999)	1% 可変※1	・砂移動評価に支配的な影響を与えるパラメータとして、無次元掃流力、流砂量式係数、浮遊砂濃度上限の3つを抽出 ・上記3パラメータを同時に変えたモデルにより、再現性が向上する可能性を示唆。 ・浮遊砂濃度上限については、摩擦速度の関数とすることで再現性が向上する可能性を示唆
Sugawara他 (2014-a)	仙台平野(名取川周辺) (東北地方太平洋沖地震津波)	0.25mm	—	高橋他 (2011)	1%	・高橋他(2011)の手法による、浮遊砂濃度上限を1%とした設定で海岸付近と砂州の陸上部の浸食について、観測結果を非常によく表現
Sugawara他 (2014-b)	仙台平野 (東北地方太平洋沖地震津波)	0.166mm 0.267mm 0.394mm	最小5m	高橋他 (2011)	1% 2% 4%	・高橋他(2011)の手法により、粒径や浮遊砂濃度上限等を変えたパラメータスタディを実施し、陸上遡上域を含め、上限2%で地形変化を良好に再現
山下他 (2015)	陸前高田市(広田湾) (東北地方太平洋沖地震津波)	0.267mm	—	高橋他 (2011)	可変※2,3	・高橋他(2011)の手法を用いて、地形変化量や海域における堆積土砂の分布傾向を良好に再現 ・高橋他(1999)の手法では、砂巻上げ量が著しく過大で地形変化の再現が困難(学会口頭発表後のやりとりにて言及)
今井他 (2015)	北上川河口部 (東北地方太平洋沖地震津波)	0.166mm 0.267mm 0.394mm	最小5m	高橋他 (2011)	可変※3	・高橋他(2011)の手法を用いて、浮遊砂濃度上限を流速と水深に応じた関数で設定した解析モデルにより、地形変化を良好に再現

※1: 試行的に $C_{sat} = \alpha \times \sqrt{U^2 \times V^2}$ と規定。(C_{sat} : 飽和浮遊砂濃度, U, V : 断面平均流速(m/s), $\alpha=0.01$) ※2: 今井他(2015)と同じ関係式を用いている

※3: $C_s \approx \frac{\rho_s \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \left(\frac{h^4 W_s}{e_s n^2 u^3} - 1 \right)^{-1}$ と設定。 $\left(\begin{matrix} C_s: \text{飽和土砂濃度(kg/m}^3\text{)}, \rho_s: \text{土砂の密度(kg/m}^3\text{)}, \rho_w: \text{水の密度(kg/m}^3\text{)}, h: \text{水深(m)}, W_s: \text{土砂沈降速度(m/s)}, e_s: \text{土砂の巻上げ効率}, \\ n: \text{マンニングの粗度係数(m}^{-1/3}\text{}\cdot\text{s)}, u: \text{土砂を含む断面平均流速(m/s)} \end{matrix} \right)$

高橋他(1999)の手法に用いる浮遊砂濃度上限値

- 高橋他(1999)に関する検証事例(玉田他(2009), 藤田他(2010), 近藤他(2012))によれば、浮遊砂濃度上限は5%は明らかに過大評価となり、1%程度が妥当であると考えられる。
- 近年の研究成果によると、高橋他(2011)の手法を用いることで、平野や河口部など、より広域な砂移動に伴う地形変化の再現性が向上することが報告されている。
- 高橋他(2011)の手法は、高橋(1999)の手法で提案された流砂量式、浮遊砂層への巻き上げ量算定式の係数を実験結果に基づき高度化したもので、特にシールズ数が1を超える海域においては、高橋(1999)の手法の方が保守的な評価となる。
- 今井他(2015)により、高橋他(2011)の手法に浮遊砂濃度上限を流速と水深に応じた関係式で与えることで、良好な地形変化の再現性が得られることが示されている。この結果を踏まえると、高橋他(2011)の手法よりも著しく砂の移動量が大きい高橋他(1999)の手法に浮遊砂濃度上限を1%とした設定を用いることで、保守的な評価が得られると考えられる。

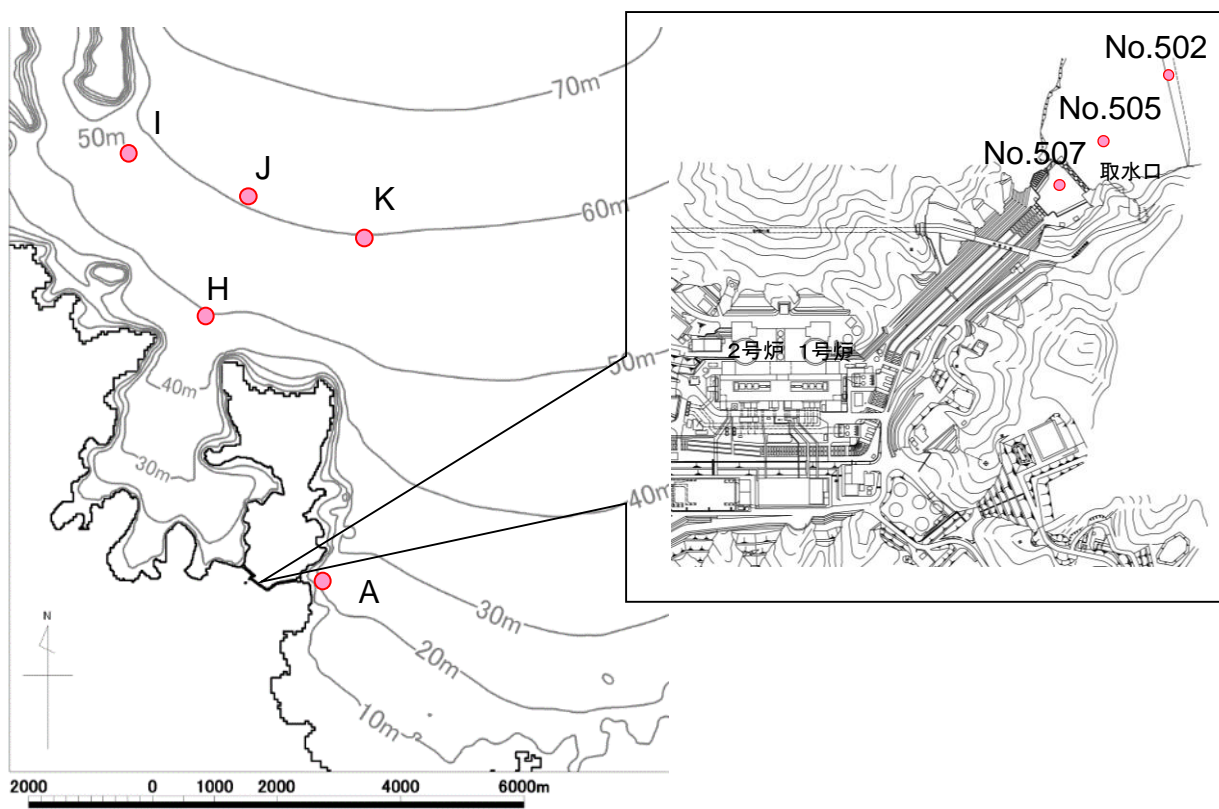


高橋他(1999)の手法に用いる浮遊砂濃度上限値は1%とする。

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

粒径、密度の設定

- 発電所建設時の海底土質調査を基に、砂の粒径、密度を設定。
- 粒径については、代表して中央粒径(D50)を用いる。
- 砂移動に寄与が大きい範囲として、海底面より1mの深さまでの調査結果を対象とする。
- 各試料の粒径、密度をデータを平均した値を用いる。



試料番号	中央粒径 (mm)	砂粒の密度 (g/cm ³)
A-1	0.163	2.684
A-2	0.079	2.692
A-3	0.164	2.666
H-1	0.136	2.622
H-2	0.042	2.714
H-3	0.046	2.755
I-1	0.082	2.698
J-1	0.032	2.732
K-1	0.131	2.654
No.502	0.120	2.669
No.505	0.220	2.679
No.507	0.190	2.671

平均

評価に用いる数値

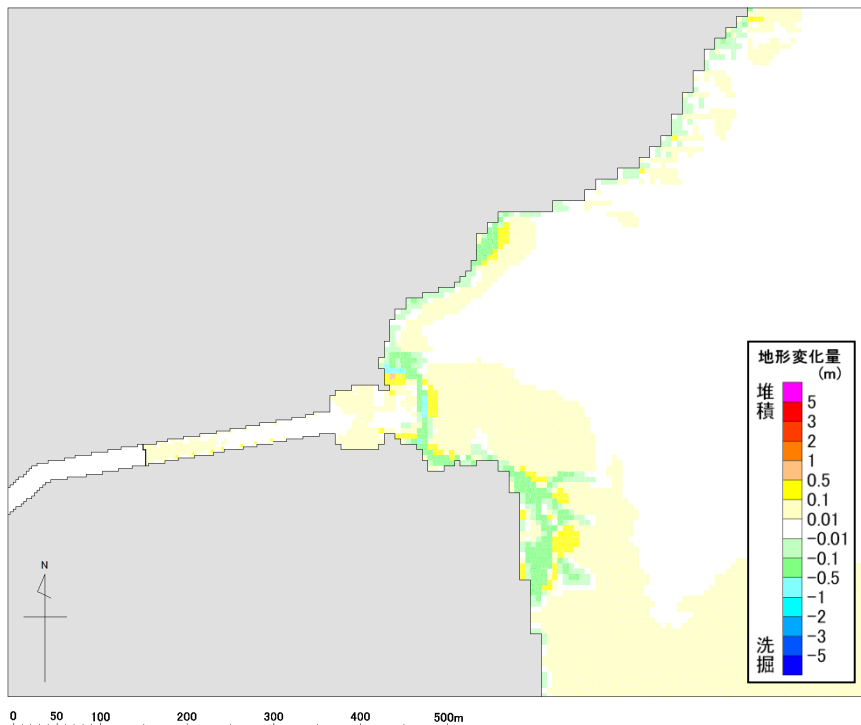
粒径 (mm)	砂粒の密度 (g/cm ³)
0.117	2.686

試料採取位置

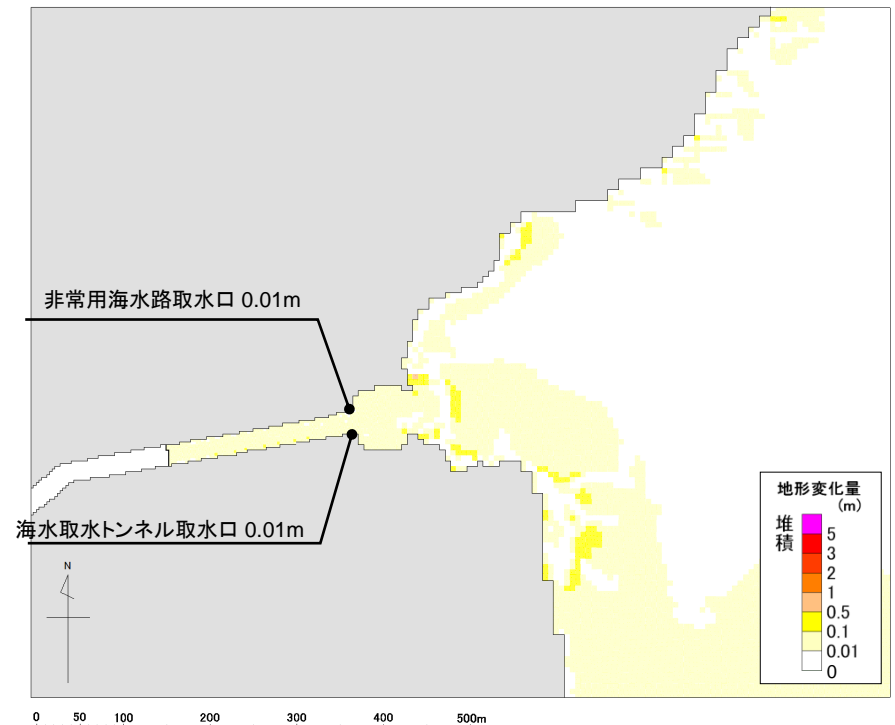
計算結果 基準津波1

波源	基準津波1: 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべり(エリアB(Kinematic; 78秒ずれ))		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

