

女川原子力発電所2号機 津波評価について
(基準津波に対する安全性(砂移動評価))
(コメント回答)

平成29年2月3日
東北電力株式会社

審査会合におけるコメント

No.	コメント時期	コメント内容	説明資料
S160	平成28年12月16日 第423回審査会合	最大シールズ数の空間分布, 浮遊砂体積濃度等のスナップショットを用いて, 高橋ほか(1999)の浮遊砂濃度上限値1%の説明性向上を図ること。また, 影響評価として実施した3%についても同様に示すこと。	本資料 第2章 補足説明資料 第3章, 第4章

目次

1. 評価方針	3
2. 海底地形変化	5
3. 海水ポンプ室内における砂の堆積	31

補足説明資料

1. 設置変更許可申請時からの変更点について	41
2. 基準津波の策定	43
3. 高橋ほか(1999)の手法に関する補足資料	53
4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価	57

1. 評価方針

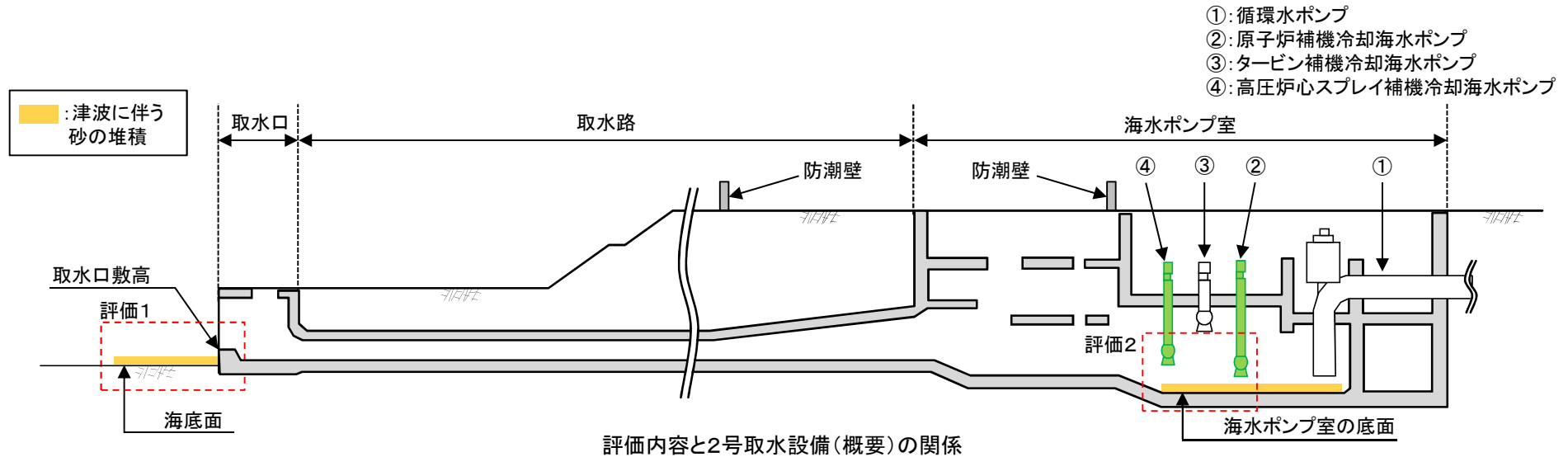
1. 評価方針

■ 海底地形変化(評価1)

- 基準津波※に伴う砂移動(海底地形変化)を評価して、2号取水口前面の砂の堆積高さが取水口高さを上回らず(取水口敷高に到達せず)、非常用海水ポンプの取水に影響が無いことを確認する。
- 砂移動解析は、藤井ほか(1998)及び高橋ほか(1999)の手法を用いて実施する。
※:基準津波の詳細は、補足説明資料「2. 基準津波の策定」に記載。

■ 海水ポンプ室内における砂の堆積(評価2)

- 2号海水ポンプ室内における砂の堆積高さを評価して、非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さが海水ポンプの高さを上回らず(海水ポンプの下端に到達せず)、非常用海水ポンプの取水に影響が無いことを確認する。
- 砂の堆積高さは、2号取水設備を1次元的にモデル化し、高橋ほか(1999)の手法を用いて算定する。
- なお、本検討は、海底地形変化の検討(評価1)において、取水口前面の砂の堆積高さが最も大きいケースを対象に実施する。



評価内容と2号取水設備(概要)の関係

取水口高さ, 非常用海水ポンプの高さ

		設定値	備考			
取水口高さ		1.20m	取水口敷高: O.P.*-6.3m, 海底面: O.P.-7.5m			
非常用海水ポンプの高さ	原子炉補機冷却海水ポンプ	1.15m	海水ポンプの下端	O.P.-11.25m	海水ポンプ室の底面	O.P.-12.4m
	高圧炉心スプレィ補機冷却海水ポンプ	2.45m		O.P.-9.95m		

※: O.P.は女川原子力発電所工事用基準面であり, 東京湾平均海面(T.P.)-0.74m

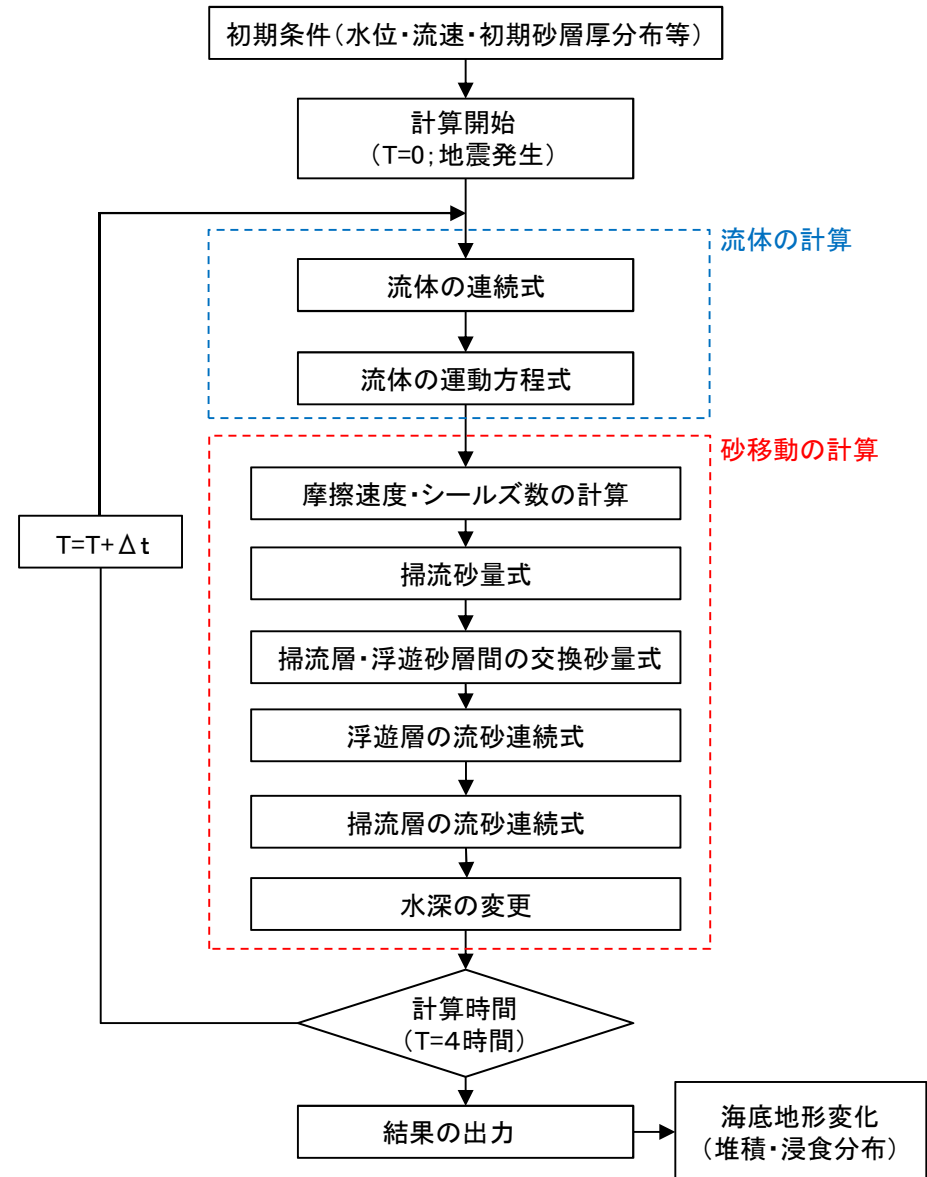
2. 海底地形変化

2. 1 評価概要	.....	6
2. 2 計算条件	.....	7
2. 3 評価結果	.....	15

2. 海底地形変化

2.1 評価概要

- 藤井ほか(1998)及び高橋ほか(1999)の手法を用いて、基準津波(水位上昇側・水位下降側)に伴う海底地形変化を評価した。
- 計算フローを右図に示す。



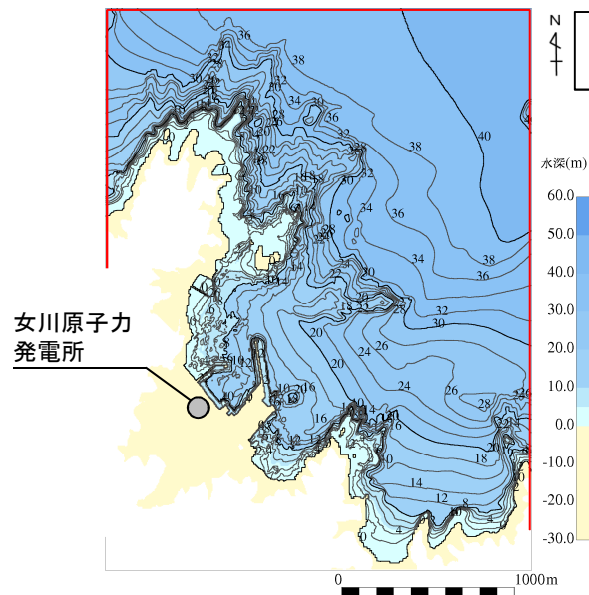
2. 海底地形変化

2.2 計算条件:流体

- 下記の計算条件に基づき流体の計算を実施した。

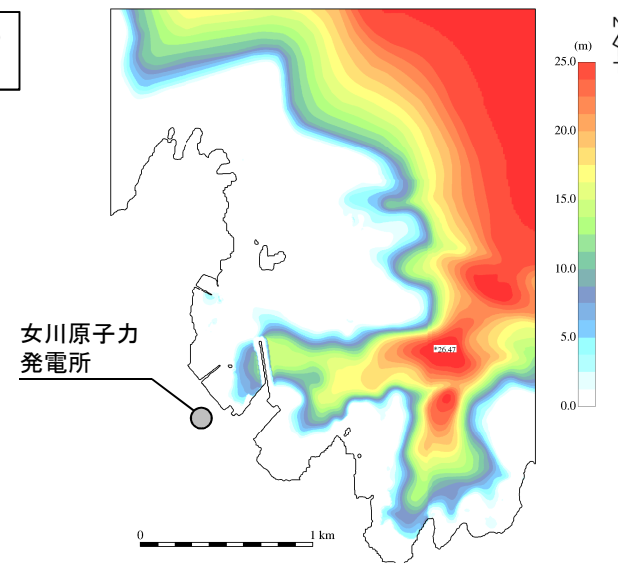
主な計算条件

項目	設定値
砂移動モデル	藤井ほか(1998), 高橋ほか(1999)
空間格子間隔 Δs	5m(2500/486)
時間格子間隔 Δt	0.05秒
沖側境界条件	<ul style="list-style-type: none"> 基準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境界条件として入力 解析領域境界での砂の流入出を考慮
陸側境界条件	小谷ほか(1998)の遡上境界条件
海底摩擦	マニングの粗度係数 $n = 0.03\text{m}^{-1/3}/\text{s}$
潮位条件	T.P.±0.0
計算時間	地震発生後4時間



計算領域の水深と沖側境界条件の設定位置

— : 沖側境界条件の設定位置



初期砂層厚分布※

※: 当社調査による基盤等深線図(1980.9), 深浅測量図(2011.5)を基に作成

2. 海底地形変化

2.2 計算条件: 砂移動

- 各評価手法の計算条件を以下に示す。
- 砂の密度・粒径, 各評価手法に用いた浮遊砂濃度上限値の詳細は, 次頁以降に示す。

計算条件

項目	藤井ほか(1998)の手法	高橋ほか(1999)の手法
地盤高の連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{E-S}{\sigma(1-\lambda)} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{E-S}{\sigma} \right) = 0$
浮遊砂濃度連続式	$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial(C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial(MC_s)}{\partial x} - \frac{E-S}{\sigma} = 0$
流砂量式	小林ほか(1996)の実験式 $Q = 80 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋ほか(1999)の実験式 $Q = 21 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
巻き上げ量の算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{ \frac{-wD}{k_z} \right\} \right]}$	高橋ほか(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則を鉛直方向に積分した式より算出	マンング則より算出 $u_* = \sqrt{gn^2 U^2 / D^{1/3}}$

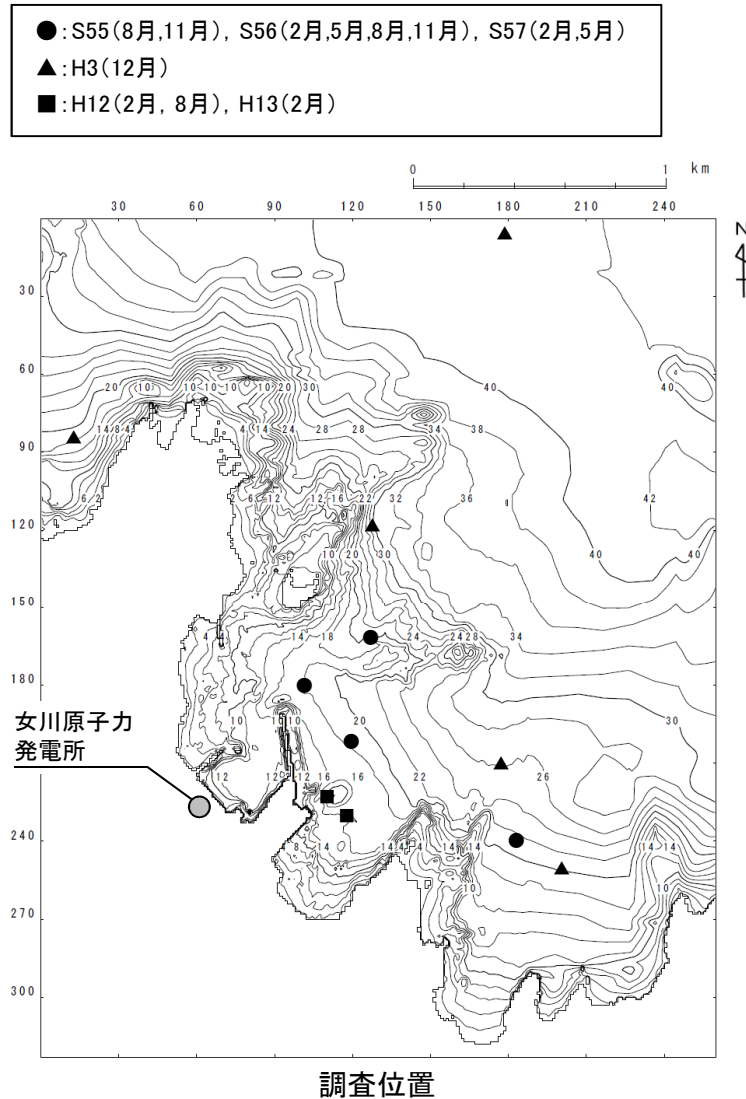
ここに,

- Z:水深変化量(m) t:時間(s) x:平面座標 τ_* :シールズ数 g:重力加速度(m/s²)
 Q:単位幅,単位時間当たりの掃流砂量 (m³/s/m) ρ :海水の密度(=1,030kg/m³, 一般値) σ :砂の密度(=2,716kg/m³, 調査結果より)
 d:砂の粒径(=2.15 × 10⁻⁴m(中央粒径), 調査結果より) λ :空隙率(=0.4, 藤井ほか(1998)他より) s := $\sigma / \rho - 1$
 U:流速(m/s) D:全水深(m) M:U × D(m²/s) n:マンングの粗度係数(=0.03m^{-1/3}s, 土木学会(2002)より)
 α :局所的な外力のみに移動を支配される成分が全流砂量に占める比率(=0.1, 藤井ほか(1998)より) w:土粒子の沈降速度(Rubey式より算出)(m/s)
 Z₀:粗度高さ(=ks/30)(m) k_z:鉛直拡散係数(=0.2ku_{*}h, 藤井ほか(1998)より)(m²/s) ks:相当粗度(=(7.66ng^{1/2})⁶)(m) h:水深(m)
 κ :カルマン定数(=0.4, 藤井ほか(1998)より) C_s:浮遊砂体積濃度(浮遊砂濃度連続式より算出) u_{*}:摩擦速度(m/s)
 C, C_b:浮遊砂濃度, 底面浮遊砂濃度(浮遊砂濃度連続式より算出)(kg/m³)
 log-wake則:対数則 $u_* / U = \kappa / \{ \ln(h/Z_0) - 1 \}$ にwake関数(藤井ほか(1998)より)を付加した式

2. 海底地形変化

2.2 計算条件: 砂の密度, 粒径

- ・ 発電所周辺で実施した調査結果に基づき, 砂の密度, 粒径(中央粒径)を設定した。



■調査結果

調査年月	密度: ρ (g/cm ³)	中央粒径: D_{50} (mm)
S55.8	2.698	0.190
S55.11	2.706	0.200
S56.2	2.706	0.163
S56.5	2.699	0.195
S56.8	2.709	0.223
S56.11	2.696	0.240
S57.2	2.699	0.170
S57.5	2.714	0.320
H3.12	2.708	0.179
H12.2	2.703	0.179
H12.8	2.741	0.156
H13.2	2.810	0.368