計算終了時点の地形変化量分布



計算時間中の最大堆積厚分布

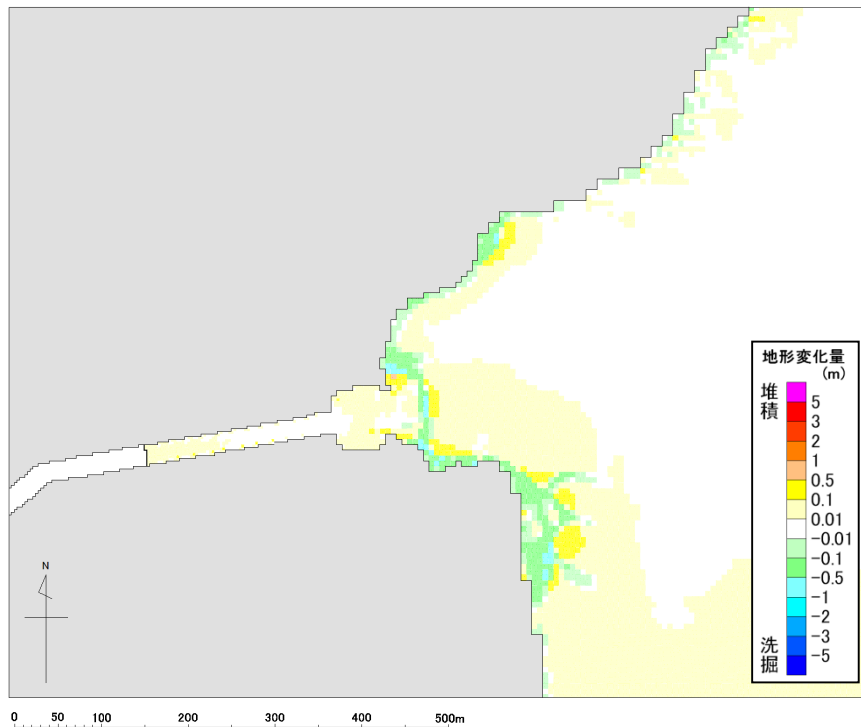


評価点付近における堆積は、0.01m程度である

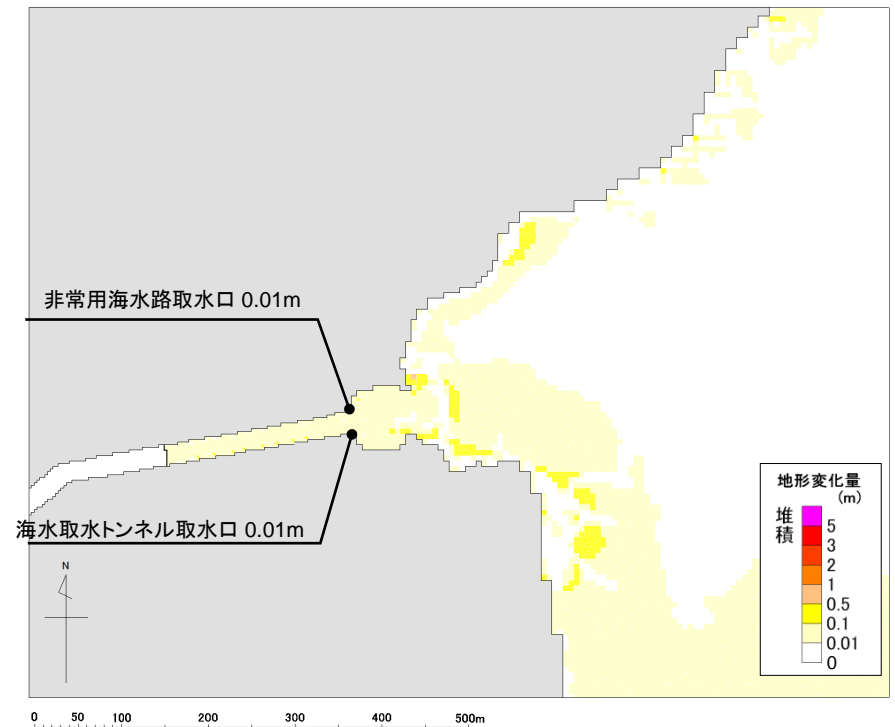
計算結果 基準津波1

波源	基準津波1: 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべり(エリアB(Kinematic; 78秒ずれ))		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	5%

計算終了時点の地形変化量分布



計算時間中の最大堆積厚分布



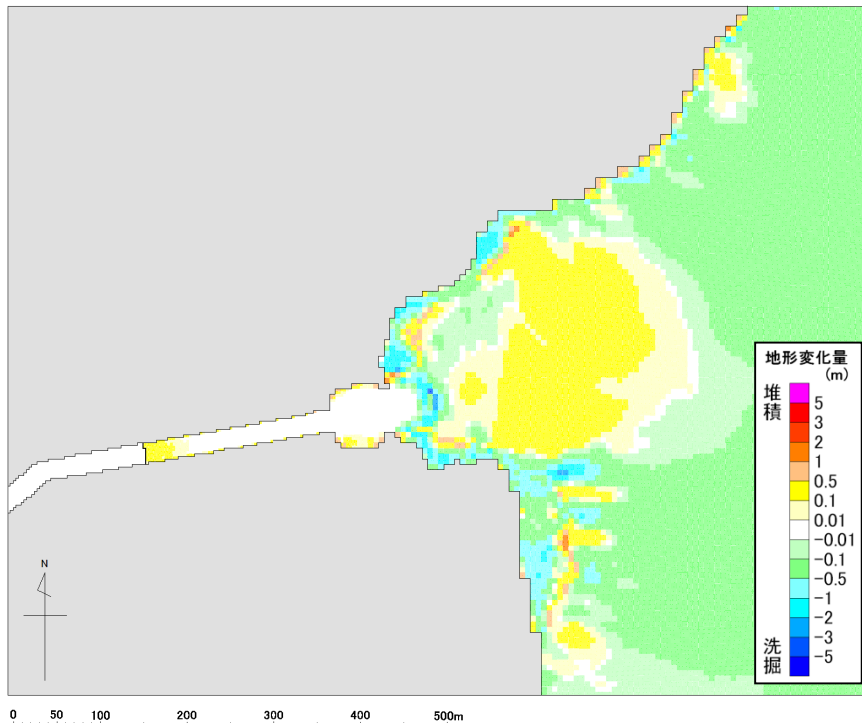
評価点付近における堆積は、0.01m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

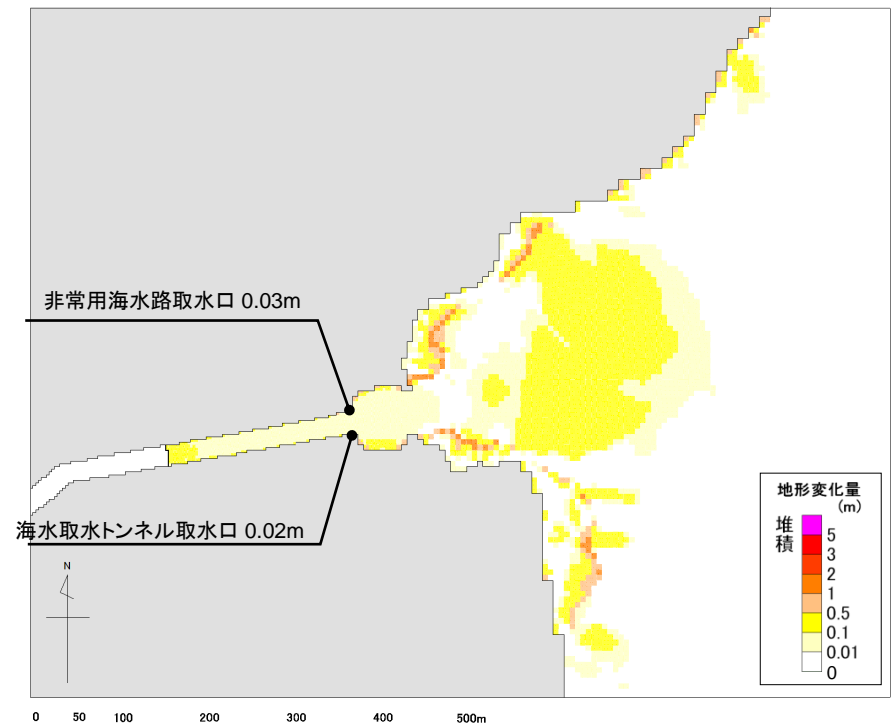
計算結果 基準津波1

波源	基準津波1: 若狭海丘列付近断層と隠岐トラフ海底地すべり(エリアB(Kinematic; 78秒ずれ))		
砂移動モデル	高橋他(1999)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

計算終了時点の地形変化量分布



計算時間中の最大堆積厚分布



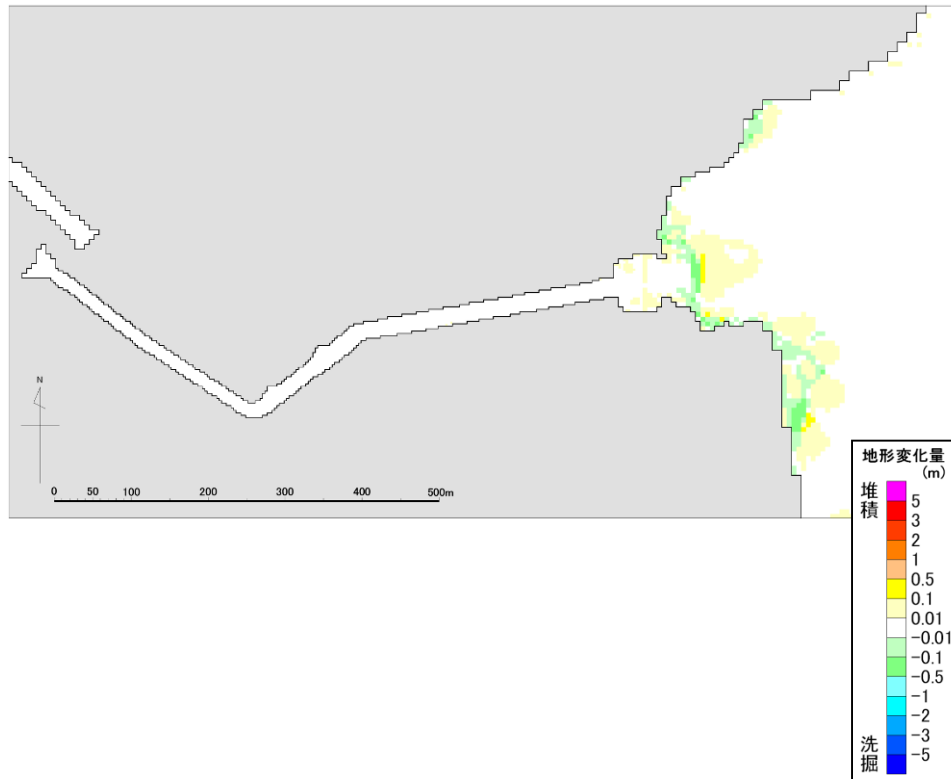
評価点付近における堆積は、最大で0.03m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

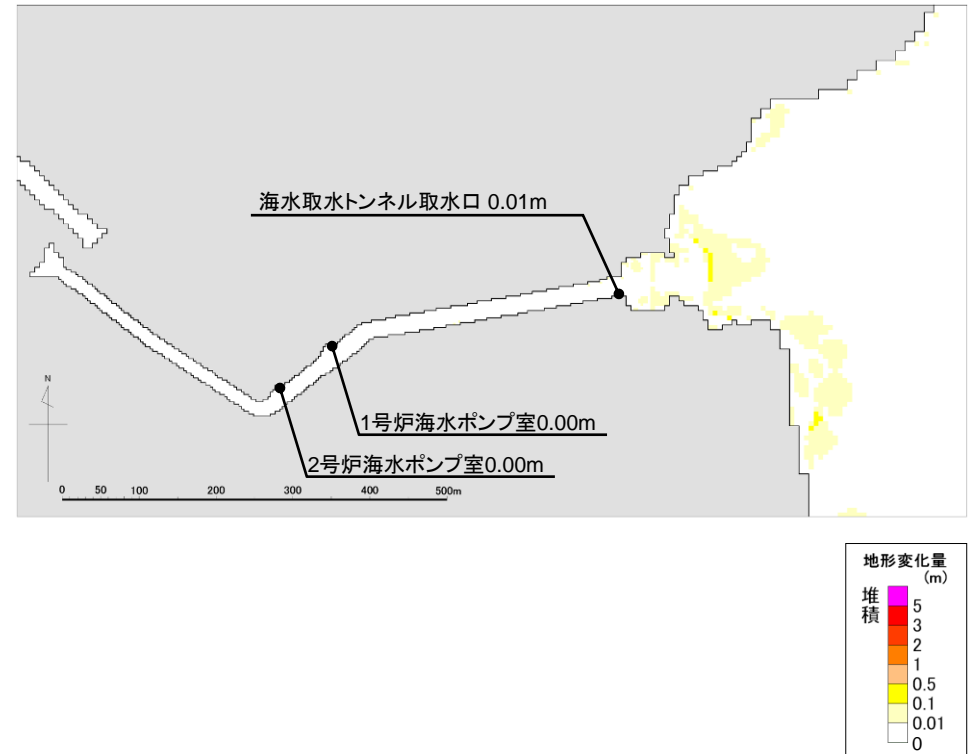
計算結果 基準津波2

波源	基準津波2:FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.14(運動学的手法;54秒ずれ))		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

計算終了時点の地形変化量分布



計算時間中の最大堆積厚分布



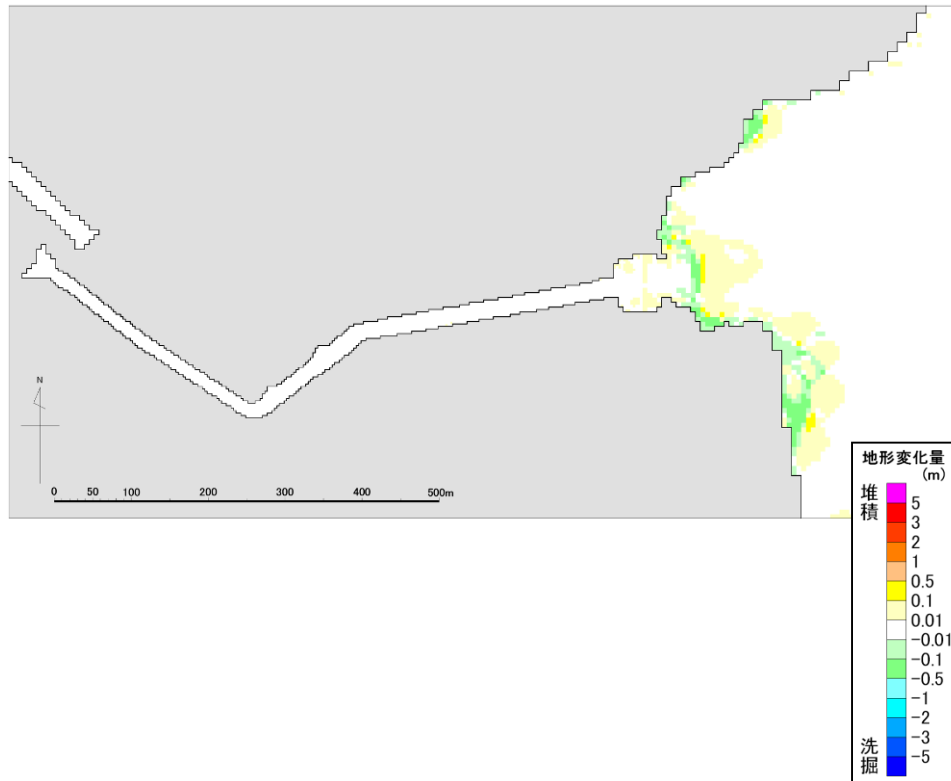
評価点付近における堆積は、最大で0.01m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

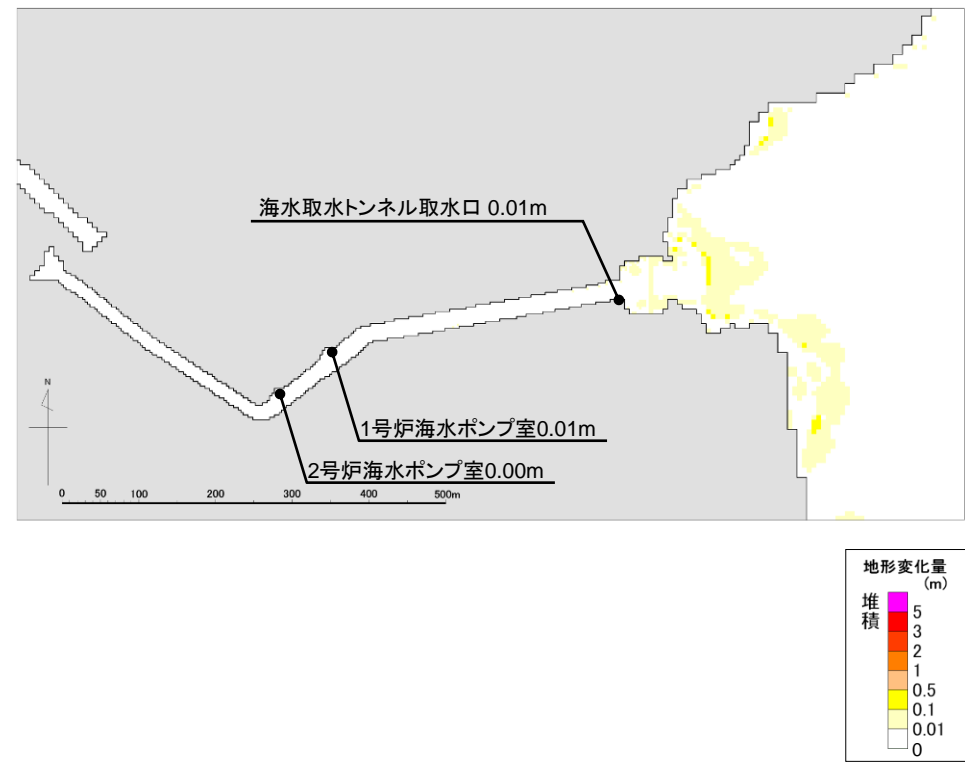
計算結果 基準津波2

波源	基準津波2:FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.14(運動学的手法;54秒ずれ))		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	5%

計算終了時点の地形変化量分布



計算時間中の最大堆積厚分布



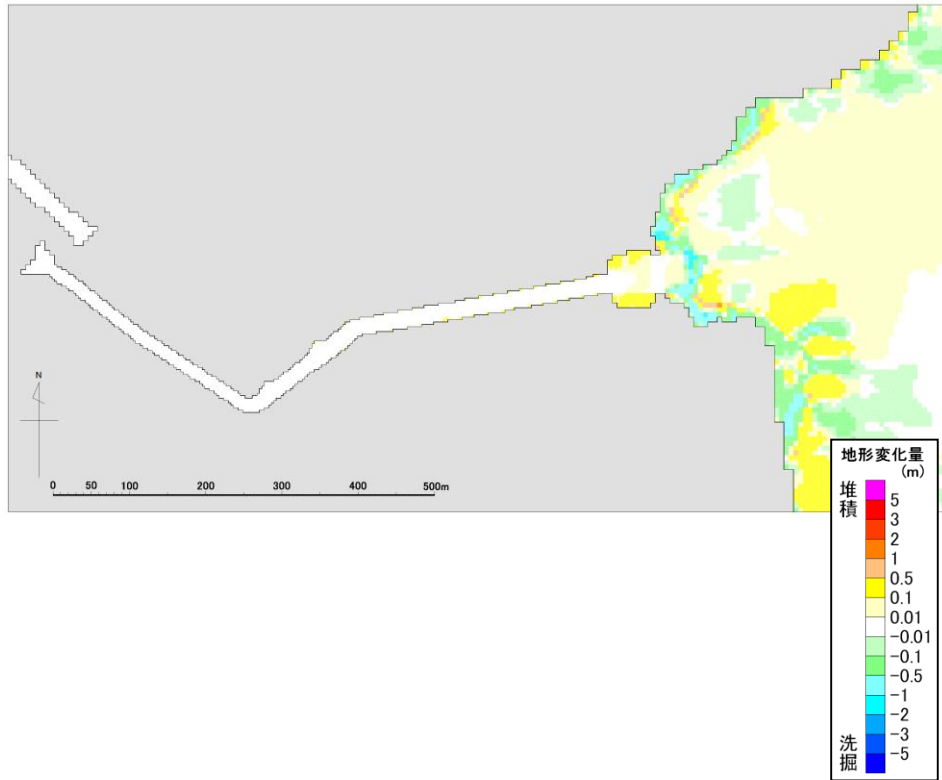
評価点付近における堆積は、最大で0.01m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

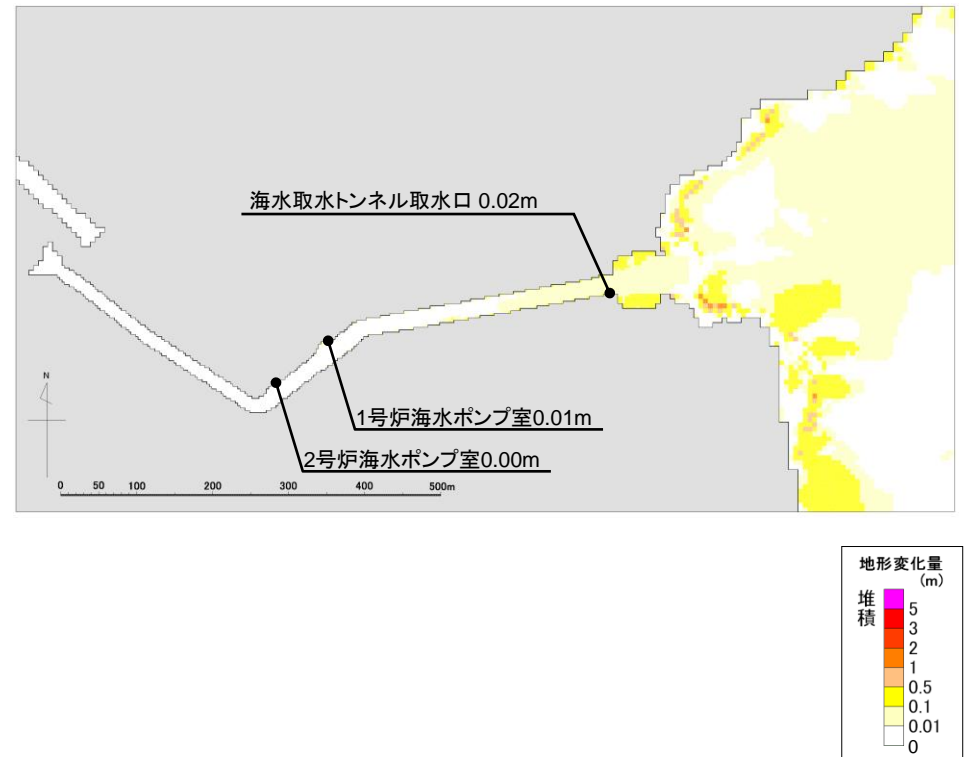
計算結果 基準津波2

波源	基準津波2:FO-A~FO-B~熊川断層と陸上地すべり(No.14(運動学的手法;54秒ずれ))		
砂移動モデル	高橋他(1999)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

計算終了時点の地形変化量分布



計算時間中の最大堆積厚分布

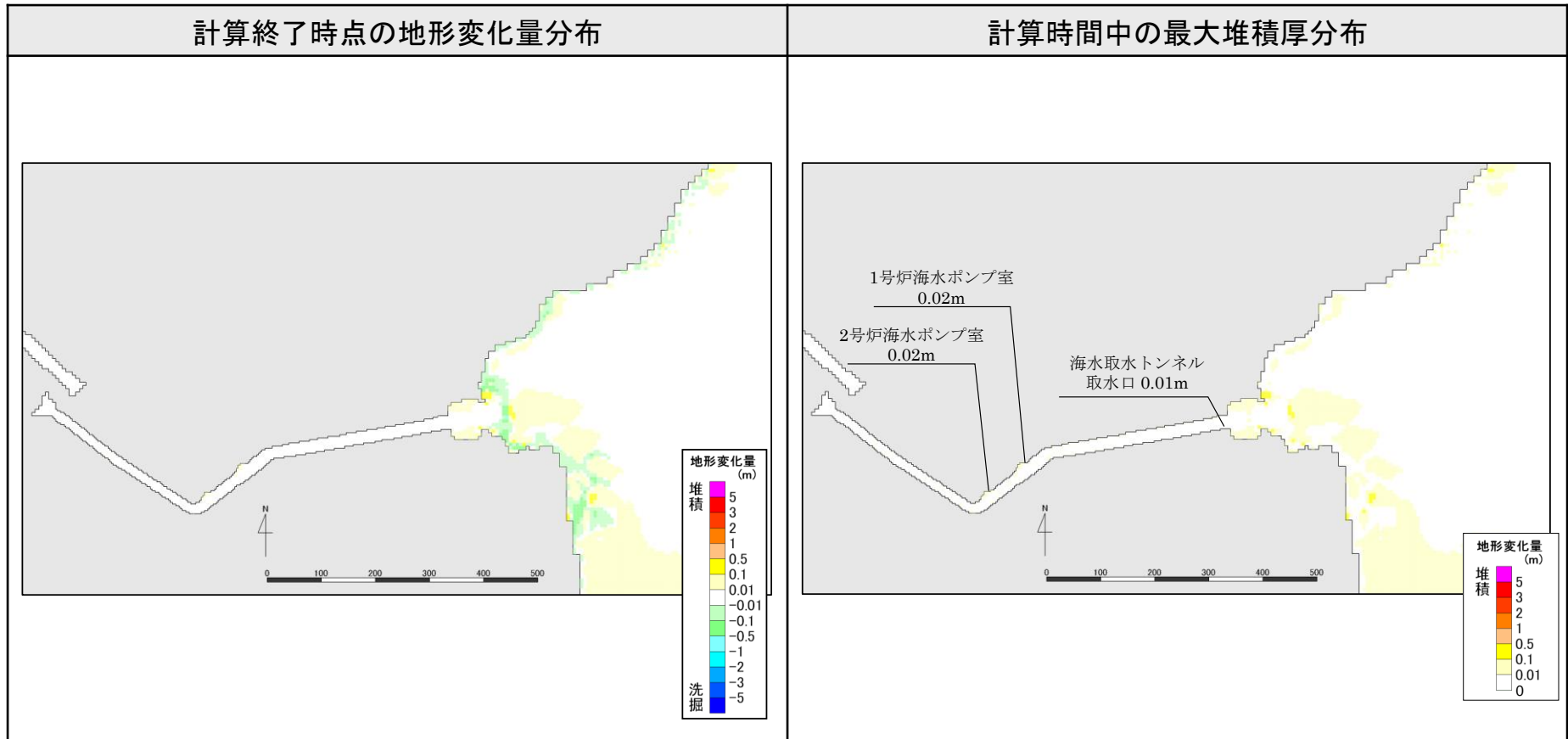


評価点付近における堆積は、最大で0.02m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算結果 基準津波3