■設定値※

	密度: ρ (g/cm ³)	中央粒径: D_{50} (mm)
設定値	2.716	0.215

※: 各年の調査結果の平均値

余白

2. 海底地形変化

2.2 計算条件:浮遊砂濃度上限値

■基本方針

- ・ 藤井ほか(1998)の手法では, 1%, 5%に設定した。
- ・ 高橋ほか(1999)の手法では, 浮遊砂濃度上限値に関する文献調査(詳細はp12に記載。), 並びに発電所周辺における平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う津波(以下, 「3.11地震津波」という。)による砂移動の再現解析(詳細はp13~14に記載。)を踏まえ1%に設定した。

2. 海底地形変化

2.2 計算条件:高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度上限値の設定①

■文献調査:再現解析

- ・ 上限値5%の検証結果から、浮遊砂濃度上限値5%は過大評価になると考えられる。
- ・ 上限値1%の検証結果から、浮遊砂濃度上限値1%は妥当な設定値であると考えられる。

文献調査結果

検証箇所 (検証津波)	文献	計算使用 砂粒径	計算格子 間隔	浮遊砂濃度 上限値	浮遊砂濃度上限値に関する評価
気仙沼湾 (1960年チリ津波)	玉田ほか (2009)	0.001～ 1mm	25m, 5m	1%,5%	・ 計算格子間隔5mの場合、浮遊砂濃度上限値5%は実績値より浸食深を過大に評価
八戸港 (1960年チリ津波)	藤田ほか (2010)	0.26mm	10.3m	1%,2%,5%	・ 浮遊砂濃度上限値5%は過大に評価 ・ 浮遊砂濃度上限値1%, 2%の場合の再現性が良好
宮古湾 (3.11地震津波)	近藤ほか (2012)	0.08mm	10m	1%	・ 土砂移動の全体的な傾向は良く一致 ・ 防波堤堤頭部の最大洗掘深や断面地形も定量的に概ね良く一致
気仙沼湾 (3.11地震津波)	森下・ 高橋(2014)	0.3mm	10m	1% 可変※	・ 砂移動評価に影響を及ぼす因子として、無次元掃流力、流砂量式係数、飽和浮遊砂濃度の3つを抽出 ・ 上記3つの因子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 ・ 飽和浮遊砂濃度については、摩擦速度の関数とすることで再現性の向上に繋がることを示唆

※: 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), $\alpha = 0.01$)

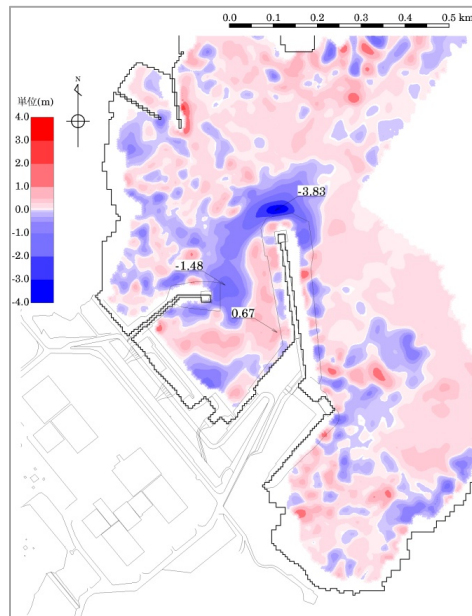
2. 海底地形変化

2.2 計算条件:高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度上限値の設定②

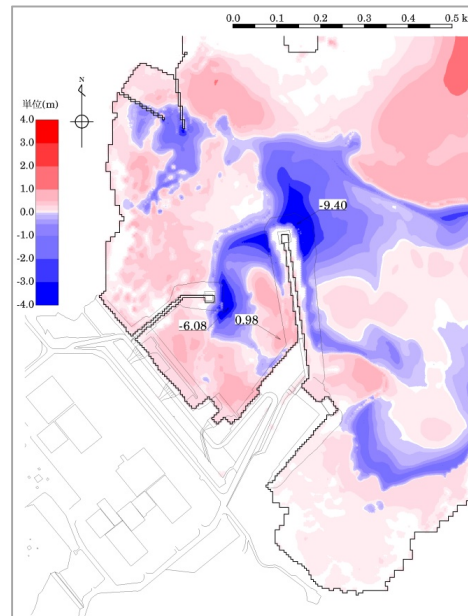
■発電所周辺における3.11地震津波に伴う砂移動の再現解析:高橋ほか(1999)

- ・ 発電所周辺の3.11地震津波を良好に再現する女川再現モデルを用いて、浮遊砂濃度上限値1%とした場合の再現解析を実施した結果、全体的な海底地形変化の分布は過大な傾向を示すことを確認した。
- ・ 解析から得られる最大流速を用いて、最大シルズ数の空間分布を整理した結果、浸食傾向が見られる防波堤港口部付近では、シルズ数が顕著に大きくなっており、高橋ほか(1999)で論じられている範囲(概ね1以下の実験結果)※を大きく超えている。
- ・ 浮遊砂体積濃度上限値の設定について、高橋(2012)によれば、「高橋ほか(1999)の手法は、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、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ため、浮遊砂濃度の上限を便宜的に導入している。」としている※。
- ・ 以上から、浮遊砂濃度上限値1%は保守的な設定値と考えられる。

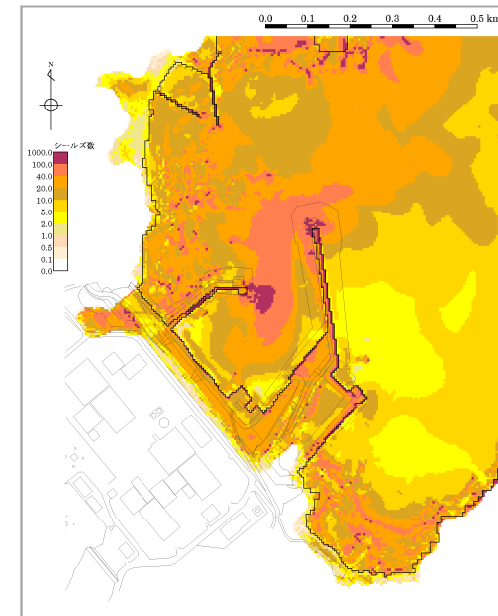
※:高橋ほか(1999)の適用範囲と浮遊砂濃度上限に関する説明の詳細は、補足説明資料「3. 高橋ほか(1999)の手法に関する補足資料」に記載。



3.11地震に伴う津波による
海底地形の変化(実績)※
(赤:堆積域, 青:浸食域)



海底地形変化(再現解析)
(赤:堆積域, 青:浸食域)



最大シルズ数の空間分布
(再現解析)

※:当社深浅測量調査(2010.10, 2011.5)を基に
作成(東北電力(2011))

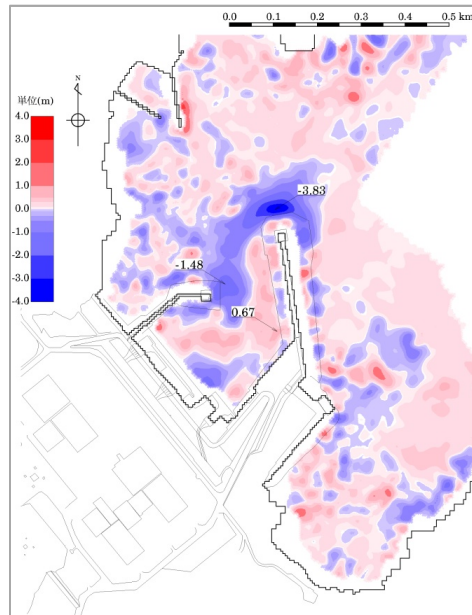
2. 海底地形変化

2.2 計算条件:高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度上限値の設定②

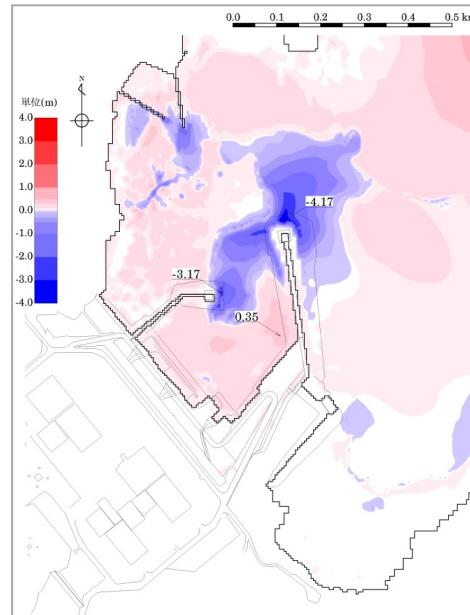
■発電所周辺における3.11地震津波に伴う砂移動の再現解析:高橋ほか(2011)(流砂量式・巻き上げ量算定式:粒径 $d=0.166\text{mm}$ の実験式)

- ・ 参考に、高橋ほか(2011)で示される流砂量式、巻き上げ量算定式(粒径 $d=0.166\text{mm}$ の実験式)を用いて、浮遊砂濃度上限値1%とした場合の再現解析を実施した結果、全体的な海底地形変化の分布を概ね再現することを確認した。
- ・ 解析から得られる最大流速を用いて、最大シルズ数の空間分布を整理した結果、前述した高橋ほか(1999)による解析結果と同様に、浸食傾向が見られる防波堤港口部付近のシルズ数は顕著に大きく、高橋ほか(2011)で論じられている範囲(概ね1~5程度の実験結果)を大きく超えているが、高橋ほか(1999)と比較して再現性が向上している要因は、粒径依存性を考慮した新たな算定式であること等の影響によるものと考えられる*。

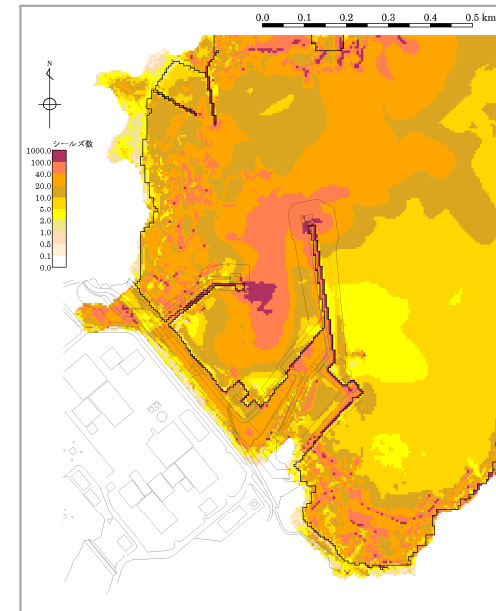
※:高橋ほか(1999)と高橋ほか(2011)の流砂量式、巻き上げ量の算定式の比較を、補足説明資料「3. 高橋ほか(1999)の手法に関する補足資料」に記載。



3.11地震に伴う津波による
海底地形の変化(実績)
(赤:堆積域, 青:浸食域)



海底地形変化(再現解析)
(赤:堆積域, 青:浸食域)



最大シルズ数の空間分布
(再現解析)

以上から、高橋ほか(1999)の手法に用いる浮遊砂濃度上限を1%に設定した。

2. 海底地形変化

2.3 評価結果

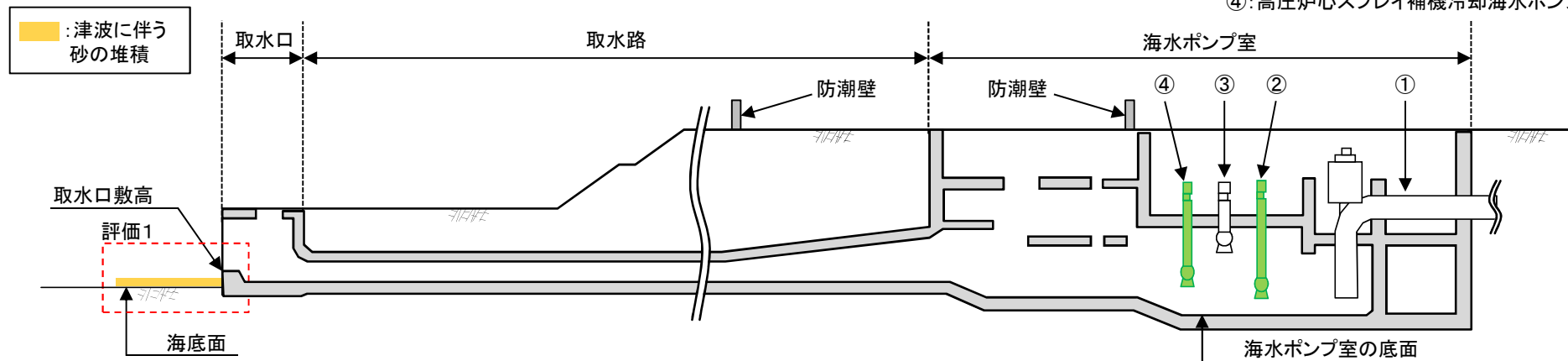
- 2号取水口前面における砂の堆積高さは最大で0.3m程度であり、取水口高さを上回らない。
- 以上から、非常用海水ポンプの取水への影響は無いことを確認した。
- 各検討ケースの最大堆積厚分布、4時間後の海底地形変化量分布及び2号取水口前面における海底地形変化量等の時刻歴データを次頁以降に示す。
なお、高橋ほか(1999)の手法による解析結果については、最大シルズ数の空間分布及び水位、浮遊砂体積濃度のスナップショットも合わせて示す。

評価結果

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	2号取水口前面における 砂の堆積高さ(m)	取水口高さ (m)
水位上昇側	藤井ほか(1998)	1%	0.04	1.20※
	高橋ほか(1999)	5%	0.04	
水位下降側	藤井ほか(1998)	1%	0.04	
	高橋ほか(1999)	1%	0.18	

※:取水口敷高:O.P.-6.3m, 海底面:O.P.-7.5m

- ①:循環水ポンプ
- ②:原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③:タービン補機冷却海水ポンプ
- ④:高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ



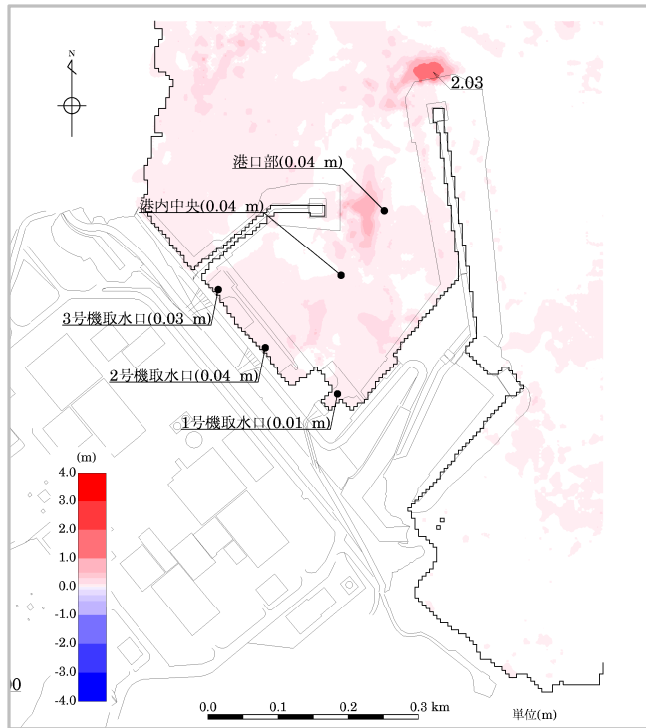
評価内容と2号取水設備(概要)の関係

2. 海底地形変化

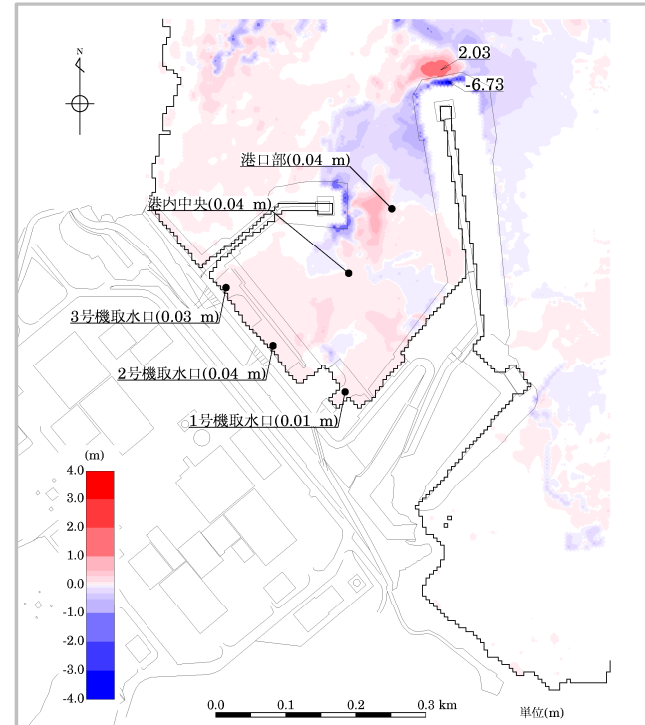
2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)①