波源	基準津波3:海底地すべり(エリアB)		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

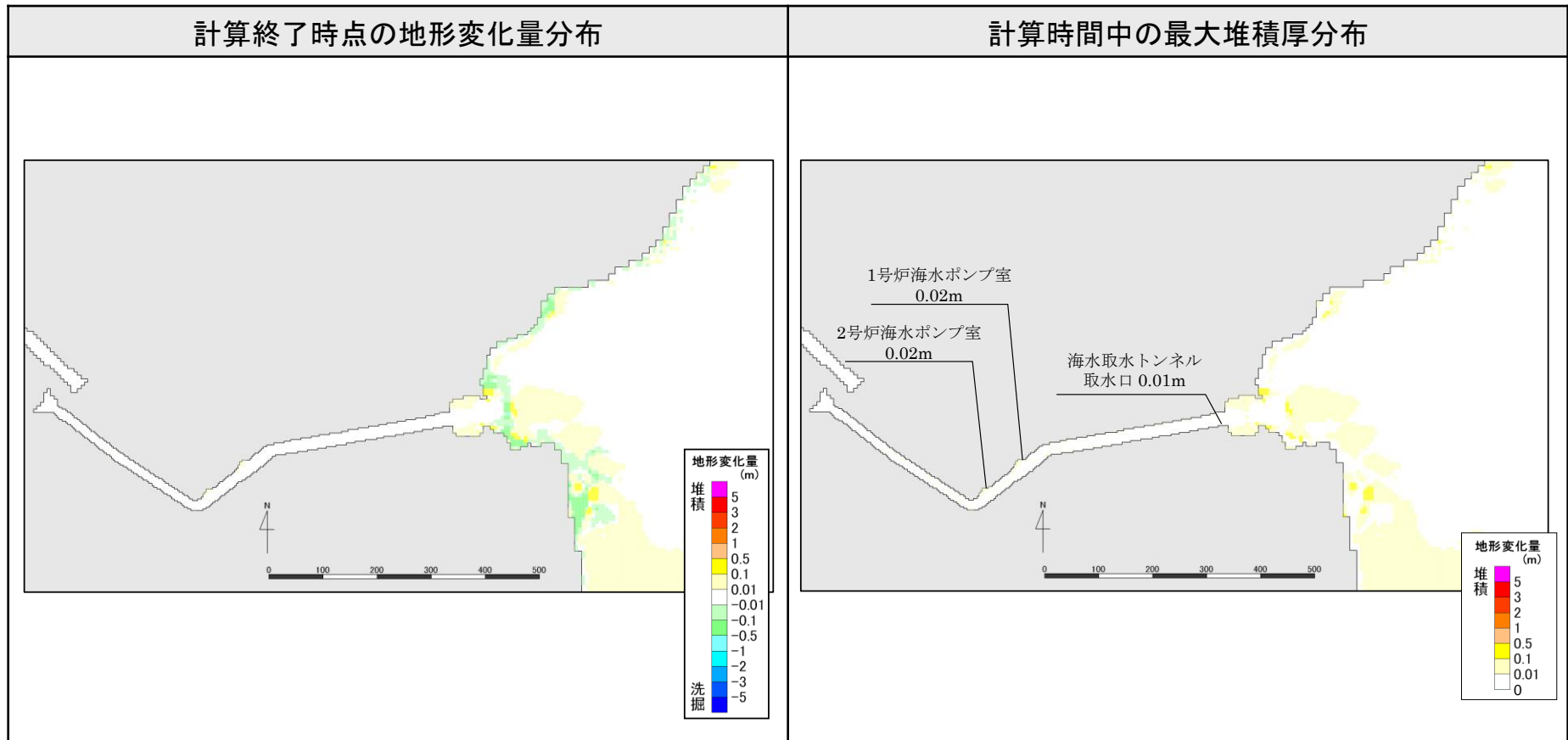


評価点付近における堆積は、最大で0.02m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算結果 基準津波3

波源	基準津波3:海底地すべり(エリアB)		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	5%

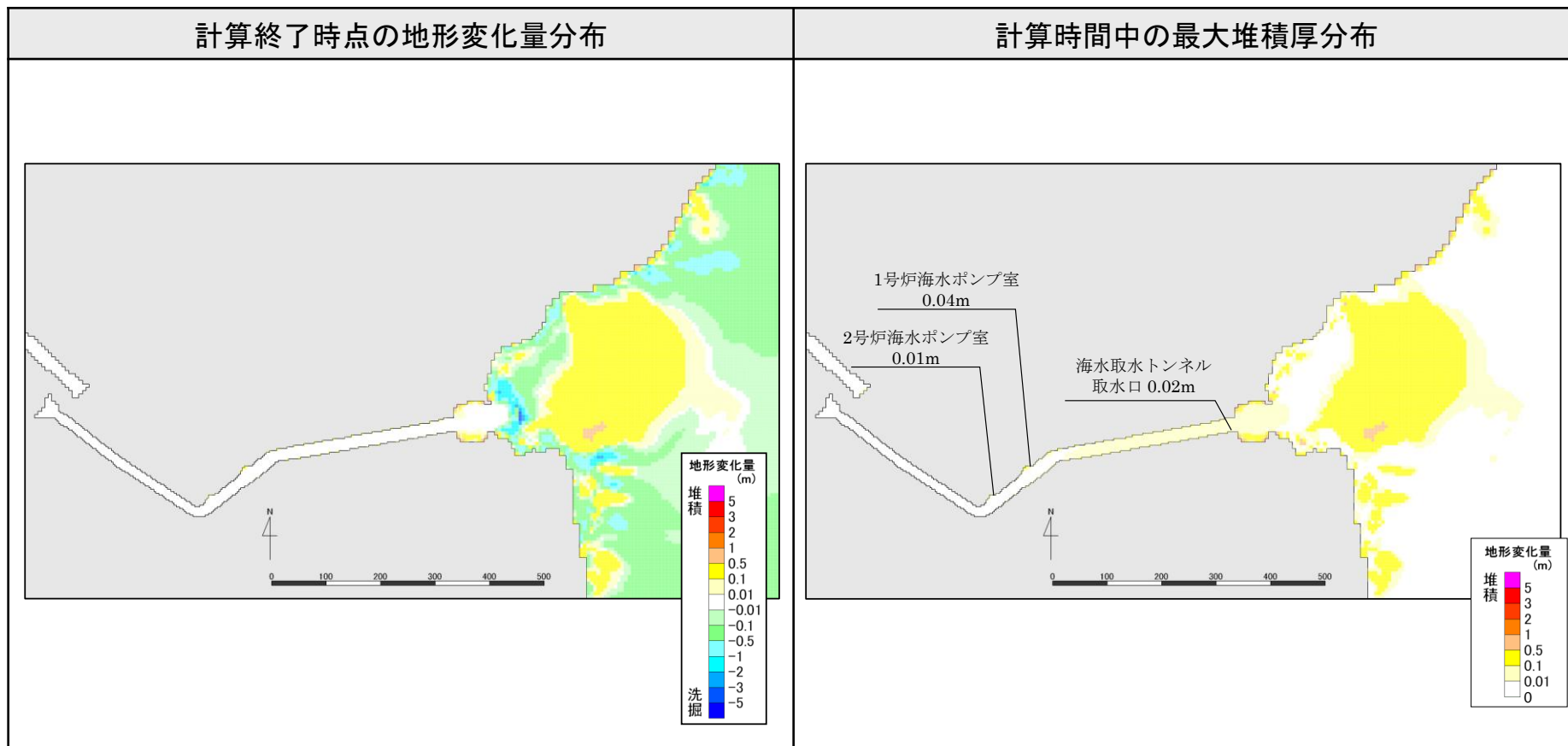


評価点付近における堆積は、最大で0.02m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算結果 基準津波3

波源	基準津波3:海底地すべり(エリアB)		
砂移動モデル	高橋他(1999)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

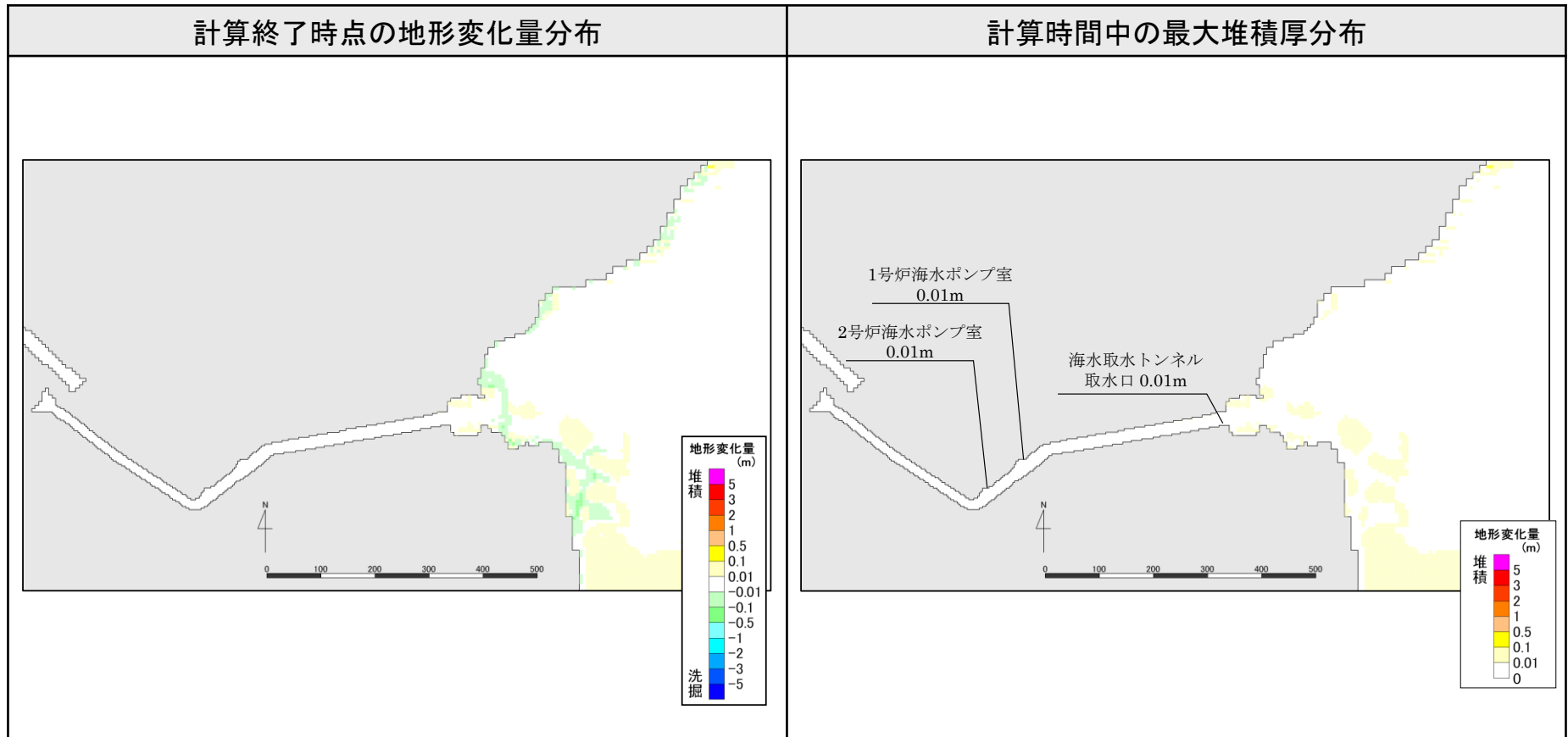


評価点付近における堆積は、最大で0.04m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算結果 基準津波4

波源	基準津波4:海底地すべり(エリアC)		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

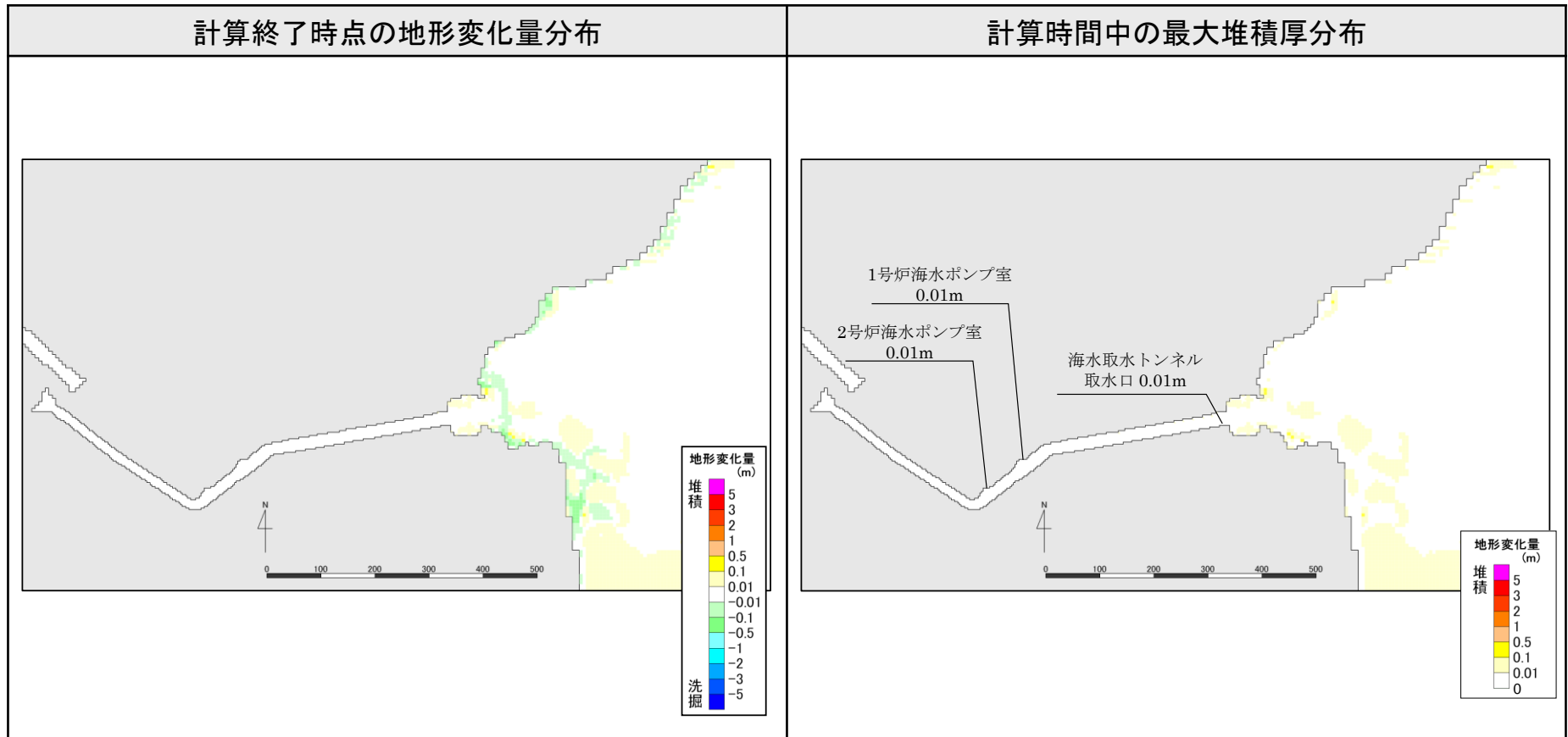


評価点付近における堆積は、最大で0.01m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算結果 基準津波4

波源	基準津波4:海底地すべり(エリアC)		
砂移動モデル	藤井他(1998)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	5%

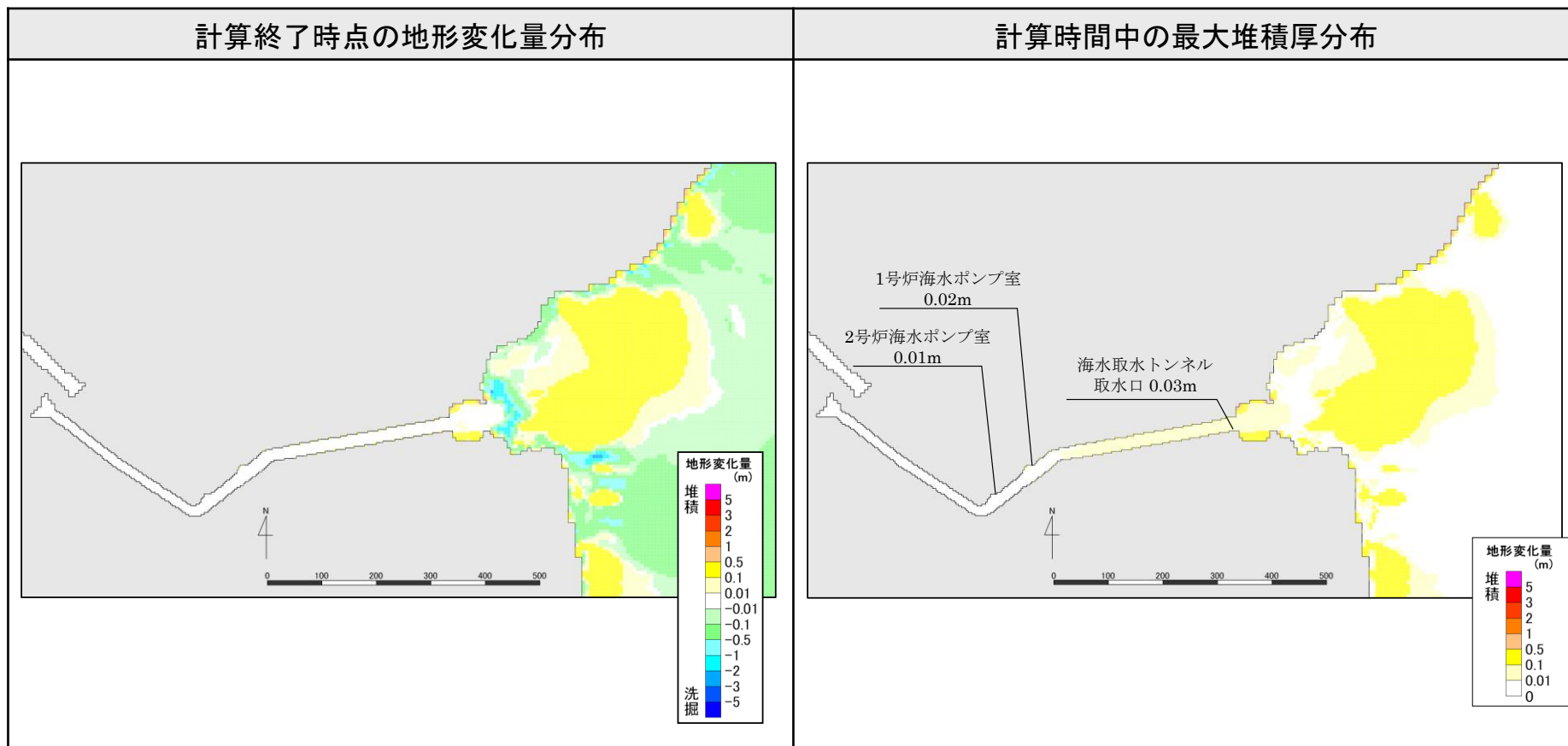


評価点付近における堆積は、最大で0.01m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算結果 基準津波4

波源	基準津波4:海底地すべり(エリアC)		
砂移動モデル	高橋他(1999)の手法	浮遊砂体積濃度上限値	1%

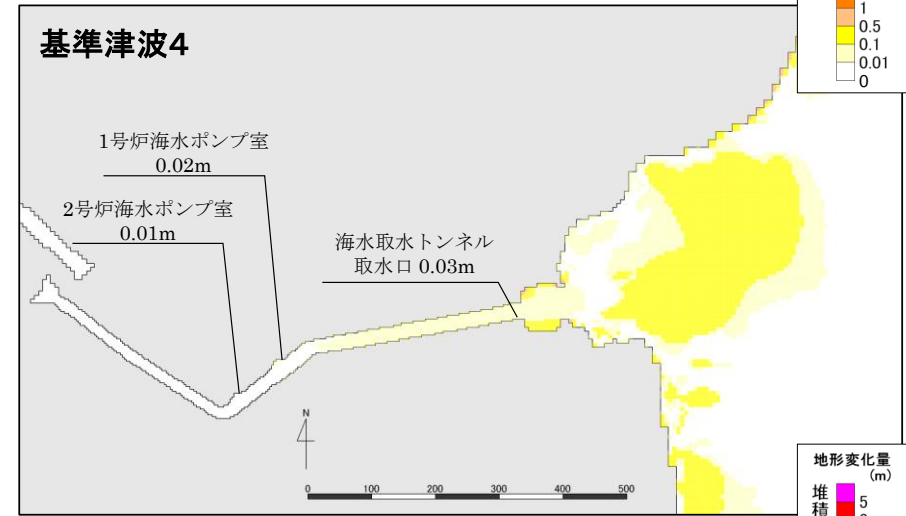
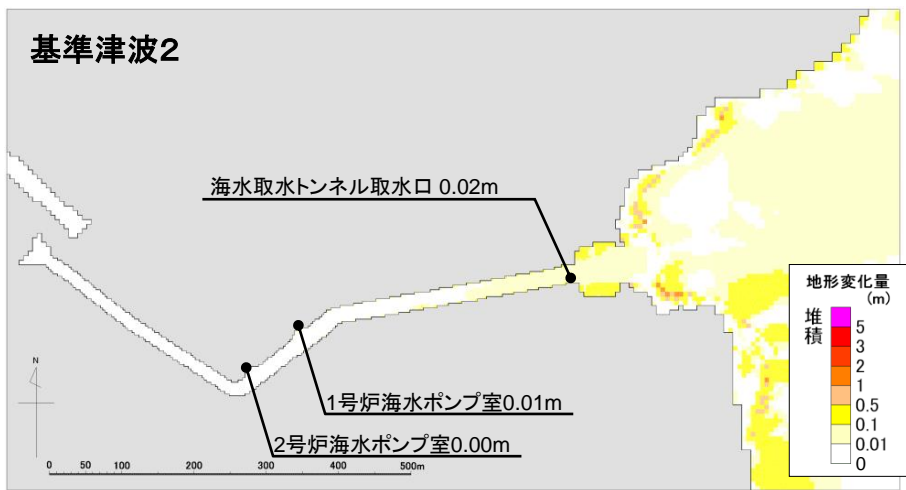
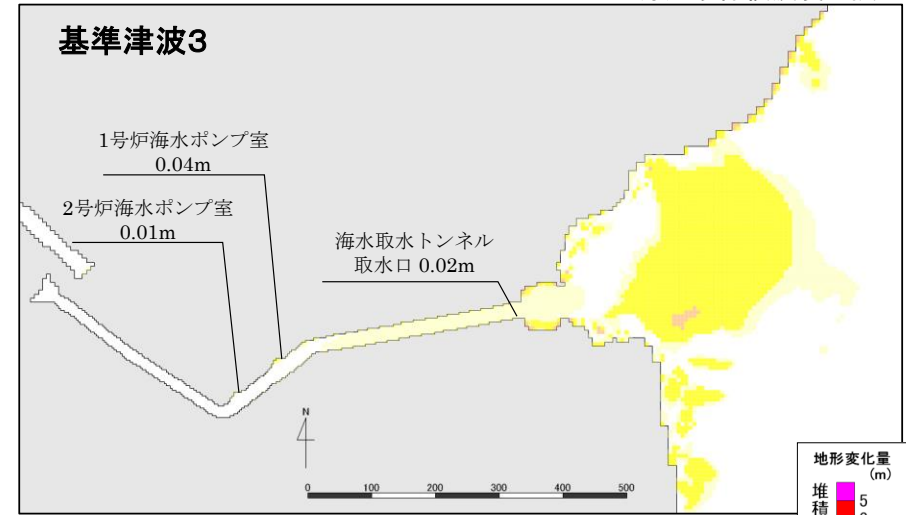
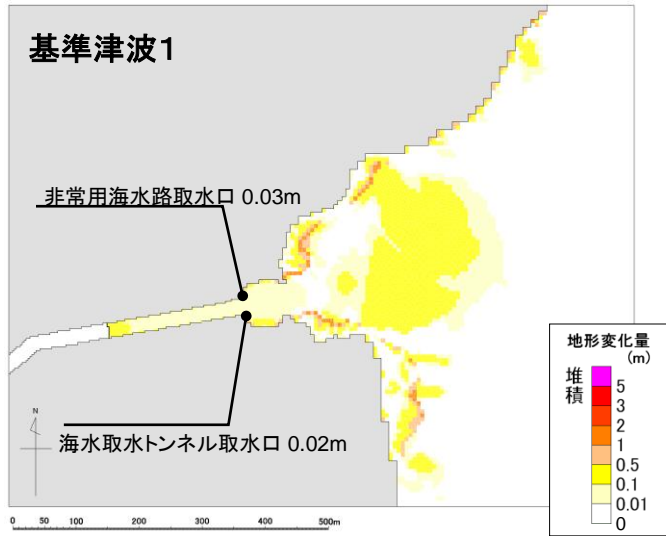


評価点付近における堆積は、最大で0.03m程度である

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

計算結果(まとめ)