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位上昇側	藤井ほか(1998)	1%

■ 最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布



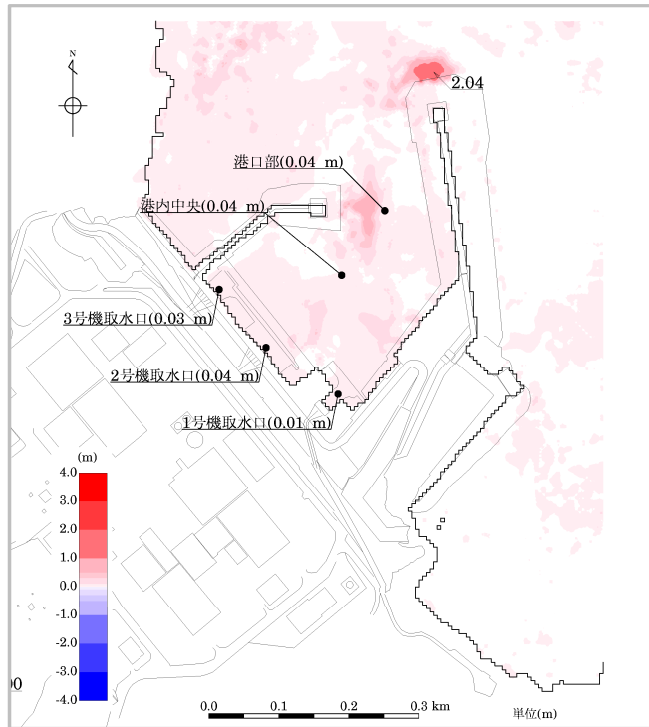
4時間後の海底地形変化量分布

2. 海底地形変化

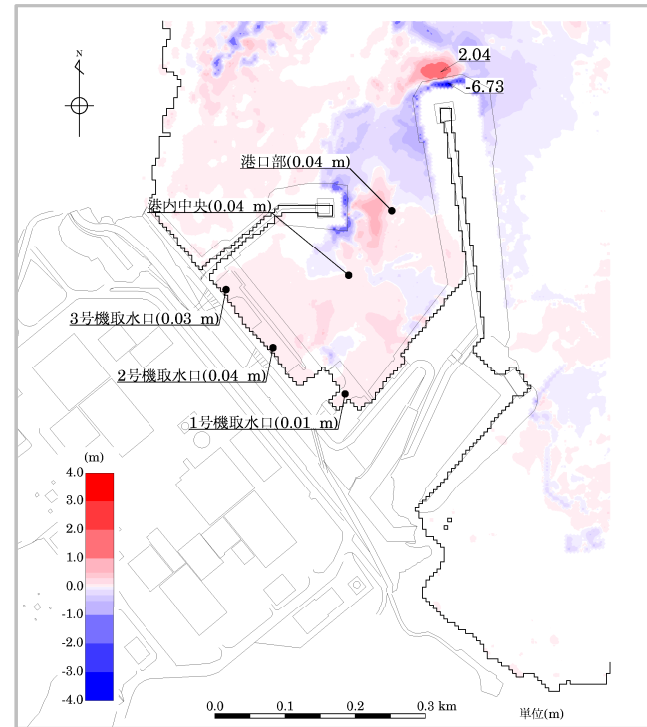
2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)②

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位上昇側	藤井ほか(1998)	5%

■ 最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布



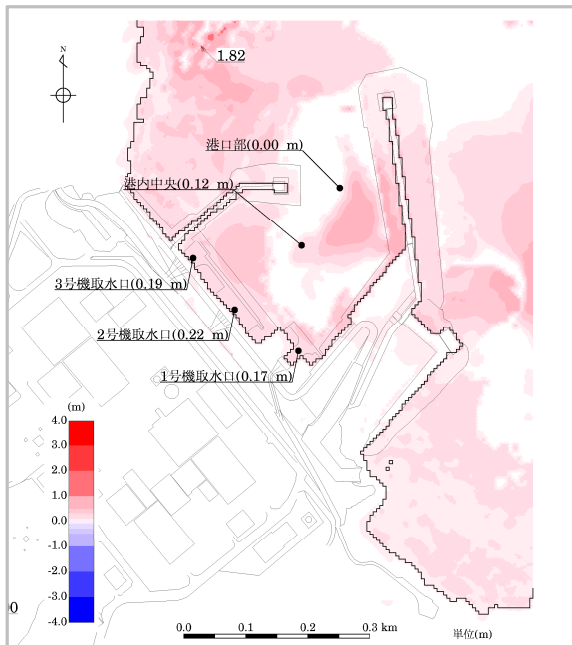
4時間後の海底地形変化量分布

2. 海底地形変化

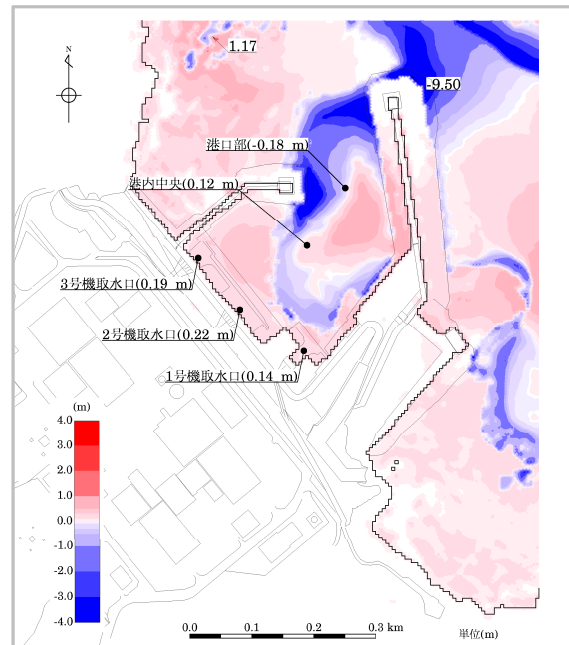
2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)③

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位上昇側	高橋ほか(1999)	1%

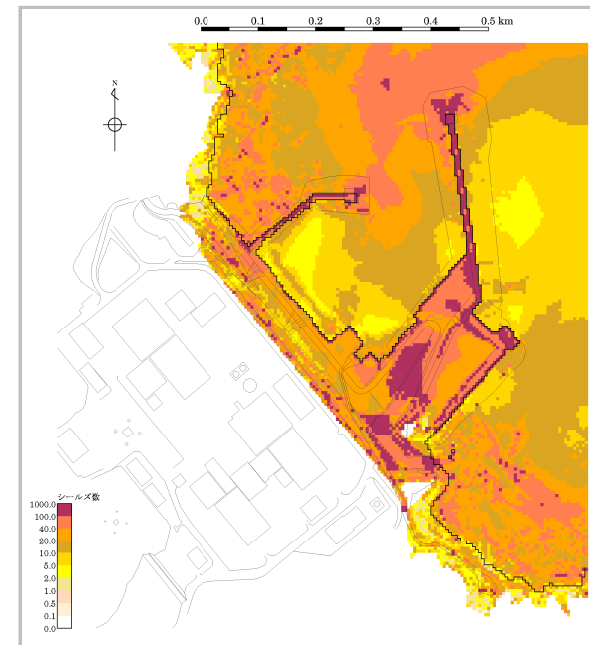
■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布, 最大シールズ数の空間分布



最大堆積厚分布



4時間後の海底地形変化量分布



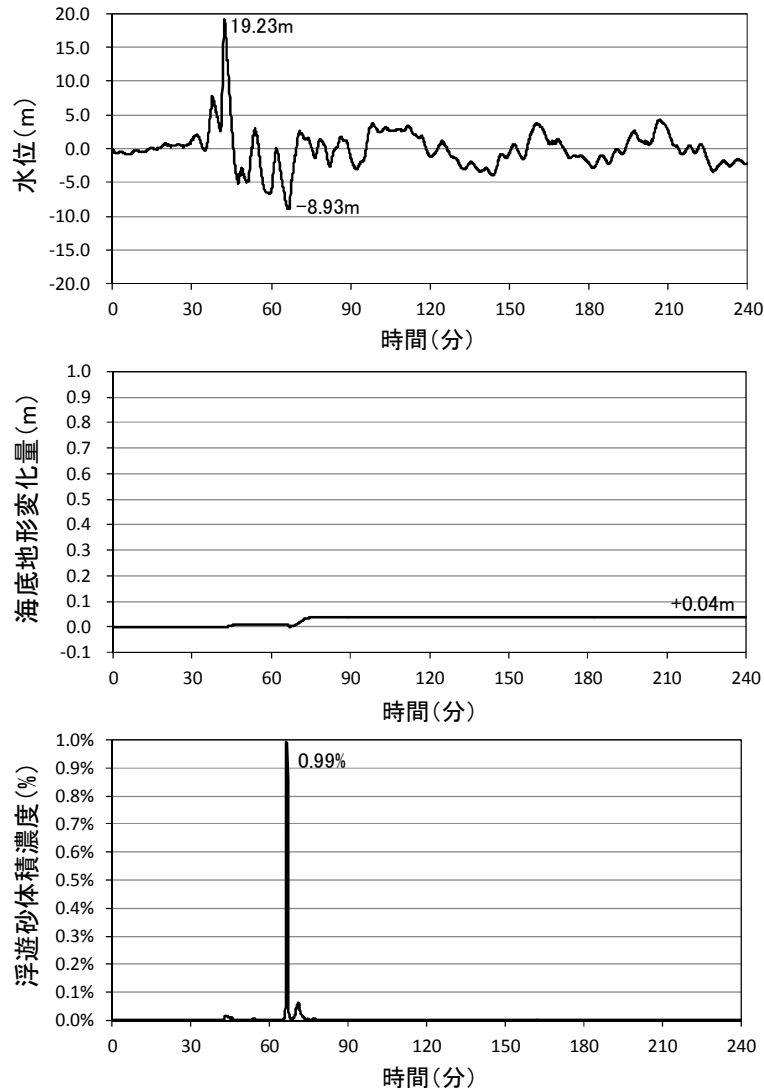
最大シールズ数の空間分布

2. 海底地形変化

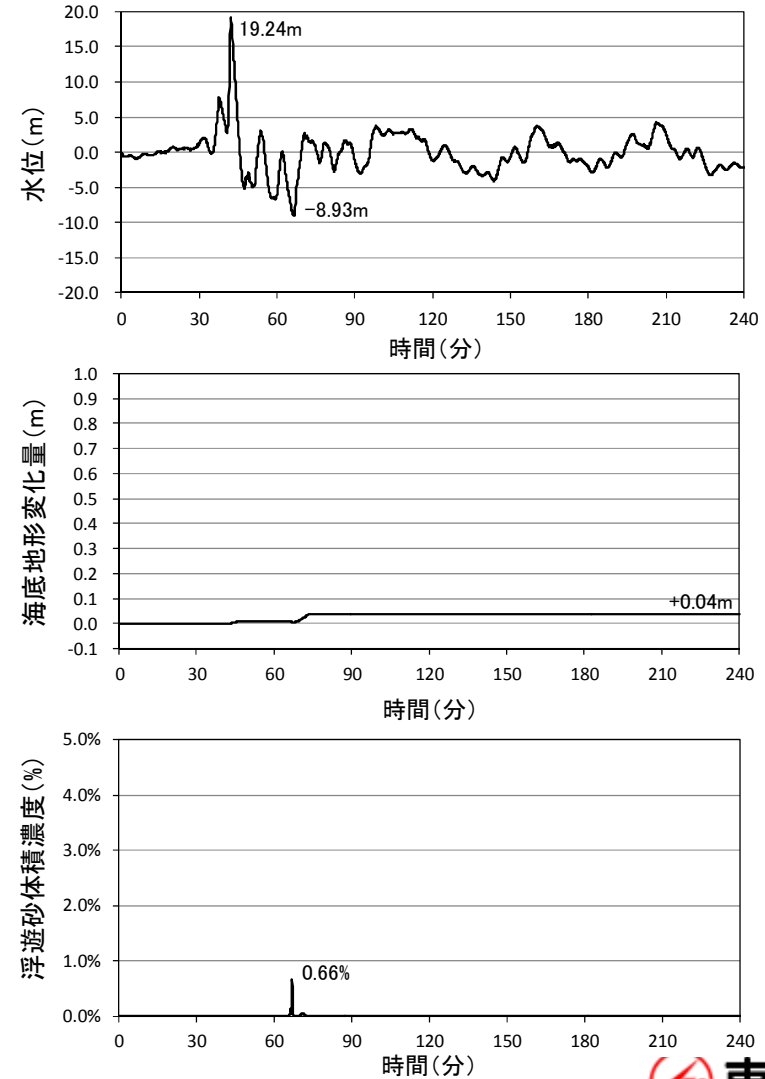
2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)④

■ 2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値: 1%】



【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値: 5%】

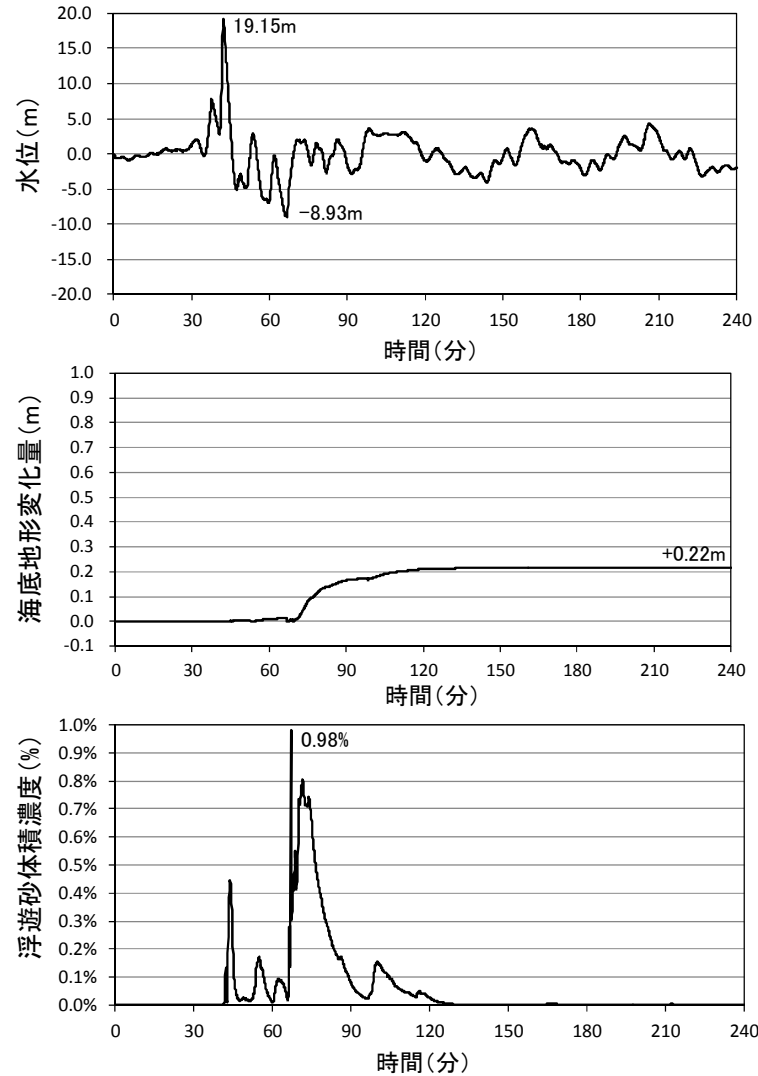


2. 海底地形変化

2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)④

■ 2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

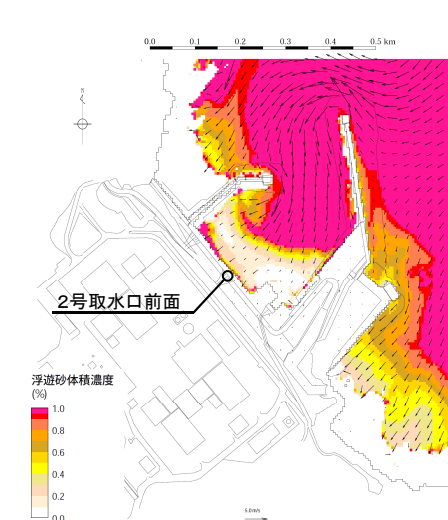
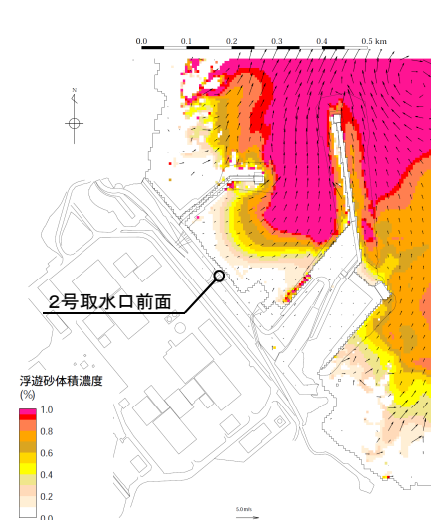
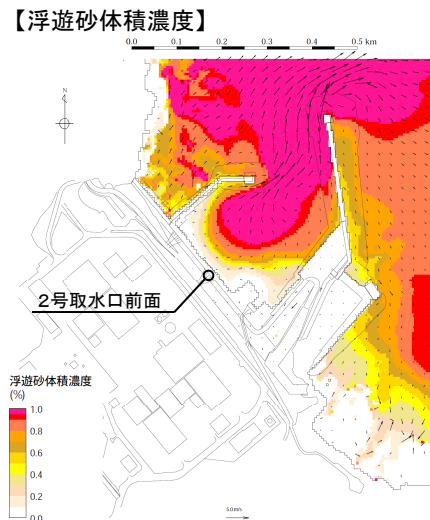
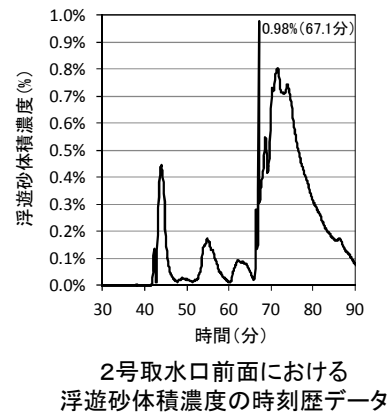
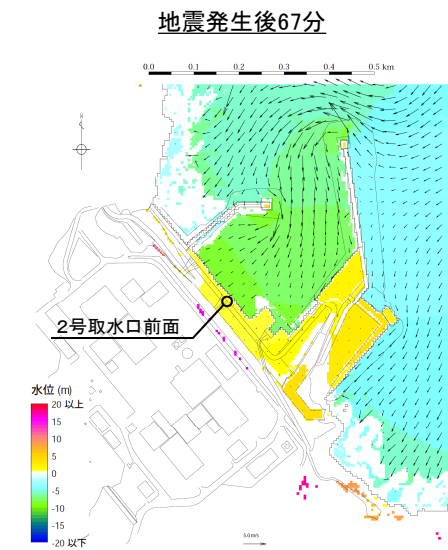
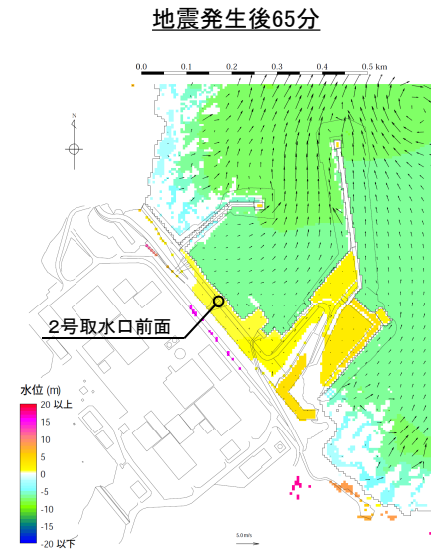
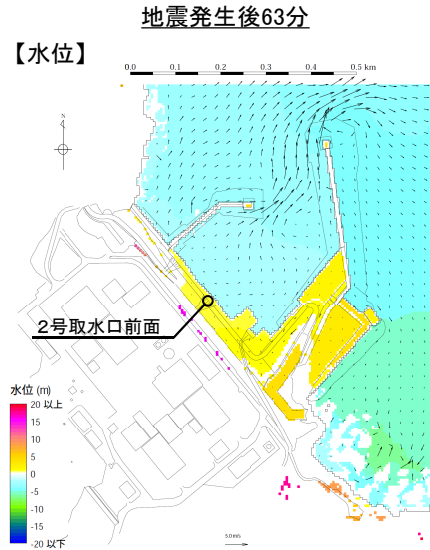
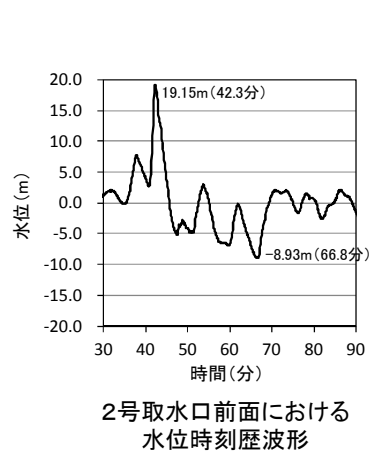
【高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値: 1%】