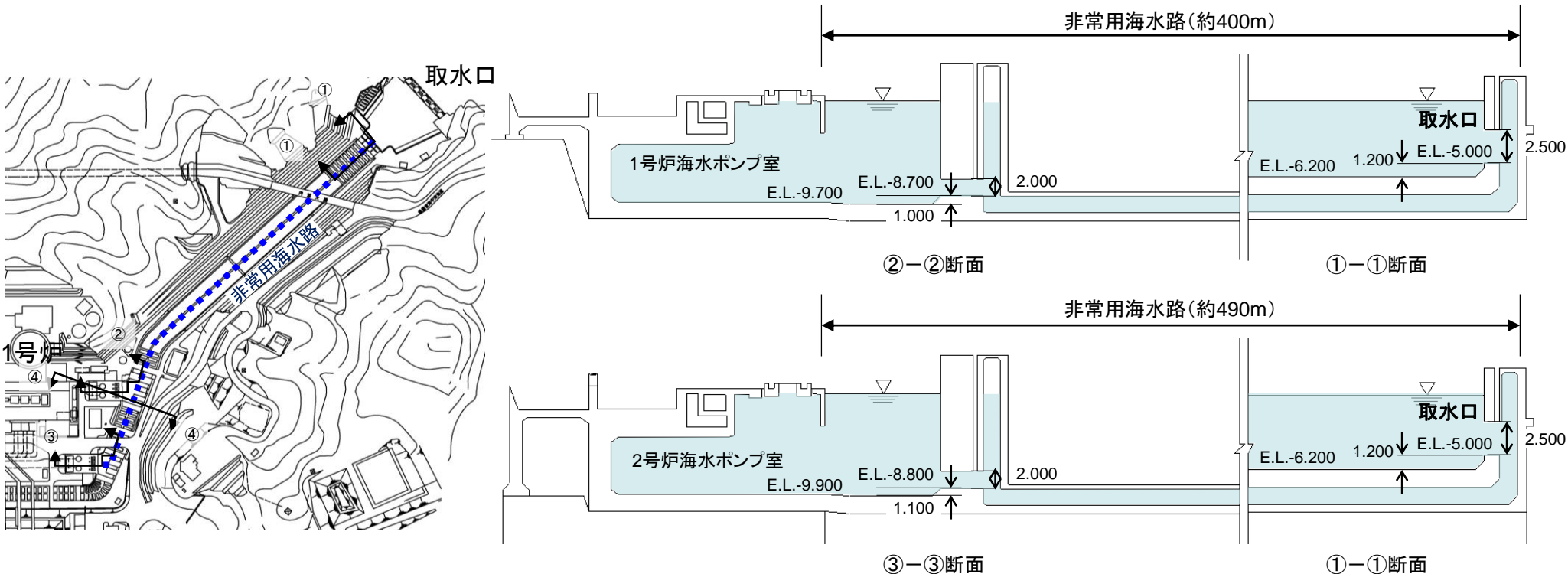
砂移動モデル: 高橋他(1999)の手法
浮遊砂体積濃度上限: 1%



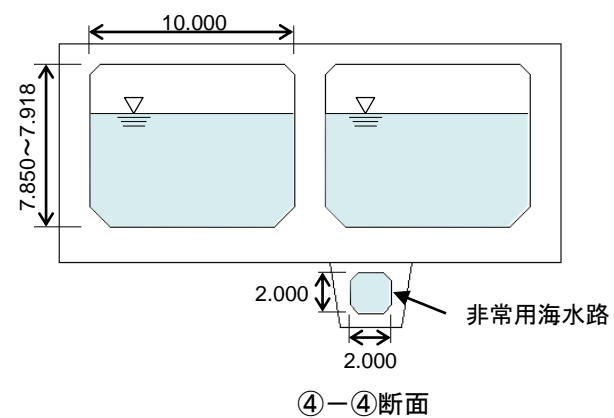
- 基準津波1～4における評価点付近の最大堆積厚は0.02～0.04m程度であり、通水に影響がないことを確認した。
- 基準津波1については各海水ポンプ室、基準津波2～4については3,4号炉海水ポンプ室における堆積厚を別途評価する。

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

非常用海水路の構造

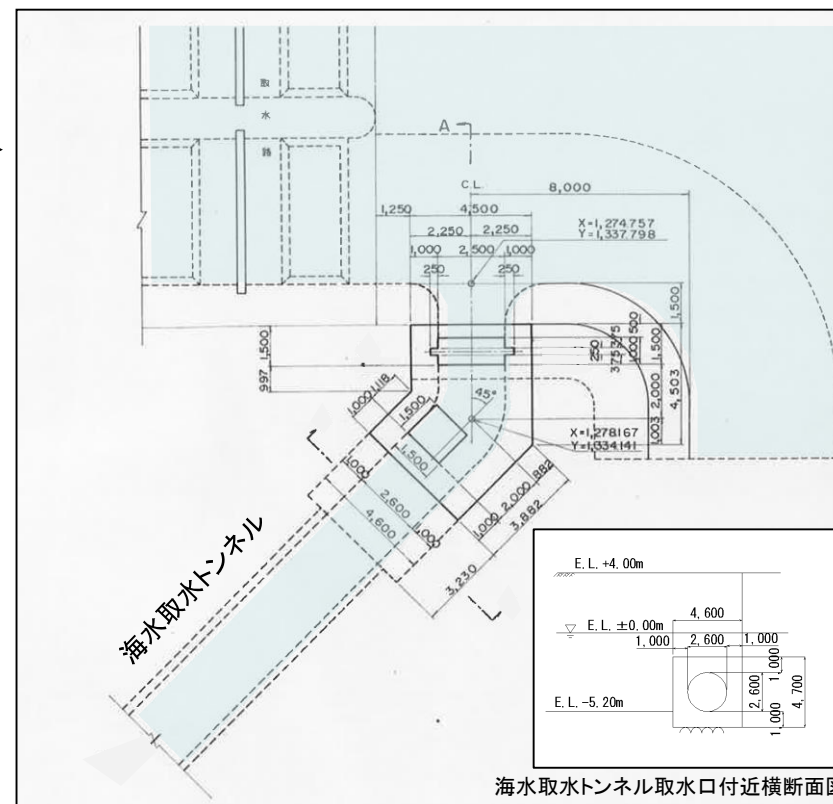
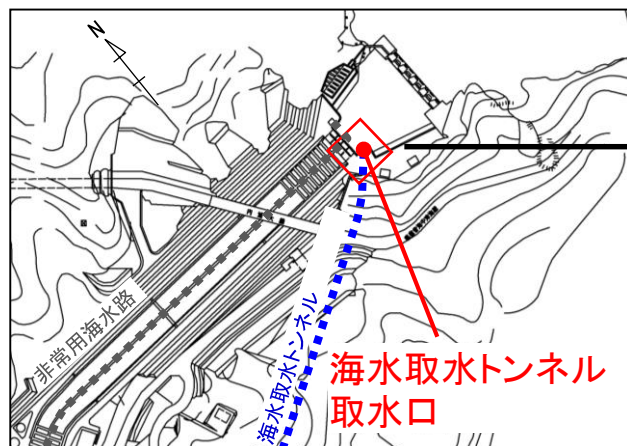


- 基準津波1来襲時の1号炉及び2号炉海水ポンプの取水経路となる、非常用海水路の構造を示す。
- 非常用海水路の取水口は、底版から1.2m高い位置に設置され、取水口の開口部は2.5mであり、0.03m程度の砂の堆積があっても通水に影響はない。
- 大部分は1号炉及び2号炉共通の設備となっているが、途中1号炉海水ポンプ室付近で分岐し、1号炉及び2号炉それぞれの海水ポンプ室前までつながっている。



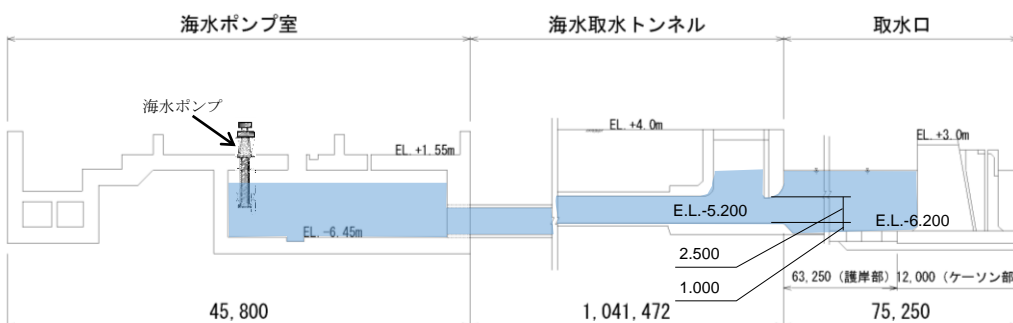
8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

海水取水トンネルの構造



海水取水トンネル取水口付近横断面図

海水取水トンネル取水口付近平面図



取水設備概念図

- 基準津波来襲時の3,4号炉海水ポンプの取水経路となる、海水取水トンネルの構造を示す。
- 海水取水トンネル取水口は、底版から1.0m高い位置に設置され、取水口の開口部は2.5mであり、最大で0.03m程度の砂の堆積があっても通水に影響はない。
- 3,4号炉共通の設備となっている。

各評価地点における砂の堆積厚

対象津波波源	砂移動モデル	浮遊砂体積濃度上限値	各評価点における最大堆積厚				
			非常用海水路取水口	海水取水トンネル取水口	1号炉海水ポンプ室	2号炉海水ポンプ室	3,4号炉海水ポンプ室
<基準津波1> 若狭海丘列付近断層と 隠岐トラフ海底地すべり(エリアB)	藤井他(1998)	1%	0.01m	0.01m	—	—	—
		5%	0.01m	0.01m	—	—	—
	高橋他(1999)	1%	0.03m	0.02m	—	—	—
<基準津波2> FO-A~FO-B~熊川断層と 陸上地すべり(No.14)	藤井他(1998)	1%	—	0.01m	0.00m	0.00m	—
		5%	—	0.01m	0.01m	0.00m	—
	高橋他(1999)	1%	—	0.02m	0.01m	0.00m	—
<基準津波3> 海底地すべり(エリアB)	藤井他(1998)	1%	—	0.01m	0.02m	0.02m	—
		5%	—	0.01m	0.02m	0.02m	—
	高橋他(1999)	1%	—	0.02m	0.04m	0.01m	—
<基準津波4> 海底地すべり(エリアC)	藤井他(1998)	1%	—	0.01m	0.01m	0.01m	—
		5%	—	0.01m	0.01m	0.01m	—
	高橋他(1999)	1%	—	0.03m	0.02m	0.01m	—

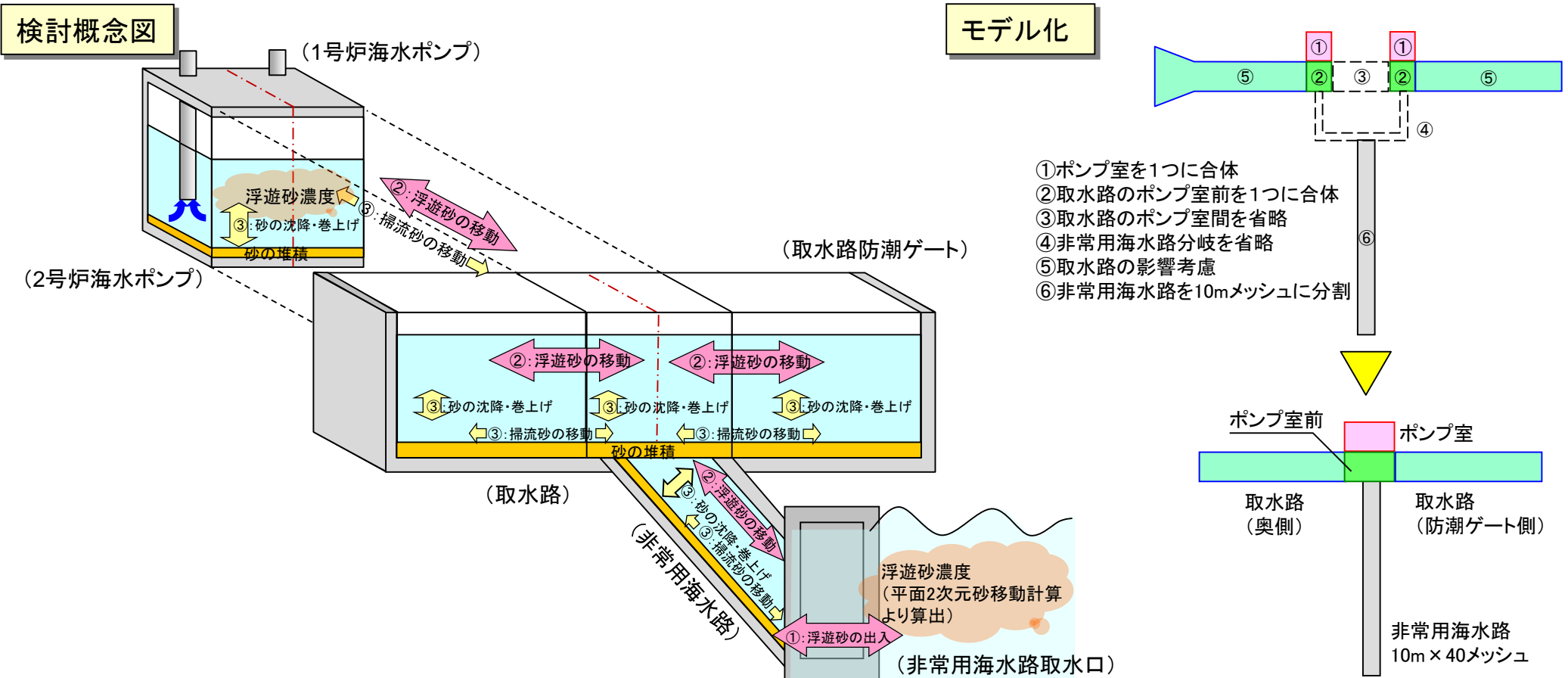
- 非常用海水路取水口及び海水取水トンネル取水口における最大堆積厚は、最大でも0.03m程度であり、通水に影響はない。
- 基準津波2~4については、1号炉海水ポンプ室及び2号炉海水ポンプ室における最大堆積厚は、最大でも0.04m程度であり、ポンプ取水への影響はない。
- 基準津波1の各海水ポンプ室及び基準津波2~4の3,4号炉海水ポンプ室については、非常用海水路及び海水取水トンネル以降について別途1次元でモデル化し、非常用開水路取水口及び海水取水トンネル取水口において堆積厚の大きい高橋他(1999)の手法による結果を用いて、堆積厚を算出する。