2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)⑤

■高橋ほか(1999): 水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後63分~71分)①

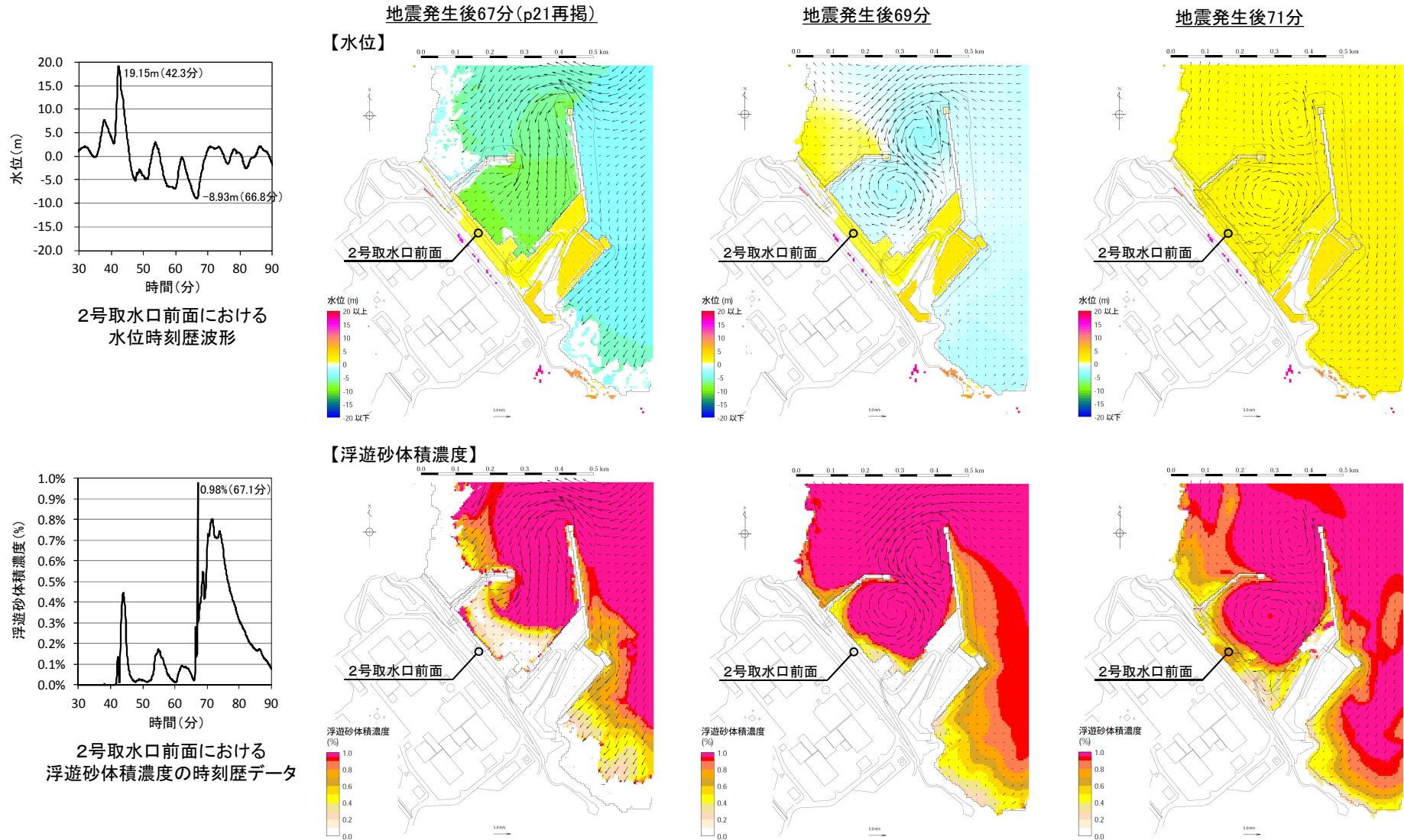
- ・ 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約67分前後の水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショットを以下に示す。
- ・ 水位低下時(63分~65分)に沖合いへ移動した濃度が高い浮遊砂が, 水位上昇時に敷地方向へ移動し, 2号取水口前面における浮遊砂体積濃度が高くなるが(67分), その後, 津波は港湾内で渦状になりながら水位上昇するため, 2号取水口前面の浮遊砂体積濃度は低くなっていく(69分~71分(次頁記載))。



2. 海底地形変化

2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)⑤

■高橋ほか(1999): 水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後63分~71分)②

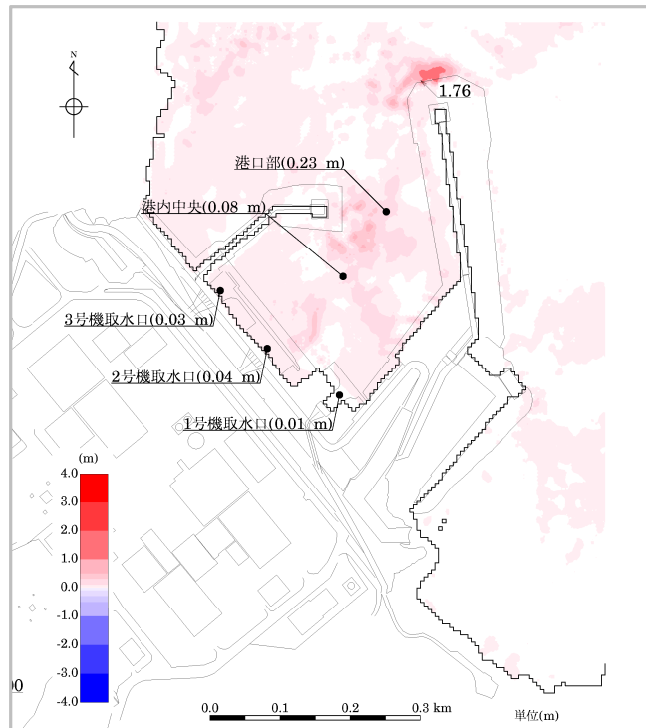


2. 海底地形変化

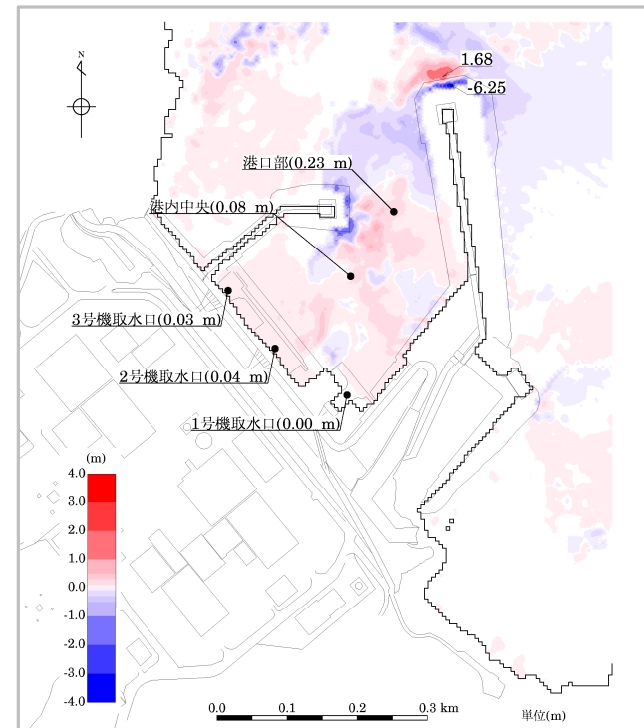
2.3 評価結果: 基準津波(水位下降側)①

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位下降側	藤井ほか(1998)	1%

■ 最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布



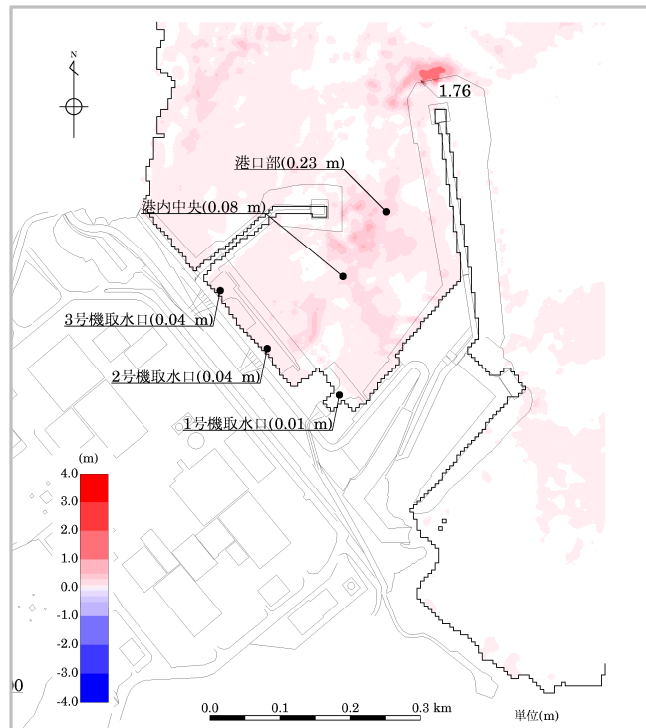
4時間後の海底地形変化量分布

2. 海底地形変化

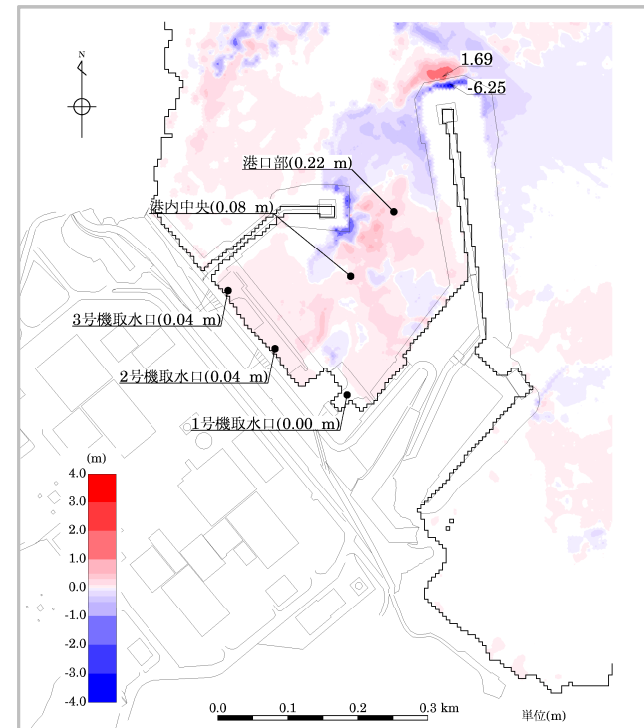
2.3 評価結果: 基準津波(水位下降側)②

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位下降側	藤井ほか(1998)	5%

■ 最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布



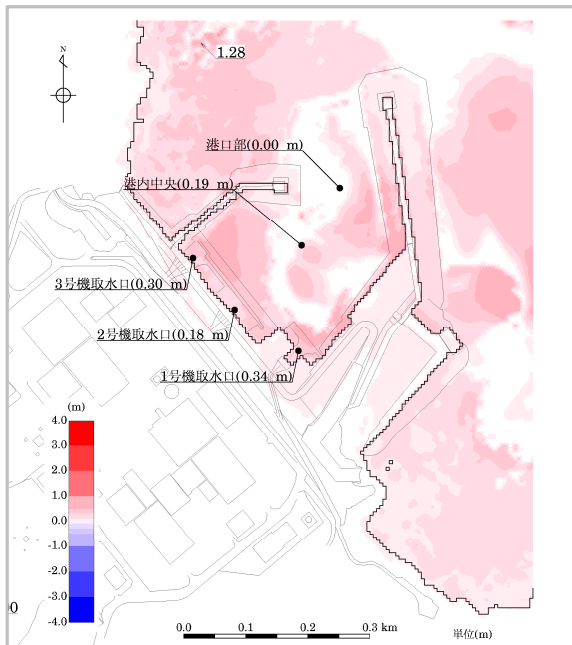
4時間後の海底地形変化量分布

2. 海底地形変化

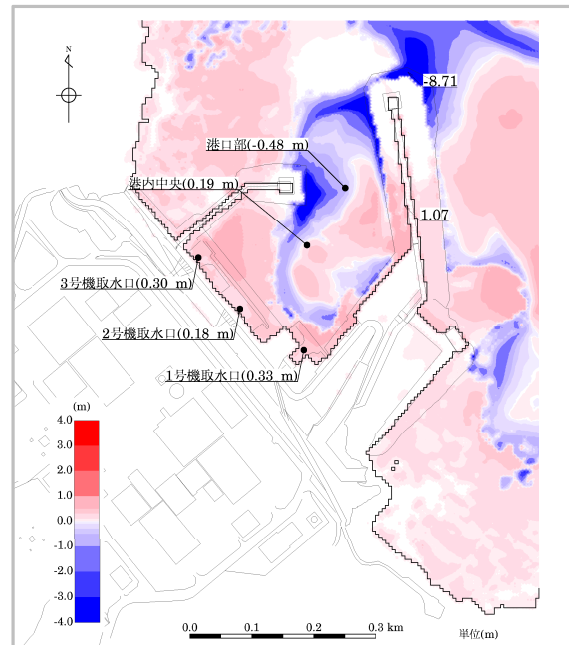
2.3 評価結果: 基準津波(水位下降側)③

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位下降側	高橋ほか(1999)	1%

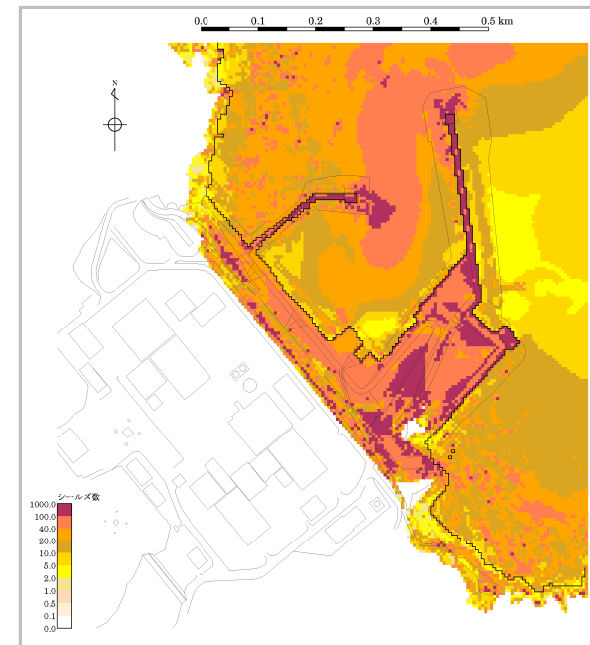
■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布, 最大シールズ数の空間分布