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

1号炉及び2号炉海水ポンプ室における砂の堆積厚・浮遊砂濃度の検討方法(基準津波1)

基準津波1に伴う海水ポンプ室における砂の堆積厚を評価するため、非常用海水路、取水路、1号炉及び2号炉海水ポンプ室を1次元的にモデル化し、非常用海水路内及び1号炉及び2号炉海水ポンプ室内での砂の移動を計算する。

- ①非常用海水路取水口の浮遊砂濃度(平面2次元砂移動計算より算出)と、非常用海水路の流量(津波水位計算より算出)を乗じて、非常用海水路取水口から流入する砂の量を算出する。海水路の流量の方向に応じて砂の流出も考慮する。
- ②非常用海水路内の各メッシュの浮遊砂濃度に、非常用海水路の流量(津波水位計算より算出)を乗じて、非常用海水路内を移動する浮遊砂量を算出する。取水路、1号炉及び2号炉海水ポンプ室も同様に、津波水位計算より算出した流量を用いて移動する浮遊砂量を算出する。
- ③非常用海水路、1号炉及び2号炉海水ポンプ室、取水路の各メッシュにおいて、砂の巻上げ・沈降、掃流砂の移動を考慮する。掃流砂量、巻上げ砂量の算定には高橋他(1999)により提案されている式を用いる。また、非常用海水路の粗度係数は $n=0.02$ とする。

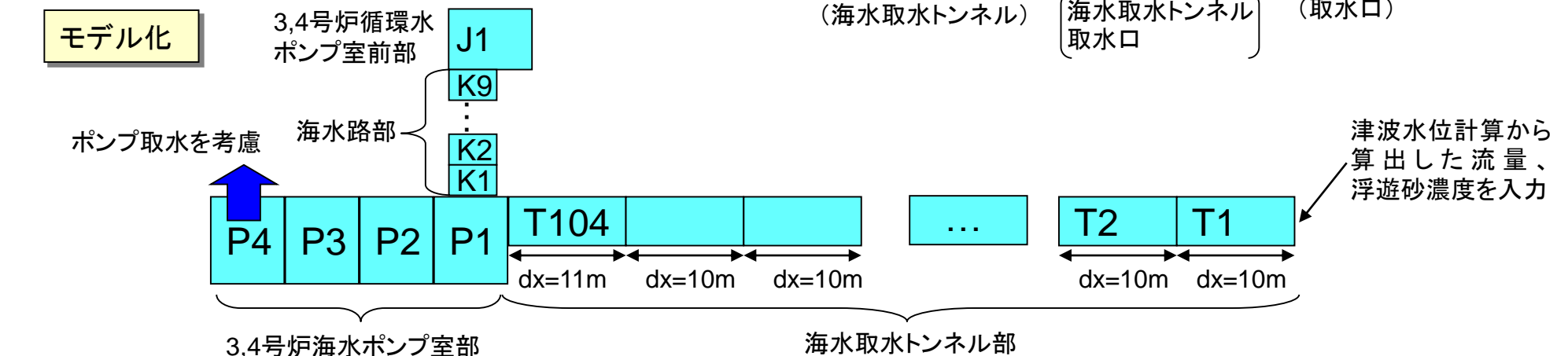
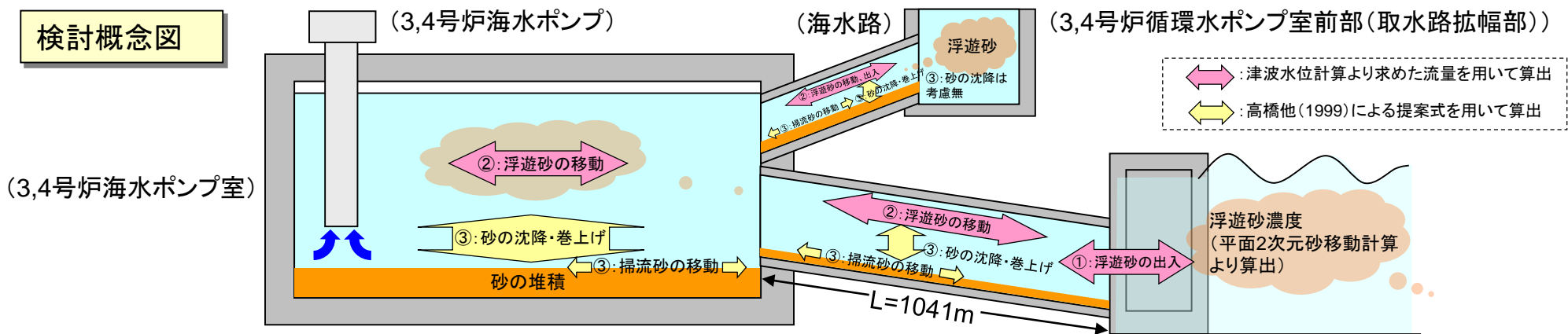


8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

3,4号炉海水ポンプ室における砂の堆積厚の検討方法(基準津波1~4)

基準津波による海水ポンプ室内の砂の堆積厚を評価するため、海水取水トンネル、3,4号炉海水ポンプ室、海水路、3,4号炉循環水ポンプ室前部(取水路拡幅部)のみを1次元的にモデル化し、海水取水トンネル内および3,4号炉海水ポンプ室内での砂の移動を計算する。

- ①海水取水トンネル取水口の浮遊砂濃度(平面2次元砂移動計算より算出)と、海水取水トンネルの流量(津波水位計算より算出)を乗じて、海水取水トンネル取水口から流入する砂の量を算出する。海水取水トンネルの流量の方向に応じて砂の流出も考慮する。
- ②海水取水トンネル内の各メッシュの浮遊砂濃度に、海水取水トンネルの流量(津波水位計算より算出)を乗じて、海水取水トンネル内を移動する浮遊砂量を算出する。海水路、3,4号炉海水ポンプ室内も同様に、津波水位計算より算出した海水取水トンネルの流量を用いて移動する浮遊砂量を算出する。
- ③海水取水トンネル、3,4号炉海水ポンプ室、海水路の各メッシュにおいて、砂の巻上げ・沈降、掃流砂の移動を考慮する。掃流砂量、巻上げ砂量の算定には高橋他(1999)により提案されている式を用いる。循環水ポンプ室前部では砂の巻上げ・沈降は考慮しない。また、海水取水トンネルの粗度係数は $n=0.02$ とする。

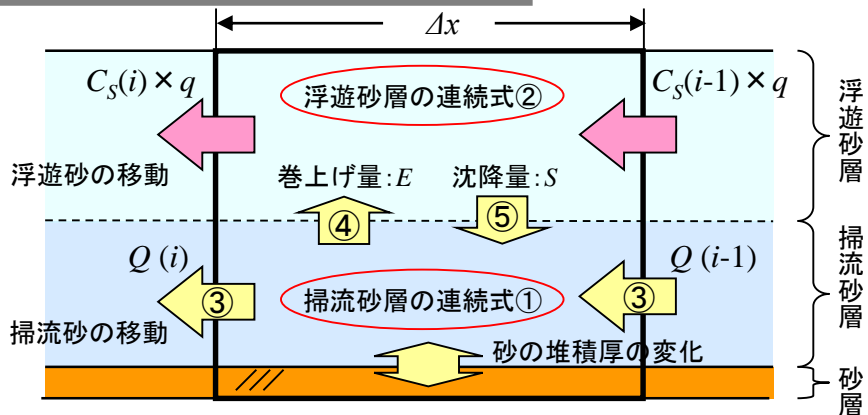


8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

海水ポンプ室における砂の堆積厚・浮遊砂濃度の検討方法

モデル化した取水路、海水取水トンネル、非常用海水路、海水路、各海水ポンプ室において、高橋他(1999)の手法を参考に、浮遊砂層、掃流砂層を考慮し、浮遊砂の移動、砂の巻き上げ・沈降、掃流砂の移動、砂の堆積を以下のように計算する。

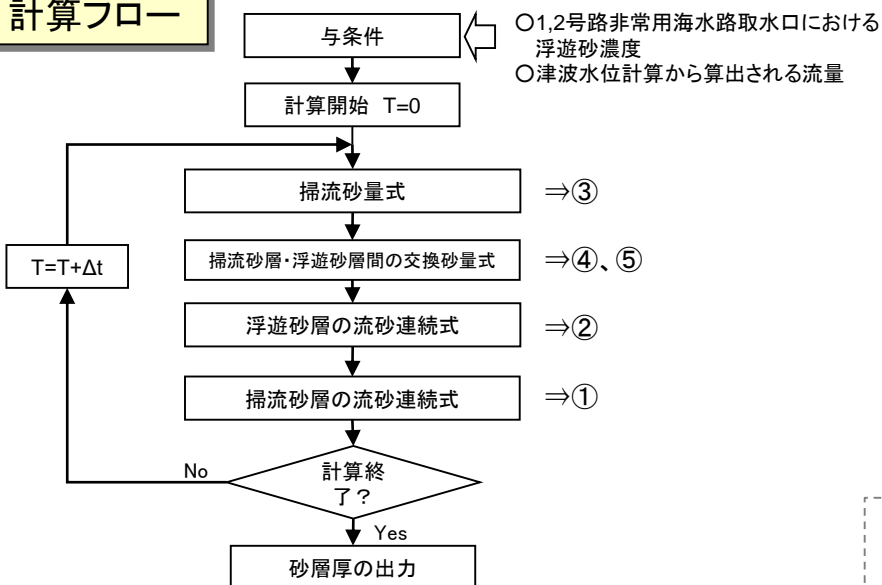
メッシュ*i*における砂移動概念図



計算式

項目	計算式	備考
① 掃流砂層の流砂連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{Q(i)-Q(i-1)}{\Delta x} + \frac{E-S}{\sigma} \right\} = 0$	高橋他(1999)を参考に掃流層の砂収支を計算
② 浮遊砂層の流砂連続式	$\frac{\partial(C_s h)}{\partial t} + \left\{ \frac{C_s(i)-C_s(i-1)}{\Delta x} \times q - \frac{E-S}{\sigma} \right\} = 0$	高橋他(1999)を参考に浮遊砂層の砂収支を計算
③ 掃流砂量式	$Q = 21\tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋他(1999)の実験式
④ 浮遊砂層への巻き上げ量算定式	$E = 0.012\tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$	高橋他(1999)の実験式
⑤ 沈降量の算定式	$S = wC_s \cdot \sigma$	高橋他(1999)による