最大堆積厚分布



4時間後の海底地形変化量分布



最大シールズ数の空間分布

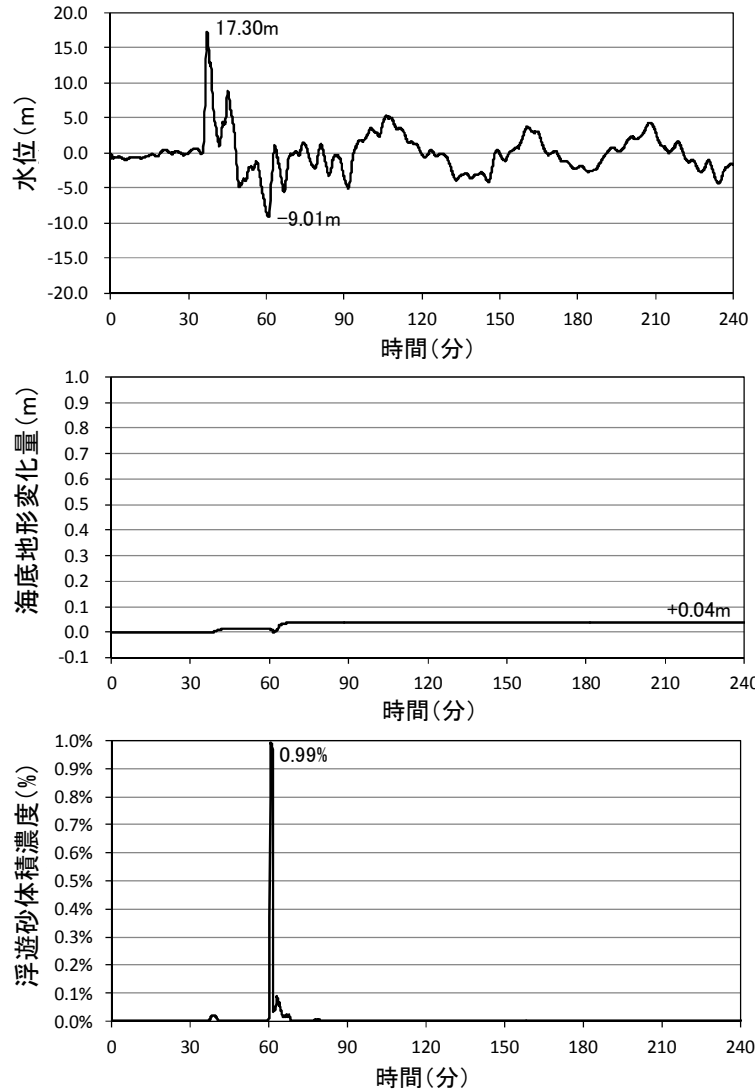
余白

2. 海底地形変化

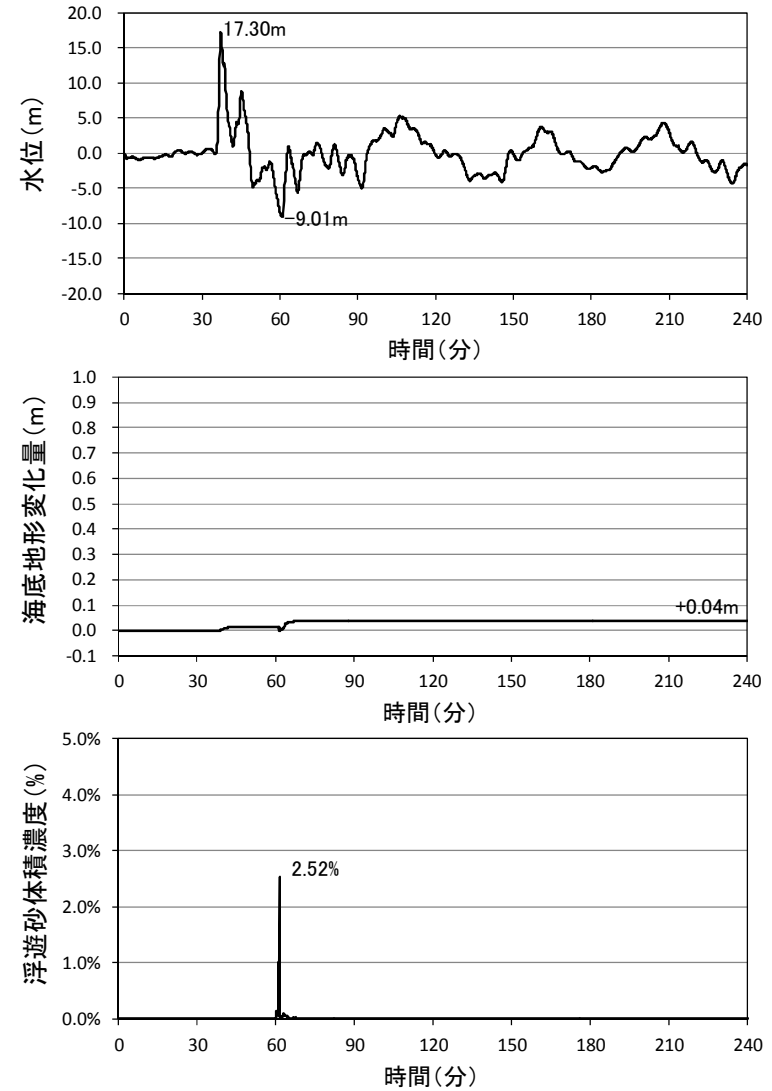
2.3 評価結果: 基準津波(水位下降側)④

■ 2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値: 1%】



【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値: 5%】

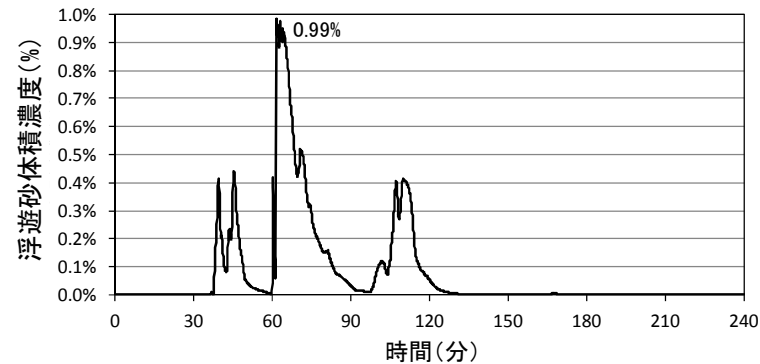
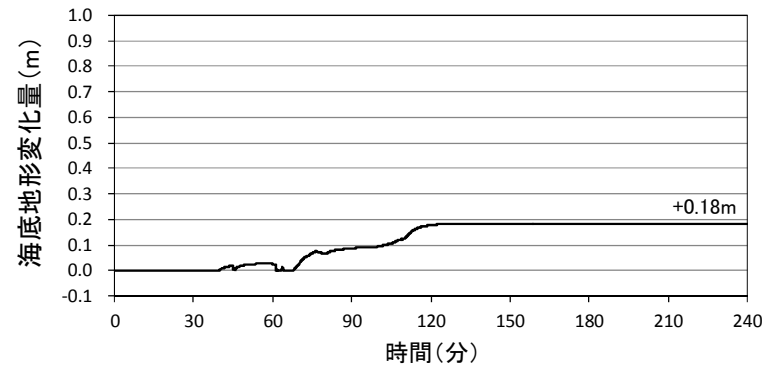
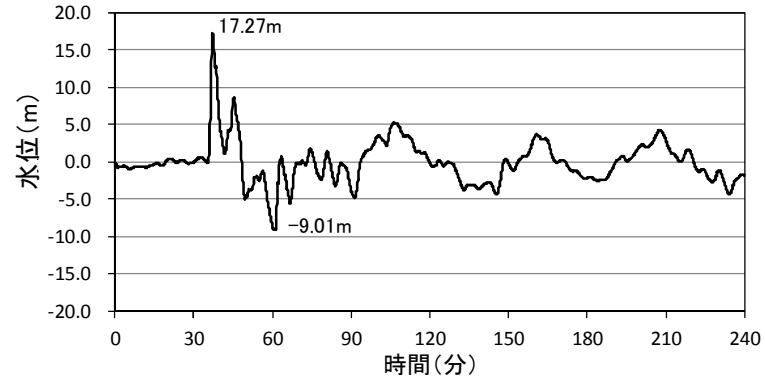


2. 海底地形変化

2.3 評価結果: 基準津波(水位下降側)④

■ 2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

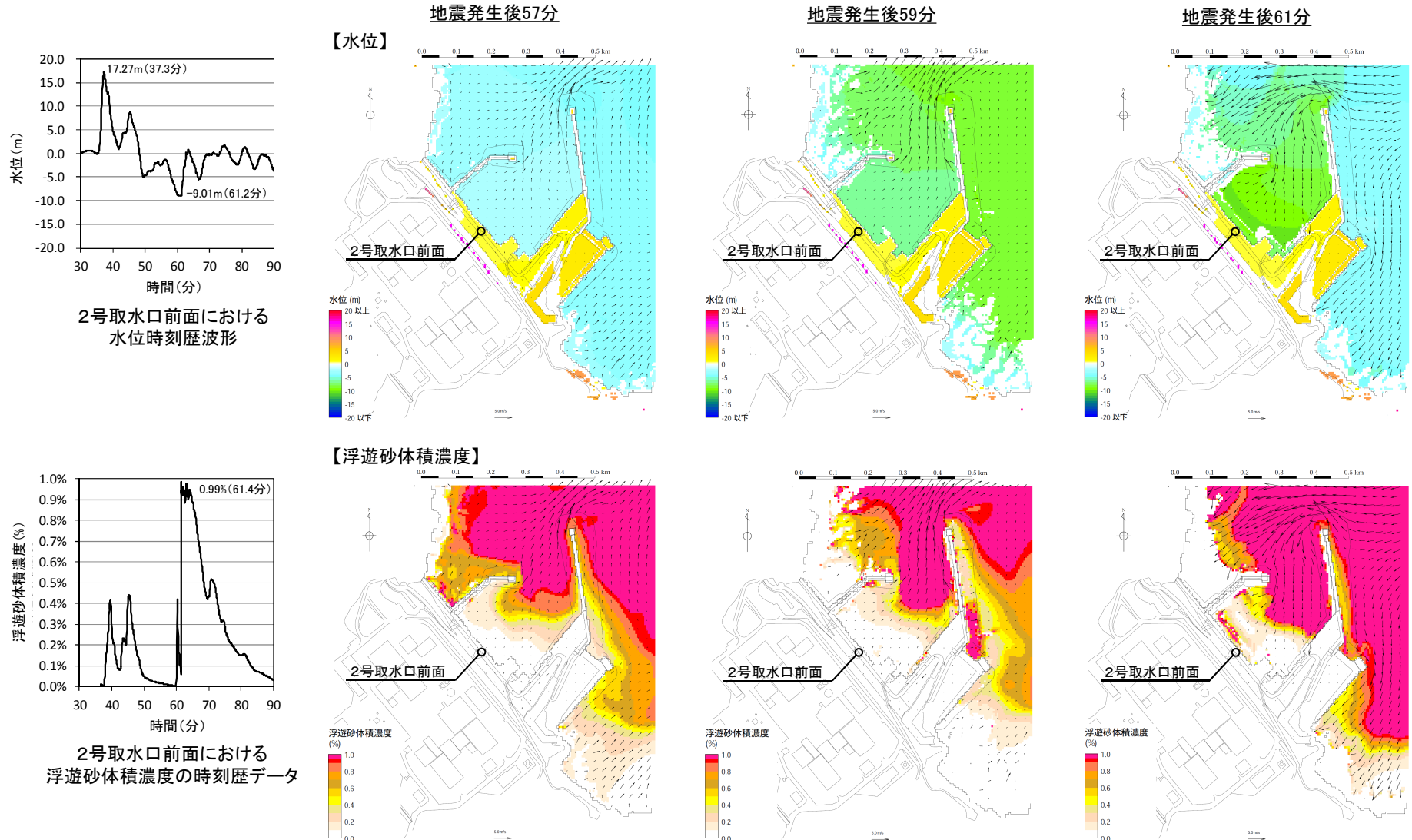
【高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値: 1%】



2.3 評価結果: 基準津波(水位下降側)⑤

■高橋ほか(1999): 水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後57分~67分)①

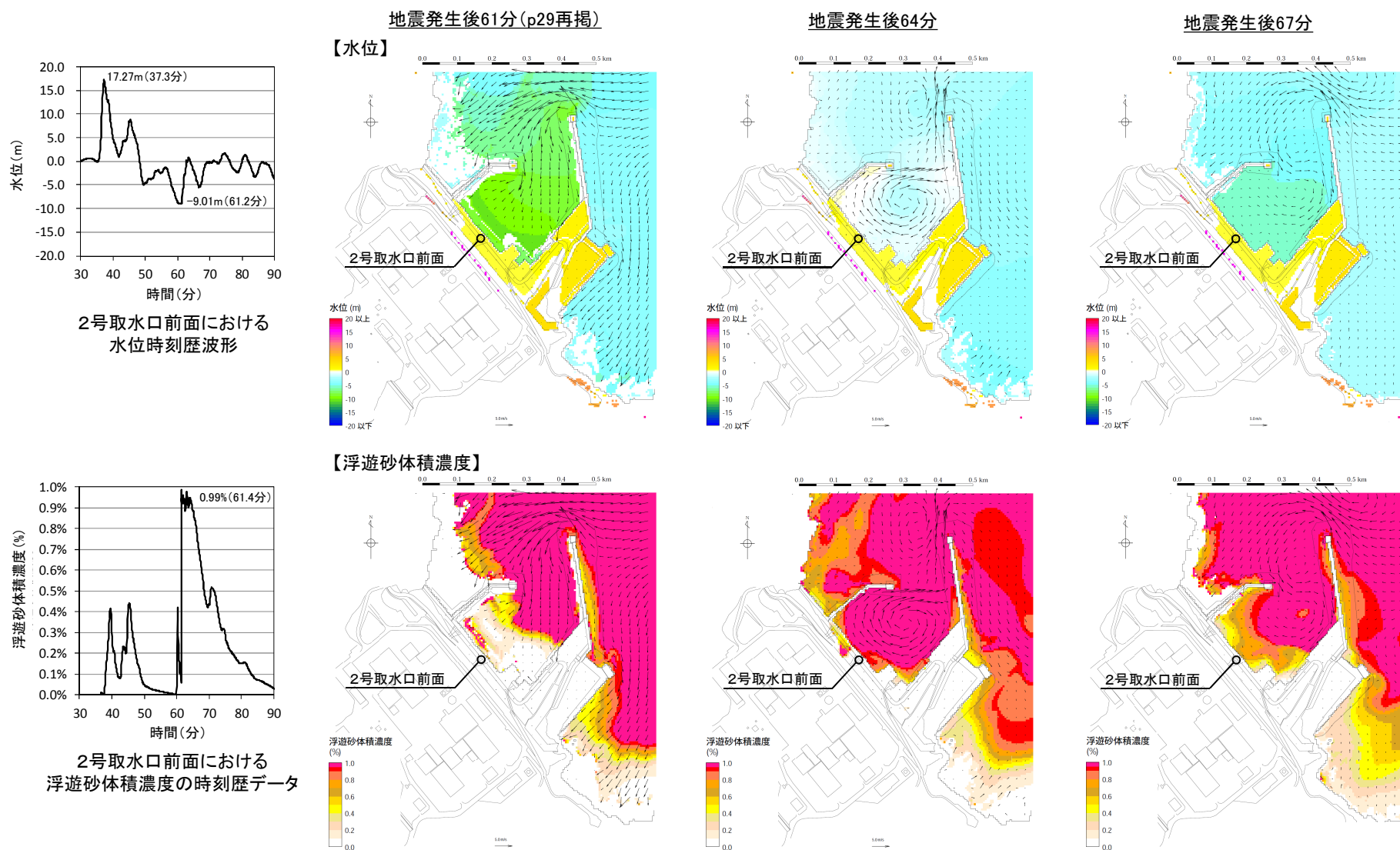
- ・ 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約61分前後の水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショットを以下に示す。
- ・ 水位低下時(57分~59分)に沖合いへ移動した濃度が高い浮遊砂が, 水位上昇時に敷地方向へ移動し, 2号取水口前面における浮遊砂体積濃度が高くなるが(61分), その後, 津波は港湾内で渦状になりながら水位上昇するため, 2号取水口前面の浮遊砂体積濃度は低くなっていく(64分~67分(次頁記載))。



2. 海底地形変化

2.3 評価結果: 基準津波(水位下降側)⑤

■高橋ほか(1999): 水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後57分~67分)②



3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

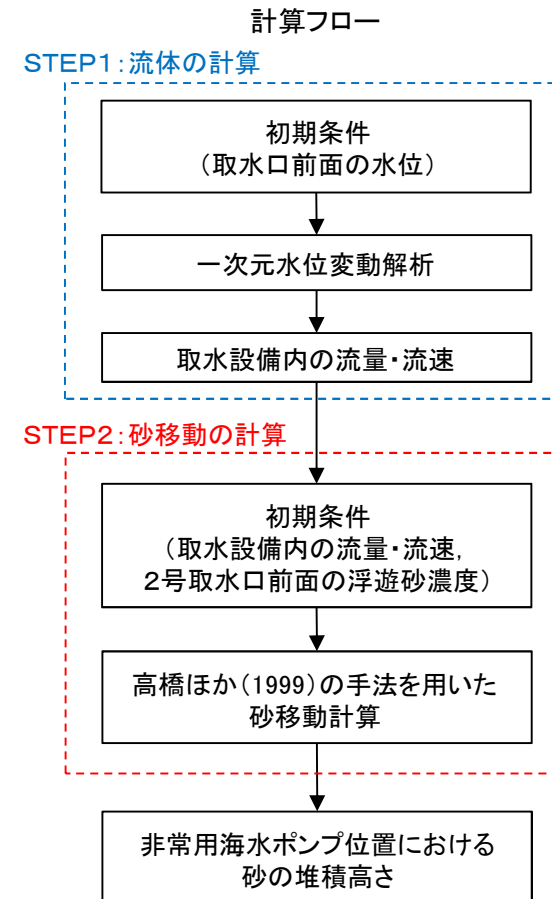
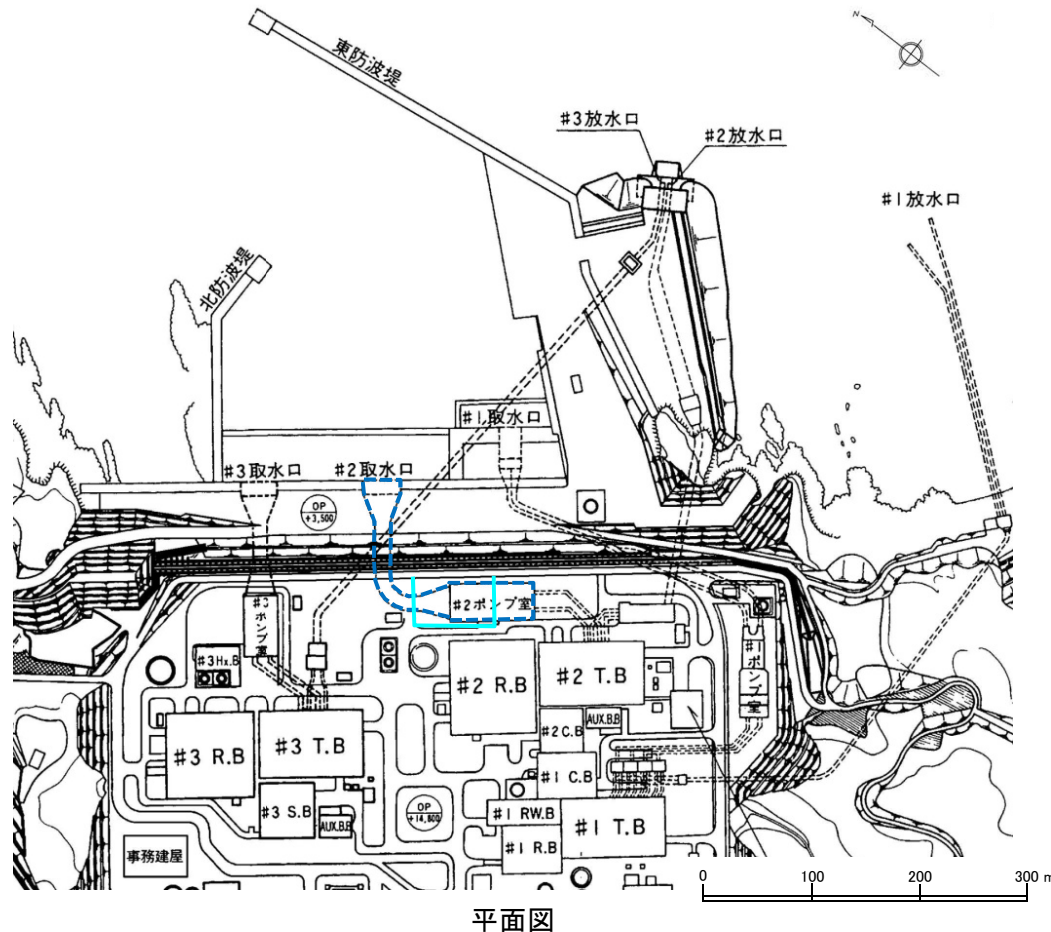
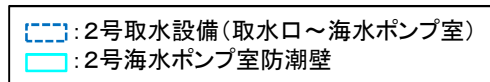
3. 1 評価概要	.....	33
3. 2 計算条件	.....	35
3. 3 評価結果	.....	38