計算フロー

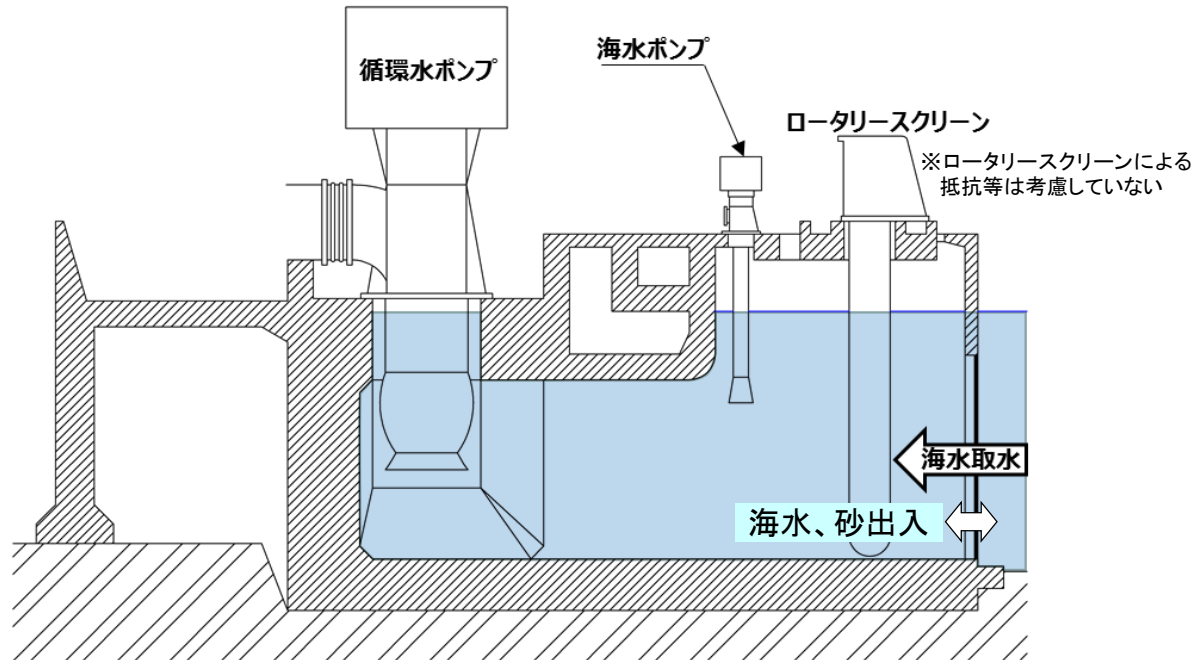


Z : 砂層厚変化量 (m) t : 時間 (s) Q : 単位幅、単位時間当たりの掃流砂量 ($m^3/s/m$)
 τ_* : シールズ数 σ : 砂粒の密度 (g/cm^3) ρ : 海水の密度 (g/cm^3) $s := \sigma/\rho - 1$
 λ : 空隙率 (=0.4, 高橋他(1992)より) g : 重力加速度 (m/s^2) d : 砂の粒径 (mm)
 w : 土粒子の沈降速度 (Rubey式より算出) (m/s)
 q : 海水路、3,4号炉海水ポンプ室の流量 (単位幅あたり) (m^3/s) (津波水位計算より算出)
 h : 水深 (m) C_s : 浮遊砂体積濃度 (浮遊砂層の連続式より算出) (kg/m^3)

・ 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1992): 土砂移動を伴う津波計算法の開発, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.231-235.
 ・ 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999): 掃流砂層・浮遊層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.606-610.

1号炉及び2号炉海水ポンプ室における砂の堆積厚の検討結果(基準津波1)

海水ポンプ位置の砂の堆積厚

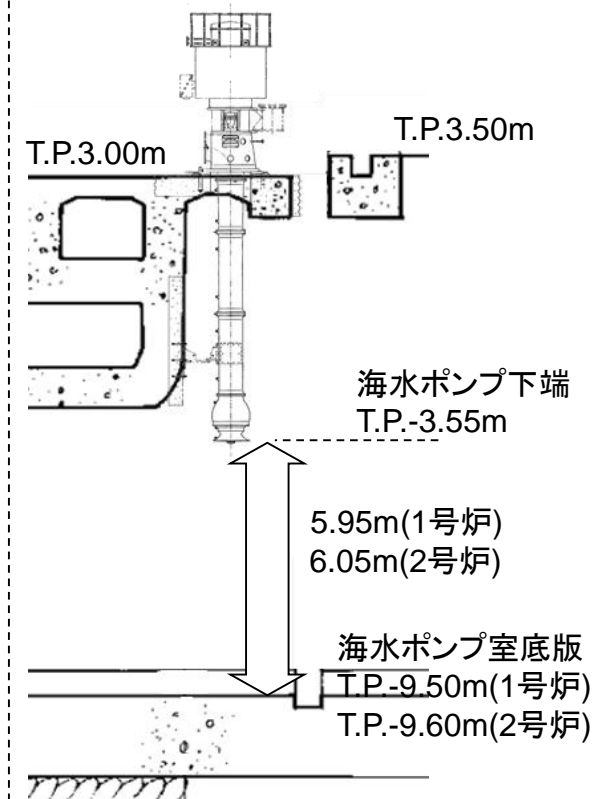


1号炉及び2号炉海水ポンプ室断面図

1号炉及び2号炉海水ポンプ室での堆積厚

基準津波1	0.15m
-------	-------

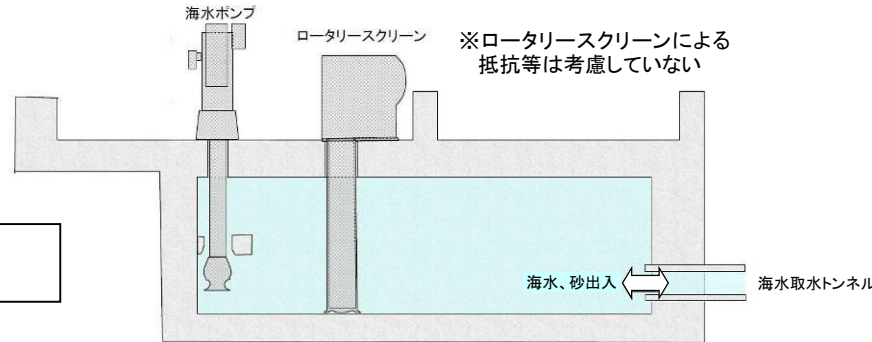
海水ポンプと1号炉及び2号炉海水ポンプ室底版の高さ



基準津波1による砂移動の影響について、1号炉及び2号炉海水ポンプ室における砂の堆積量を評価した結果、最大で0.15m程度であり、ポンプ取水への影響はないことを確認した。

3,4号炉海水ポンプ室における砂の堆積厚の検討結果(基準津波1, 2)

海水ポンプ位置の砂の堆積厚



3,4号炉海水ポンプ室断面図

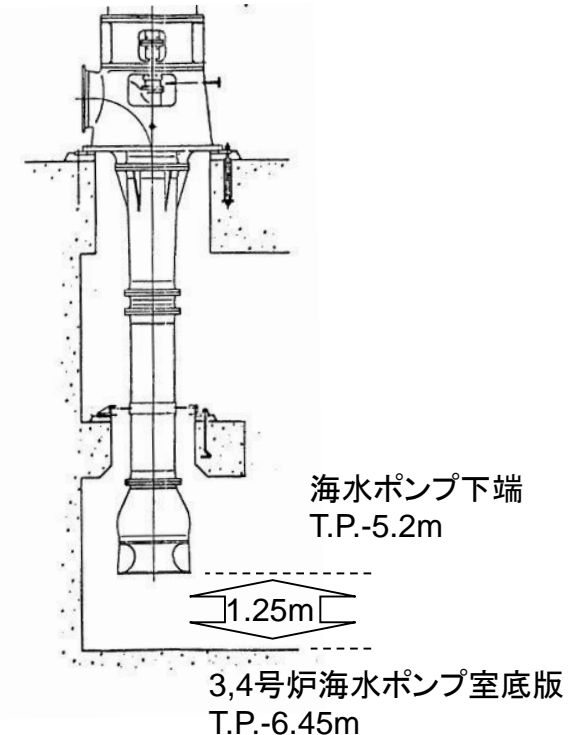
モデル化



3,4号炉海水ポンプ室は4つのメッシュに分割しており、最奥の海水ポンプ位置での堆積厚は、以下の通り

ポンプ位置での堆積厚	
基準津波1	0.32m
基準津波2	0.00m
基準津波3	0.07m
基準津波4	0.04m

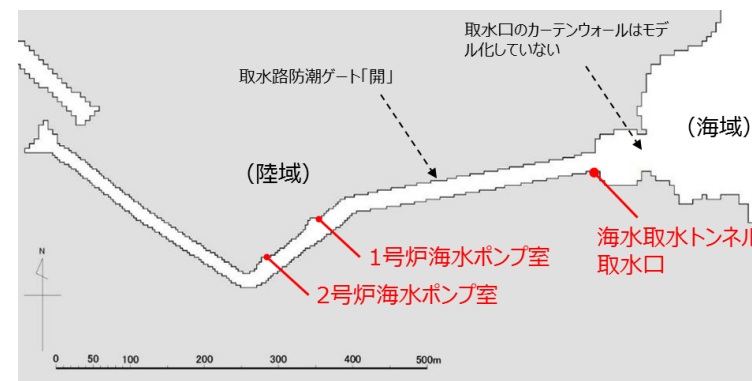
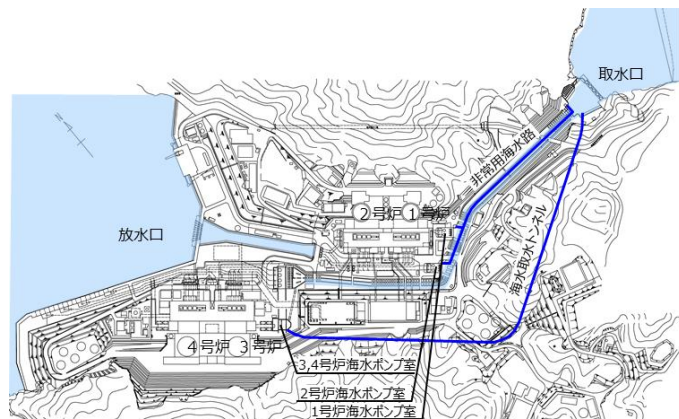
海水ポンプと3,4号炉海水ポンプ室底版の高さ



基準津波として選定した4波による砂移動の影響について、3,4号炉海水ポンプにおける砂の堆積量を評価した結果、最大で0.32m程度であり、ポンプ取水への影響はないことを確認した。

8. 津波に対する安全性(砂移動評価)

砂移動評価結果のまとめ



周辺のモデル化

対象津波波源	取水路 防潮 ゲート	砂移動モデル	浮遊砂体積 濃度上限値	各評価点における最大堆積厚				
				非常用海水路 取水口	海水取水トンネル 取水口	1号炉 海水ポンプ室	2号炉 海水ポンプ室	3,4号炉 海水ポンプ室
<基準津波1> 若狭海丘列付近断層と 隠岐トラフ海底地すべり(エリアB)	閉	藤井他(1998)	1%	0.01m	0.01m	—	—	—
			5%	0.01m	0.01m	—	—	—
		高橋他(1999)	1%	0.03m	0.02m	0.15m	0.15m	0.32m
<基準津波2> FO-A~FO-B~熊川断層と 陸上地すべり(No.14)	開	藤井他(1998)	1%	—	0.01m	0.00m	0.00m	—
			5%	—	0.01m	0.01m	0.00m	—
		高橋他(1999)	1%	—	0.02m	0.01m	0.00m	0.00m
<基準津波3> 隠岐トラフ海底地すべり(エリアB)	開	藤井他(1998)	1%	—	0.01m	0.02m	0.02m	—
			5%	—	0.01m	0.02m	0.02m	—
		高橋他(1999)	1%	—	0.02m	0.04m	0.01m	0.07m
<基準津波4> 隠岐トラフ海底地すべり(エリアC)	開	藤井他(1998)	1%	—	0.01m	0.01m	0.01m	—
			5%	—	0.01m	0.01m	0.01m	—
		高橋他(1999)	1%	—	0.03m	0.02m	0.01m	0.04m

参考文献

- 藤田尚毅, 稲垣和男, 藤井直樹, 高尾誠, 金戸俊道(2010): 津波による海底地形変化評価モデルの現地適用性に関する研究, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.213-218.
- 藤井直樹, 大森政則, 高尾誠, 金山進, 大谷英夫(1998): 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.376-380.
- 今井健太郎・菅原大助・高橋智幸・岩間俊二・田中仁(2015): 2011年東北津波における北上川河口部の大規模洗掘・堆積に関する数値的検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.71, No.2, I_247- I_252.
- 近藤武司, 森本 徹, 藤本典子, 殿最浩司, 志方建仁(2012): 港湾での津波による土砂移動計算の再現性評価, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, I_396- I_400.
- 森下祐, 高橋智幸(2014): 2011年東北地方太平洋沖地震津波来襲時の気仙沼湾を対象とした津波移動床モデルの再現性向上, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70, No.2, I_491- I_495.
- Sugawara, D., T. Takahashi(2014-a): Numerical Simulation of Coastal Sediment Transport by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Tsunami, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol.35, pp.99-112.
- Sugawara, D., T. Takahashi and F. Imamura(2014-b): Sediment transport due to the 2011 Tohoku-oki tsunami at Sendai : Result from numerical modeling, Marine Geology 358, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.05.005>, pp.18-37.
- 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔(1999): 掃流砂層・浮遊砂層の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学 論文集, 第46巻, pp.606-610.
- 高橋智幸, 黒川貴博, 藤田将孝, 島田広昭(2011): 津波による土砂移動の粒径依存性に関する推理実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), vol.67, No.2, pp.231-235.
- 高橋智幸(2012): 津波による砂移動に関する数値シミュレーションの現状と課題, 堆積学研究, 第71巻, 2号, pp.149-155.
- 玉田 崇, 田村 保, 高橋智幸, 佐々木元(2009): 河川での津波防災検討における津波移動床モデルの適用性に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.301-305.
- 山下啓, 菅原大助, 高橋智幸, 今村文彦, 齋藤友一, 今任嘉幸, 甲斐恭, 上原均, 加藤季広, 中田一人, 坂良太郎, 西川朝雄(2015): 岩手県陸前高田市における2011年東北地方太平洋沖地震津波による大規模土砂移動の再現計算, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.71, No.2, I_499- I_504.