余白

3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

3.1 評価概要

- 前項「2. 海底地形変化」の評価から得られる取水口前面の浮遊砂濃度を境界条件として、高橋ほか(1999)の手法を用いて砂移動解析を実施し、非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さを算定した。
- なお、上記評価に用いる取水設備内の流量及び流速は、取水設備の水理特性を考慮した一次元水位変動解析により算定した。
- 計算フローを右図に示す。



3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

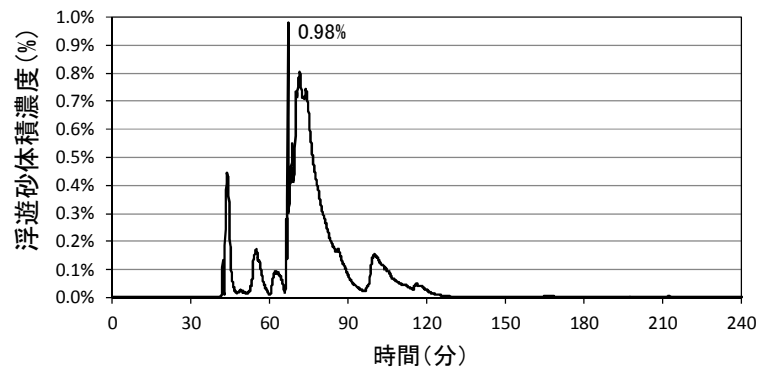
3.1 評価概要: 検討ケース

- 前項「2. 海底地形変化」の評価において、2号取水口前面における砂の堆積高さが最も大きい以下のケースを対象に実施した。

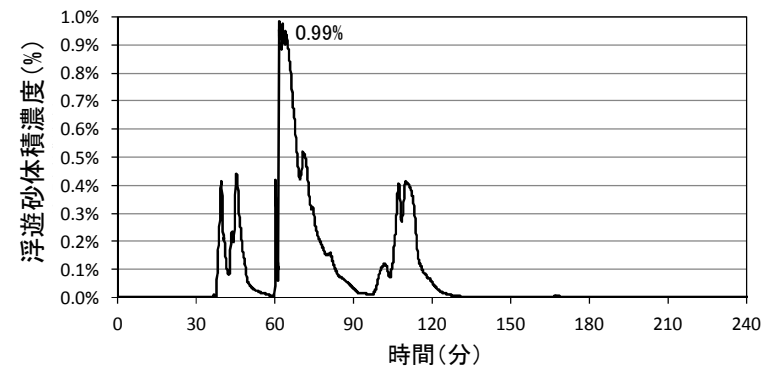
海底地形変化の評価結果

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	2号取水口前面における 砂の堆積高さ(m)	備考
水位上昇側	藤井ほか(1998)	1%	0.04	
		5%	0.04	
	高橋ほか(1999)	1%	0.22	検討ケース
水位下降側	藤井ほか(1998)	1%	0.04	
		5%	0.04	
	高橋ほか(1999)	1%	0.18	検討ケース

■2号取水口前面における浮遊砂濃度(評価手法:高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値:1%)



基準津波(水位上昇側) (p20再掲)



基準津波(水位下降側) (p28再掲)

3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

3. 2 計算条件: 取水設備の水利特性を考慮した水位変動解析※

※: 砂移動の計算条件(高橋ほか(1999)の手法)の詳細はp8に記載。

- 下記の計算条件に基づき、取水設備の水利特性を考慮した水位変動解析を実施した。

項目	設定内容
基礎方程式	一次元開水路非定常流の連続式及び運動方程式
計算時間間隔	0.0001秒
計算格子間隔	0.5m
局所損失係数	千秋(1967), 土木学会(1999), 電力土木技術協会(1995) による
貝代	15cm
摩擦損失係数	$n=0.018m^{-1/3}s$
海水ポンプの取水条件	①循環水ポンプ: 停止 ②原子炉補機冷却海水ポンプ: 1900m ³ /hr × 2台 ③高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ: 停止 ④タービン補機冷却海水ポンプ: 2250m ³ /hr × 2台(海水ポンプ室内水位O.P.-2.080m以下で取水停止)
潮位条件	・水位上昇側: 朔望平均満潮位 O.P.+1.43m ・水位下降側: 朔望平均干潮位 O.P.-0.14m
基準津波による地盤沈下量	・水位上昇側: -0.72m ・水位下降側: 考慮しない
計算時間	地震発生後4時間

①基礎方程式:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta L} f \frac{|v| v}{2g} \right) = 0$$

t : 時間(s) x : 底面に沿った座標 A : 流水面積(m²) Q : 流量(m³/s)
 H : 水位(m) g : 重力加速度(m/s²) v : 流速(m/s) R : 径深(m)
 n : マニングの粗度係数(m^{-1/3}s) f : 局所損失係数 ΔL : 局所損失区間の長さ(m)

②海水ポンプ室の連続式

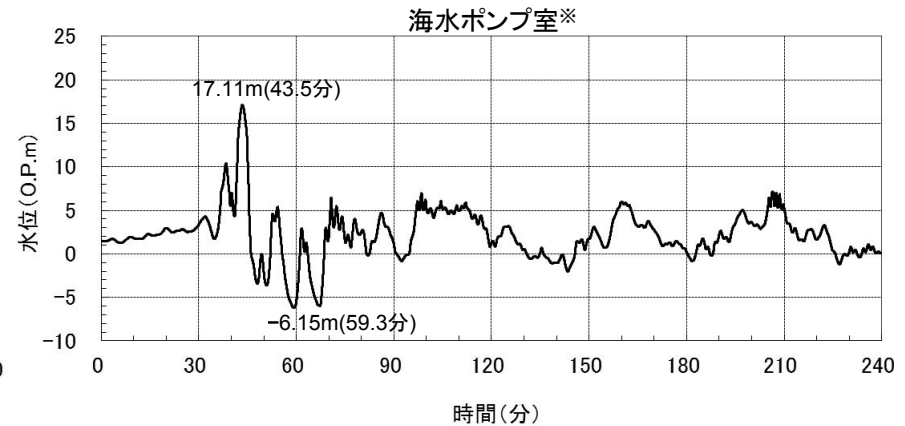
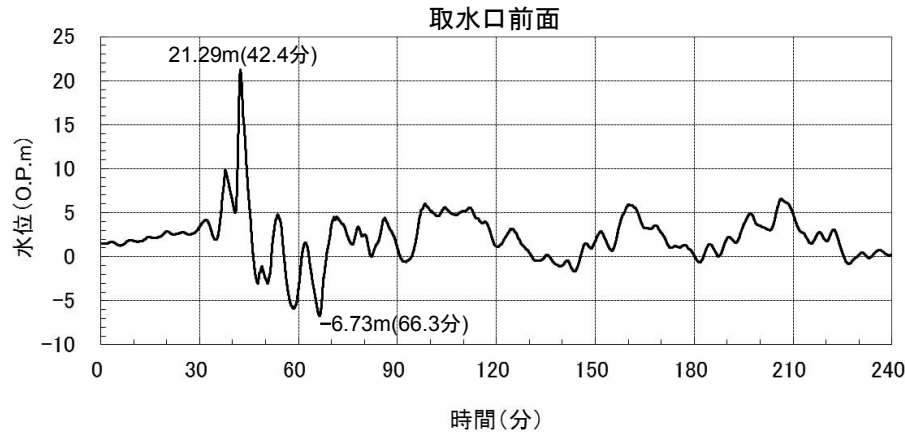
$$A_H \frac{dH_P}{dt} = Q_N - Q_P$$

H_P : 水位(m) Q_N : 流入量(m³/s) Q_P : ポンプ流量(m³/s)
 A_H : 海水ポンプ室内の水平面積(m²)

3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

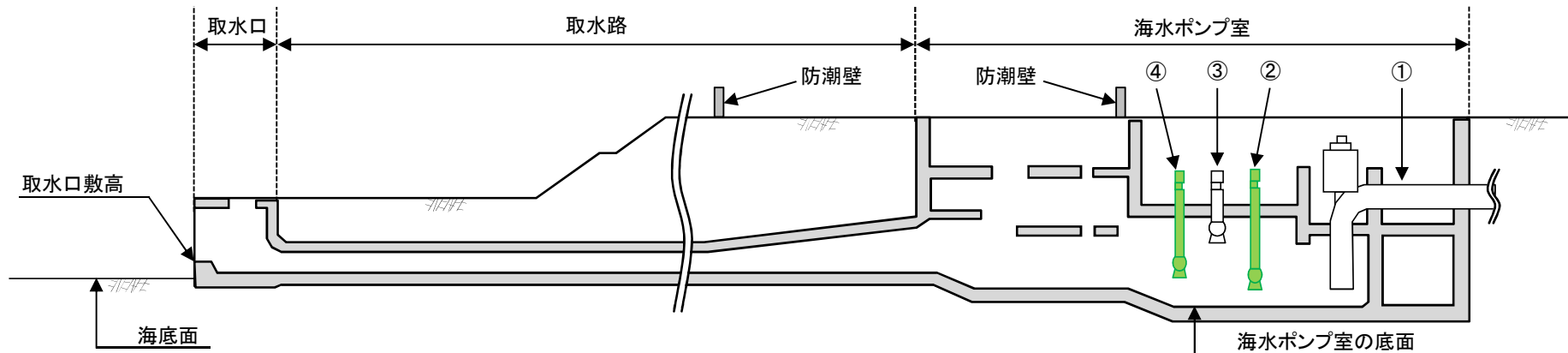
3.2 計算条件: 取水設備の水理特性を考慮した水位変動解析結果(基準津波(水位上昇側))

- 基準津波(水位上昇側)による取水口前面の水位時刻歴波形を用いて算定した海水ポンプ室の水位時刻歴波形を以下に示す。



※: 海水ポンプ室内の水平面積を鉛直方向に積算した水位-容積関係を用いて、海水ポンプ室内の津波の流入出量及びポンプ流量を考慮して算定した水位時刻歴波形(土木学会(2016))。

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ

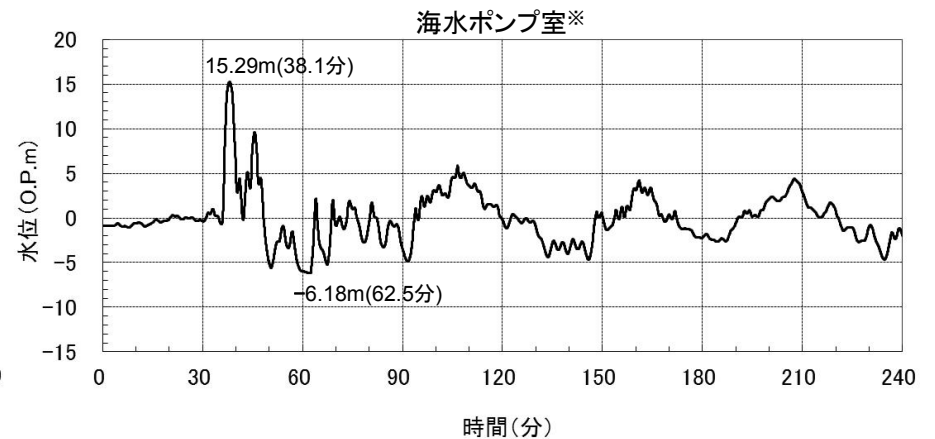
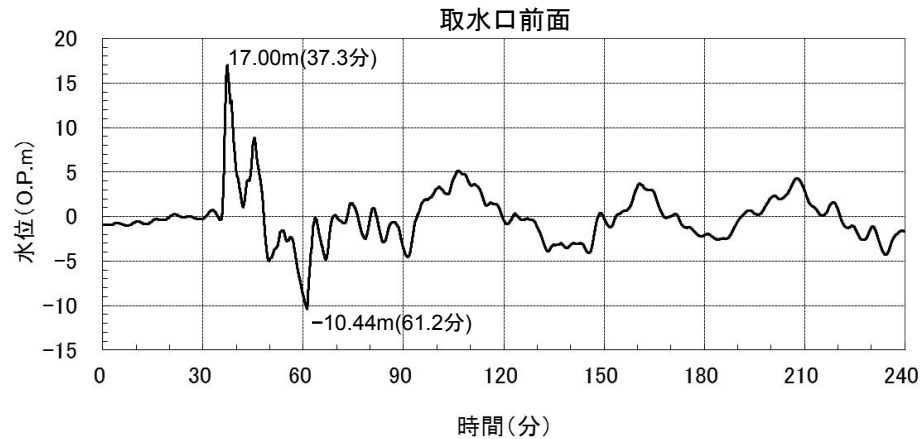


2号取水設備(概要)

3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

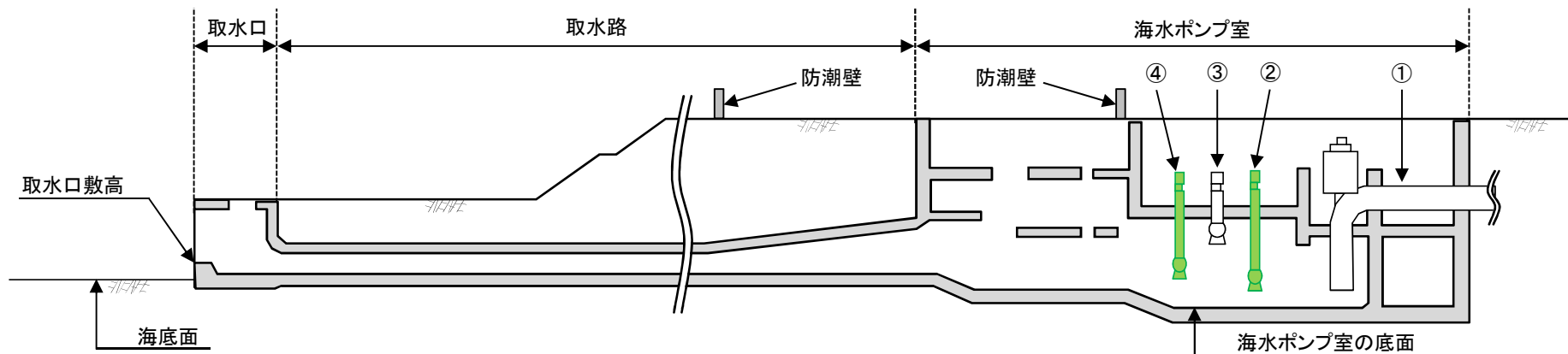
3.2 計算条件: 取水設備の水理特性を考慮した水位変動解析結果(基準津波(水位下降側))

- 基準津波(水位下降側)による取水口前面の水位時刻歴波形を用いて算定した海水ポンプ室の水位時刻歴波形を以下に示す。



※: 海水ポンプ室内の水平面積を鉛直方向に積算した水位-容積関係を用いて、海水ポンプ室内の津波の流入出量及びポンプ流量を考慮して算定した水位時刻歴波形(土木学会(2016))。

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ



2号取水設備(概要)

3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

3.3 評価結果

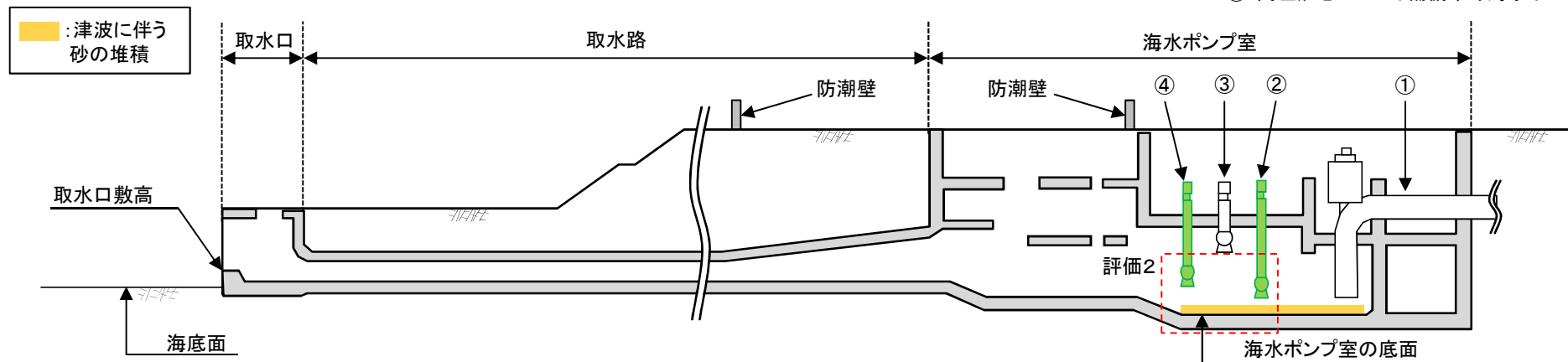
- 各非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さは最大で0.1m程度であり、各海水ポンプの高さを上回らない。
- 以上から、非常用海水ポンプの取水への影響は無いことを確認した。

評価結果

基準津波	浮遊砂体積濃度		高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ		原子炉補機冷却海水ポンプ	
	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	砂の堆積高さ (m)	海水ポンプの高さ (m)	砂の堆積高さ (m)	海水ポンプの高さ (m)
水位上昇側	高橋ほか(1999)	1%	0.05	2.45 ^{※1}	0.01	1.15 ^{※2}
水位下降側	高橋ほか(1999)	1%	0.10		0.02	

※1: 海水ポンプの下端: O.P.-9.95m, 海水ポンプ室底面: O.P.-12.4m
 ※2: 海水ポンプの下端: O.P.-11.25m, 海水ポンプ室底面: O.P.-12.4m

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ



評価内容と2号取水設備(概要)の関係

参考文献

参考文献

1. 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
2. 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅野大輔(1999):掃流砂層・浮遊砂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
3. 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998):GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.356-360
4. 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
5. 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002):原子力発電所の津波評価技術
6. 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.B2-65, No.1, pp.301-305
7. 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.213-216
8. 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
9. 森下祐・高橋智幸(2014):2011年東北地方太平洋沖地震津波襲来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
10. 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, 第2号, pp.149-155
11. 東北電力株式会社(2011):女川原子力発電所における平成23年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の調査結果に係る報告書, 2011年7月
12. 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水理実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.67, No.2, I_231-I_235
13. 千秋信一(1967):発電水力演習, 学献社
14. 社団法人土木学会(1999):水理公式集[平成11年版]
15. 社団法人電力土木技術協会(1995):火力・原子力発電所土木構造物の設計(増補改訂版)
16. 公益社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2016):原子力発電所の津波評価技術2016

補足説明資料

1. 設置変更許可申請時からの変更点について

補足説明資料

1. 設置変更許可申請時からの変更点について

■変更概要

- ・ 既往の検討事例を踏まえ、流砂量式、巻き上げ量の算定式等について以下のとおり変更した。

	藤井ほか(1998)		高橋ほか(1999)	
	申請時	今回変更	申請時	今回変更
流砂量式	小林ほか(1996)の実験式 $Q = 80 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	変更なし	高橋ほか(2011)の実験式 (d=0.166mmの場合) $Q = 5.6 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋ほか(1999)の実験式 $Q = 21 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
巻き上げ量の算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{\frac{-wD}{k_z}\right\} \right]}$	変更なし	高橋ほか(2011)の実験式 (d=0.166mmの場合) $E = 7.0 \times 10^{-5} \tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$	高橋ほか(1999)の実験式 $E = 0.012 \tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$
浮遊砂濃度上限値	1%	1%, 5%	1%	変更なし※

ここに、

Q : 単位幅, 単位時間当たりの掃流砂量 (m³/s/m) τ_* : シールズ数 $s := \sigma / \rho - 1$ σ : 砂の密度(kg/m³)
 ρ : 海水の密度(kg/m³) g : 重力加速度(m/s²) d : 砂の粒径(m) α : 局所的な外力のみに移動を支配される成分が全流砂量に占める比率
 w : 土粒子の沈降速度(m/s) λ : 空隙率 U : 流速(m/s) k_z : 鉛直拡散係数(m²/s) D : 全水深(m)

※: 影響評価として、浮遊砂濃度上限値を3%とした場合の評価を実施。詳細は、補足説明資料「4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価」に記載。

補足説明資料

2. 基準津波の策定

2. 1 策定方針	.....	44
2. 2 各津波の評価	.....	45
2. 3 基準津波の策定	.....	51

補足説明資料 2. 基準津波の策定

2.1 策定方針

【水位上昇側】

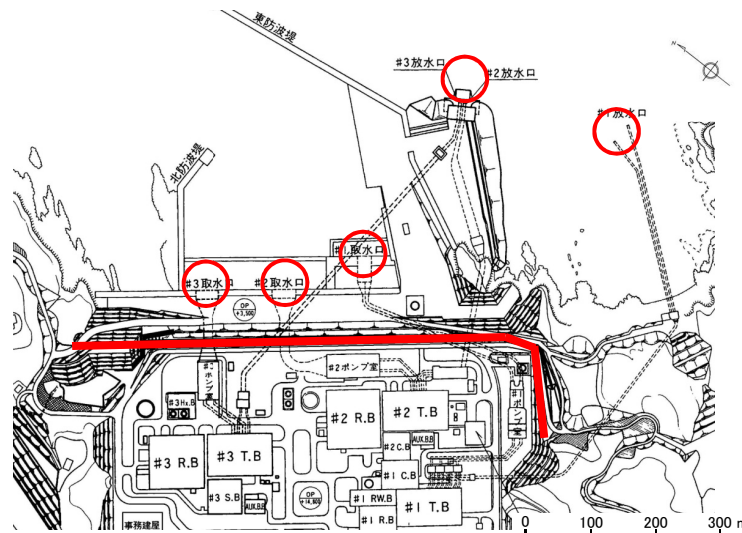
- ✓ 重要な安全機能を有する施設の設置された敷地 (O.P.約+13.8m) への基準津波の到達, 流入を防止するため, 津波防護施設 (防潮堤, 防潮壁) を設置することから, 「最大水位上昇量」に「地震に伴う沈下量」を考慮した相対的な津波水位の最大ケースを『基準津波 (水位上昇側)』とした。

【水位下降側】

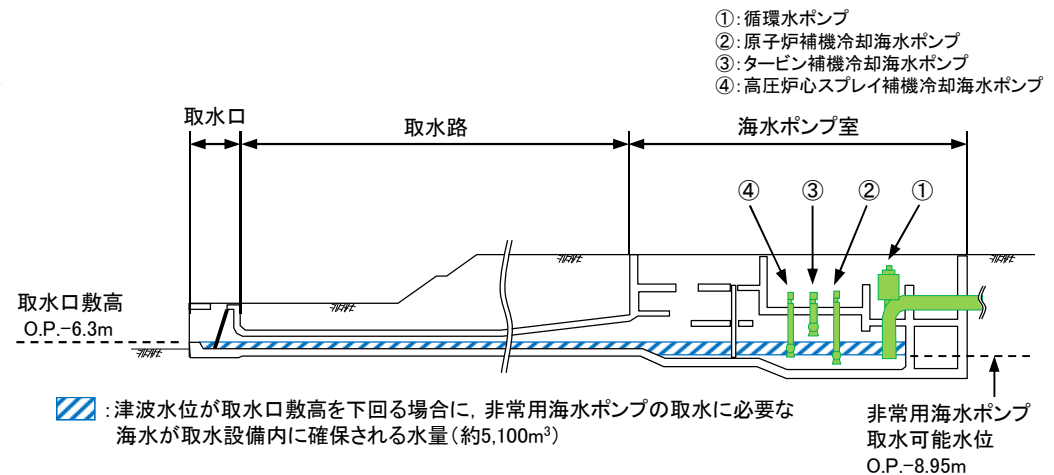
- ✓ 津波水位が取水口敷高を下回る場合における非常用海水ポンプの取水に必要な海水の貯留容量に関する評価, 津波による水位変動に伴う砂の移動・堆積及び漂流物に対する取水路の通水性に関する評価の観点から, 「最大水位下降量」に「地震に伴う隆起量」を考慮した相対的な津波水位の最大ケースを『基準津波 (水位下降側)』とした。

評価位置

評価項目	敷地前面	1号取水口前面	2号取水口前面	3号取水口前面	1号放水口前面	2・3号放水口前面
水位上昇側	○	○	○	○	○	○
水位下降側	—	—	○	—	—	—



評価位置 (平面図)



2号取水設備断面図 (概要)

2.2.1 水位上昇側:最大水位上昇量

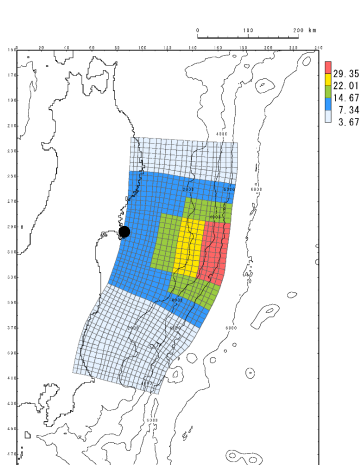
- 各津波の最大ケースの整理結果を下表に示す。
- 決定ケースは、「最大水位上昇量」に「地震に伴う沈下量」を考慮した相対的な津波水位上昇量が最大となる「東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③)」に起因する津波である。

上段 最大水位上昇量, []:地殻変動量(+:隆起, -:沈下)
下段 最大水位上昇量に地震に伴う沈下量を考慮した相対的な津波水位

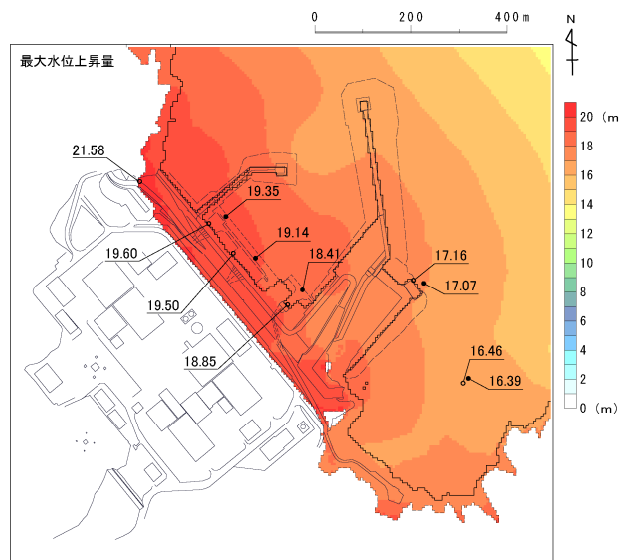
発生要因	種別	波源モデル		最大水位上昇量(m)					
				敷地前面	1号取水口前面	2号取水口前面	3号取水口前面	1号放水口前面	2・3号放水口前面
地震	プレート間地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル①	18.42 [-0.58]	17.33 [-0.58]	17.32 [-0.58]	17.15 [-0.58]	16.04 [-0.58]	16.20 [-0.58]
				19.00	17.91	17.90	17.73	16.62	16.78
			基準断層モデル②	18.86 [-0.77]	17.03 [-0.77]	17.40 [-0.77]	17.55 [-0.77]	15.50 [-0.77]	15.34 [-0.77]
		19.63		17.80	18.17	18.32	16.27	16.11	
		基準断層モデル③	21.58 [-0.72]	18.85 [-0.72]	19.50 [-0.72]	19.60 [-0.72]	16.46 [-0.72]	17.16 [-0.72]	
			22.30	19.57	20.22	20.32	17.18	17.88	
	津波地震	21.82 [+0.03]	17.21 [+0.03]	17.61 [+0.03]	17.20 [+0.03]	14.39 [+0.03]	15.01 [+0.03]		
		21.82	17.21	17.61	17.20	14.39	15.01		
	海洋プレート内地震	正断層型の地震	22.05 [-0.03]	12.92 [-0.03]	16.45 [-0.02]	15.12 [-0.03]	14.26 [-0.04]	12.74 [-0.03]	
			22.08	12.95	16.48	15.15	14.29	12.77	
海域の活断層による地殻内地震	F-6断層～F-9断層	1.2m(阿部(1989)の簡易予測式による推定津波高)							
地震以外	地すべり及び斜面崩壊	発電所へ与える影響は極めて小さい。							
	火山現象	発電所へ与える影響は極めて小さい。							
地震と地震以外に起因する津波の組合せ		地震以外に起因する津波が発電所へ与える影響は極めて小さいことから評価しない。							

2.2.1 水位上昇側:水位分布及び水位時刻歴波形

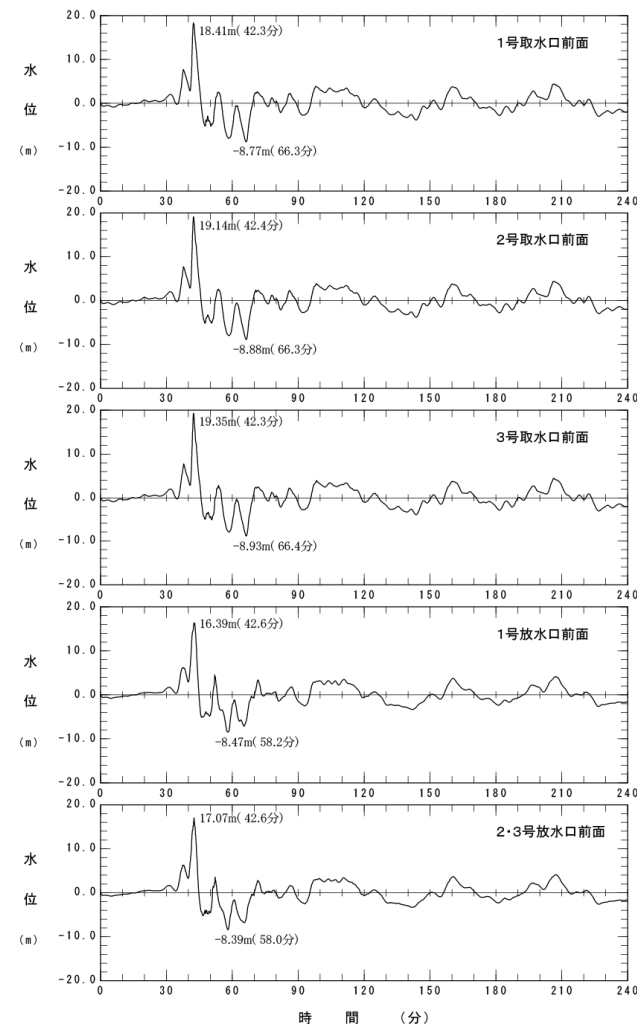
モデル	大すべり域・超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③)	基準	基準(同時破壊)	—



すべり量分布



最大水位上昇量分布



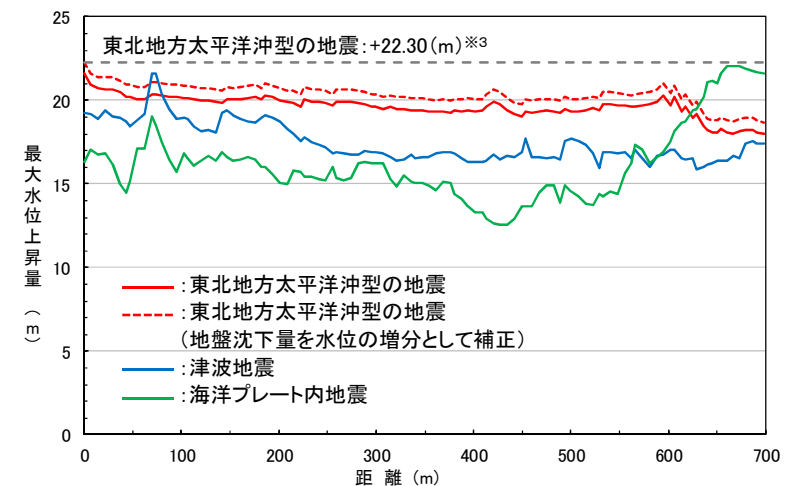
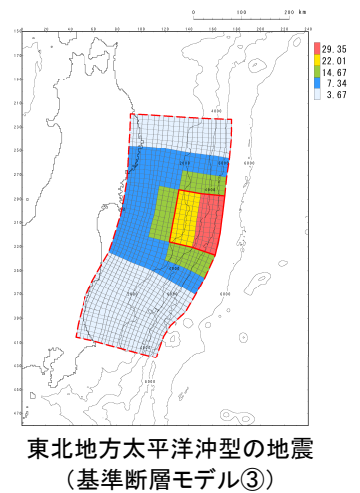
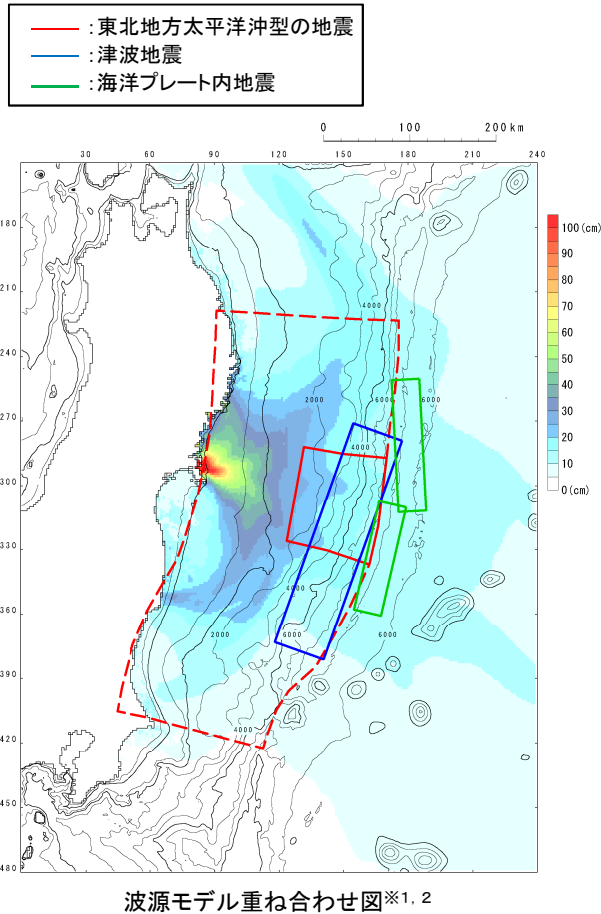
水位時刻歴波形※

※:水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出。

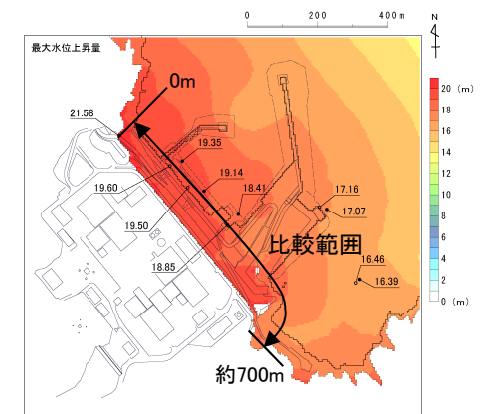
補足説明資料 2. 基準津波の策定 2.2 各津波の評価

2.2.1 水位上昇側:敷地前面における最大水位上昇量の比較

- 「東北地方太平洋沖型の地震」、「津波地震」及び「海洋プレート内地震」の敷地前面最大ケースを対象に、敷地前面における最大水位上昇量を比較した結果を下図に示す。



敷地前面における最大水位上昇量の比較



※1: 各地震の敷地前面最大ケース
 ※2: 背景は津波伝播特性の検討結果
 ※3: 最大水位上昇量(+21.58m)+地震に伴う地盤沈下量(-0.72m)=+22.30(m)

最大水位上昇量分布
(東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③))

補足説明資料 2. 基準津波の策定 2.2 各津波の評価
 2.2.2 水位下降側:最大水位下降量

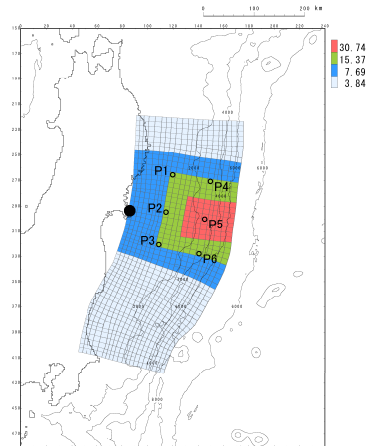
- 各津波の最大ケースの整理結果を下表に示す。
- 決定ケースは、「最大水位下降量」に「地震に伴う隆起量」を考慮した相対的な津波水位下降量が最大となる「東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル②)」に起因する津波である。

上段 最大水位下降量, []:地殻変動量(+:隆起, -:沈下)
 下段 最大水位下降量に地震に伴う隆起量を考慮した相対的な津波水位

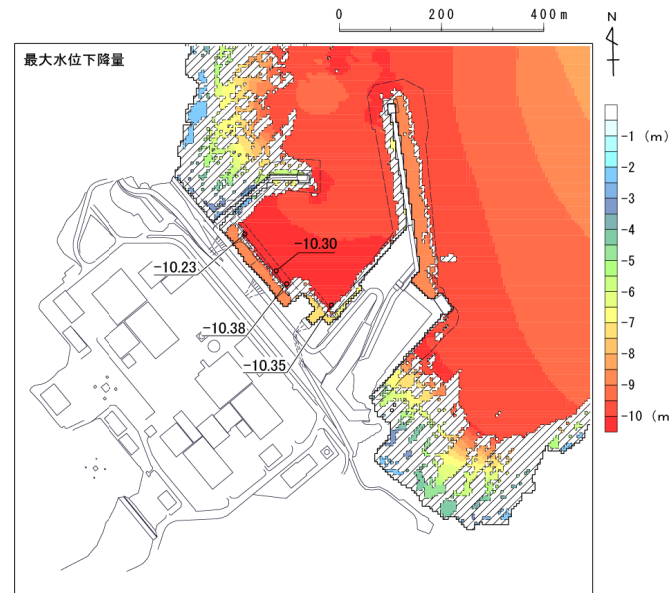
発生要因	種別	波源モデル	2号取水口前面		
			最大水位下降量(m)	継続時間(分)	
地震	プレート間地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル①	-10.22 [-0.58] -10.22	2.6
			基準断層モデル②	-10.38 [-0.77] -10.38	
			基準断層モデル③	-9.78 [-0.72] -9.78	
		津波地震		-9.17 [+0.03] -9.20	1.9
		海洋プレート内地震	正断層型の地震	-10.13 [±0.00] -10.13	2.6
	海域の活断層による地殻内地震	F-6断層～F-9断層	-1.2m(阿部(1989)の簡易予測式による推定津波高)		
地震以外	地すべり及び斜面崩壊	発電所へ与える影響は極めて小さい。			
	火山現象	発電所へ与える影響は極めて小さい。			
地震と地震以外に起因する津波の組合せ			地震以外に起因する津波が発電所へ与える影響は極めて小さいことから評価しない。		
2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間			約26		

補足説明資料 2. 基準津波の策定 2.2 各津波の評価
2.2.2 水位下降側:水位分布及び水位時刻歴波形

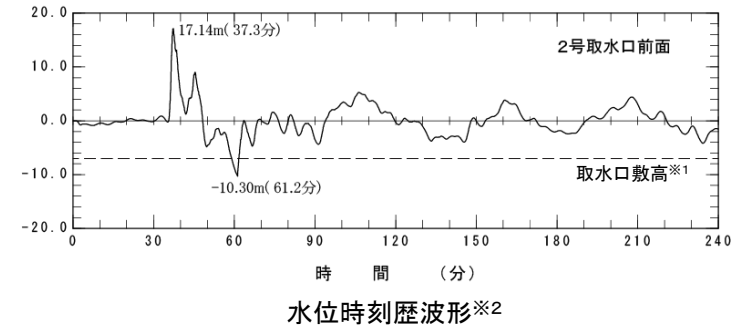
モデル	大すべり域・超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル②)	基準	P5	1.0(km/s)



すべり量分布, 破壊開始点位置



最大水位下降量分布



※1: T.P.-7.04m(O.P.-6.3m)

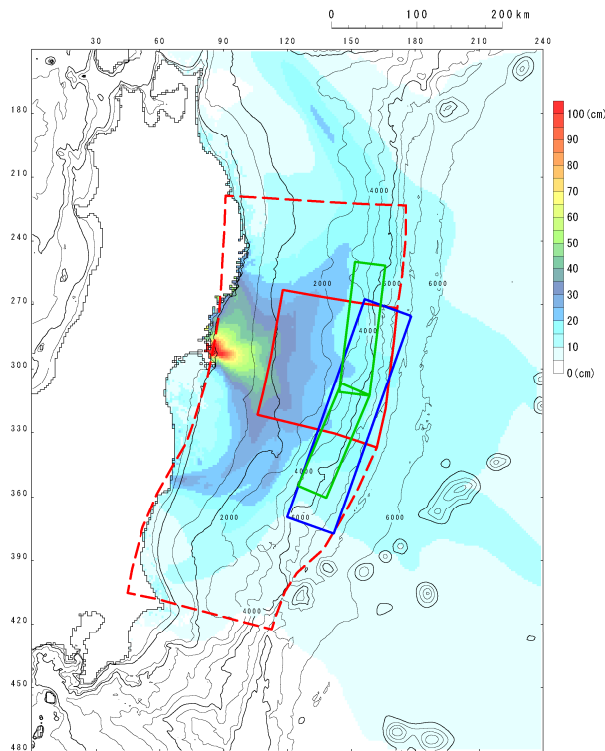
※2: 水位時刻歴波形は, 2号取水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出。

補足説明資料 2. 基準津波の策定 2.2 各津波の評価

2.2.2 水位下降側:取水口前面における最大水位下降量の比較

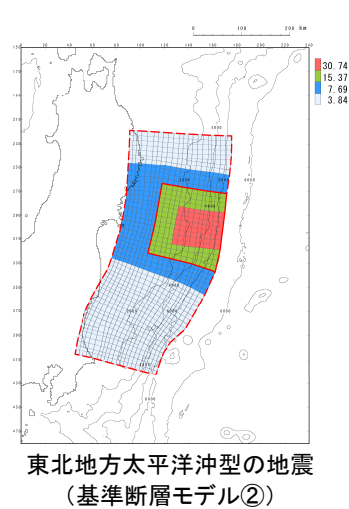
- 「東北地方太平洋沖型の地震」, 「津波地震」及び「海洋プレート内地震」の2号取水口前面最大ケースを対象に, 取水口前面における最大水位下降量を比較した結果を下図に示す。

— : 東北地方太平洋沖型の地震
— : 津波地震
— : 海洋プレート内地震

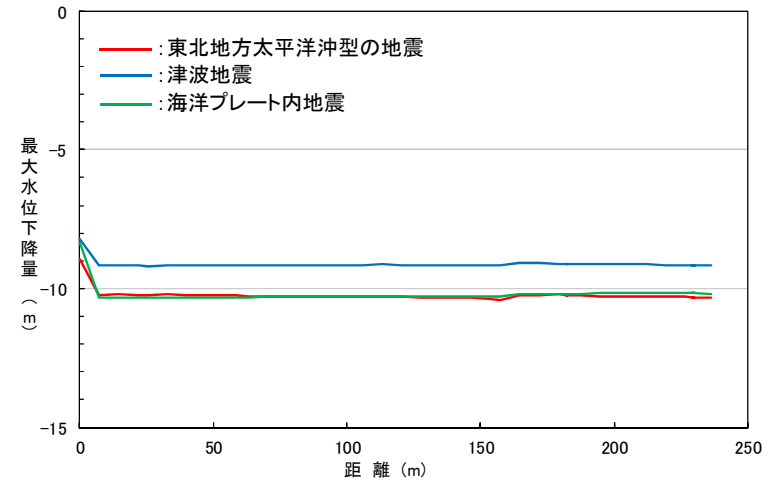


波源モデル重ね合わせ図※1, 2

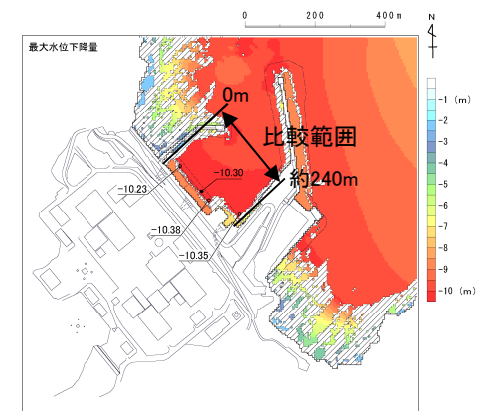
※1: 各地震の2号取水口前面最大ケース
※2: 背景は津波伝播特性の検討結果



東北地方太平洋沖型の地震
(基準断層モデル②)



取水口前面における最大水位下降量の比較



最大水位下降量分布
(東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル②))

補足説明資料 2. 基準津波の策定 2.3 基準津波の策定
2.3.1 基準津波の策定

- 各津波の評価結果を踏まえ、発電所に与える影響が最も大きい「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波を基準津波とした。

■基準津波(水位上昇側)

発生要因	種別	波源モデル	最高水位 (敷地前面)
地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル③	O.P.+23.1m ^{※1}

※1:最大水位上昇量(+21.58m)に、朔望平均満潮位(O.P.+1.43m)を考慮した水位

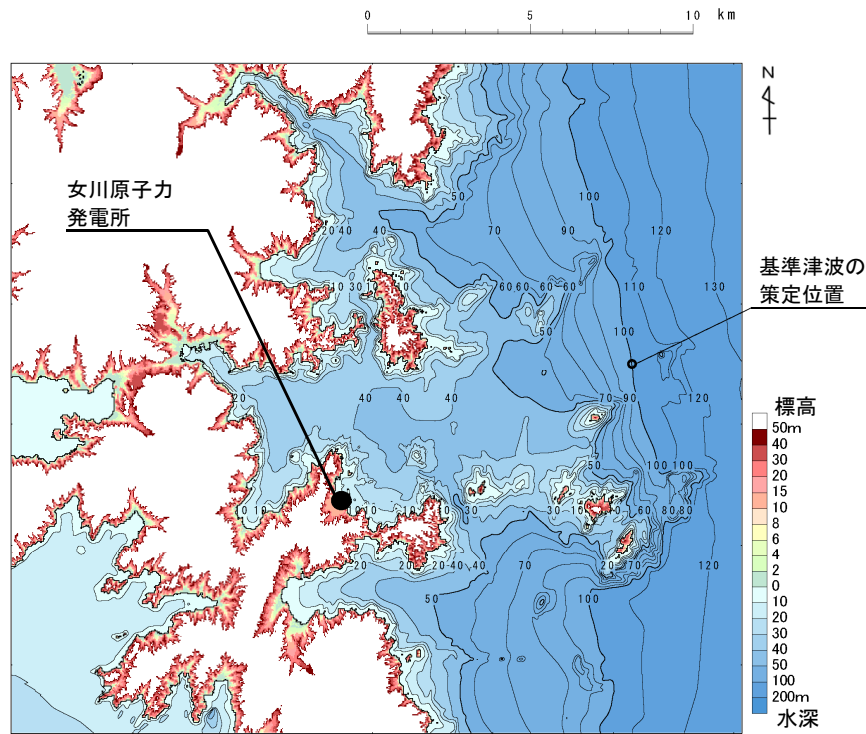
■基準津波(水位下降側)

発生要因	種別	波源モデル	最低水位 (2号取水口前面)
地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル②	O.P.-10.6m ^{※2}

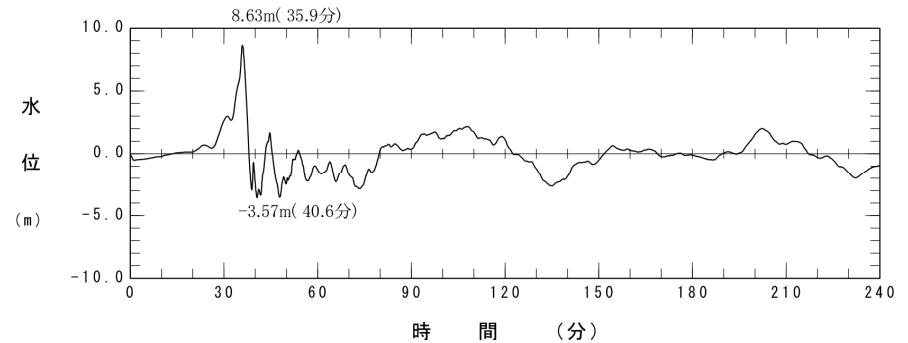
※2:最大水位下降量(-10.38m)に、朔望平均干潮位(O.P.-0.14m)を考慮した水位

補足説明資料 2. 基準津波の策定 2.3 基準津波の策定
2.3.2 基準津波策定位置における水位時刻歴波形

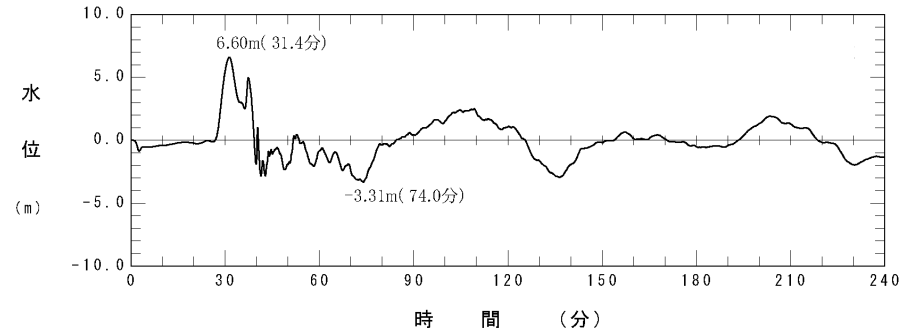
- 基準津波は、敷地前面の海底地形の特徴を踏まえ、時刻歴波形に対して施設からの反射波の影響が微小となるよう、敷地から沖合へ約10km離れた位置(水深100m)で策定した。



基準津波の策定位置



基準津波(水位上昇側)
(東北地方太平洋沖型の地震, 基準断層モデル③)



基準津波(水位下降側)
(東北地方太平洋沖型の地震, 基準断層モデル②)

補足説明資料

3. 高橋ほか(1999)の手法に関する補足資料

- 3. 1 高橋ほか(1999)の適用範囲と浮遊砂濃度上限について 55
- 3. 2 高橋ほか(1999)と高橋ほか(2011)の掃流砂量・巻き上げ量の比較 56

余白

補足説明資料 3. 高橋ほか(1999)の手法に関する補足資料

3.1 高橋ほか(1999)の適用範囲と浮遊砂濃度上限について

- 高橋ほか(1999)では、掃流砂量及び巻き上げ量の測定実験が行われ、シールズ数(無次元掃流力)で整理されており、実験範囲はシールズ数が概ね0.2~1程度となっている。
- 高橋ほか(2012)によれば、高橋ほか(1999)の手法において、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ため、浮遊砂濃度の上限を便宜的に導入しているとされている。

高橋ほか(1999)による掃流砂量とシールズ数の関係

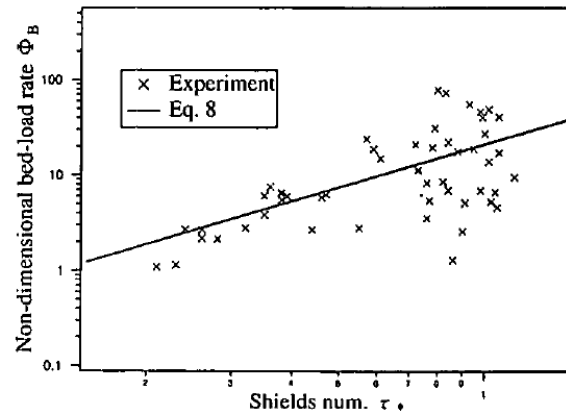


図-4 実験から求めた掃流砂量とシールズ数の関係

高橋ほか(1999)による巻き上げ砂量とシールズ数の関係

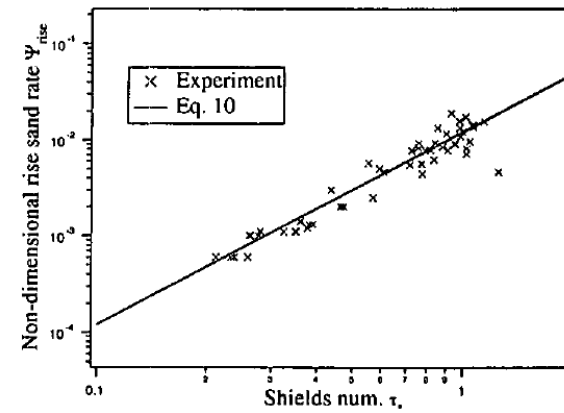


図-5 実験から求めた巻き上げ砂量とシールズ数の関係

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。

- ・ 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、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、浮遊砂濃度が增大する。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には浮遊砂が希薄であるため問題にならないが、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。

- ・ 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もある。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。

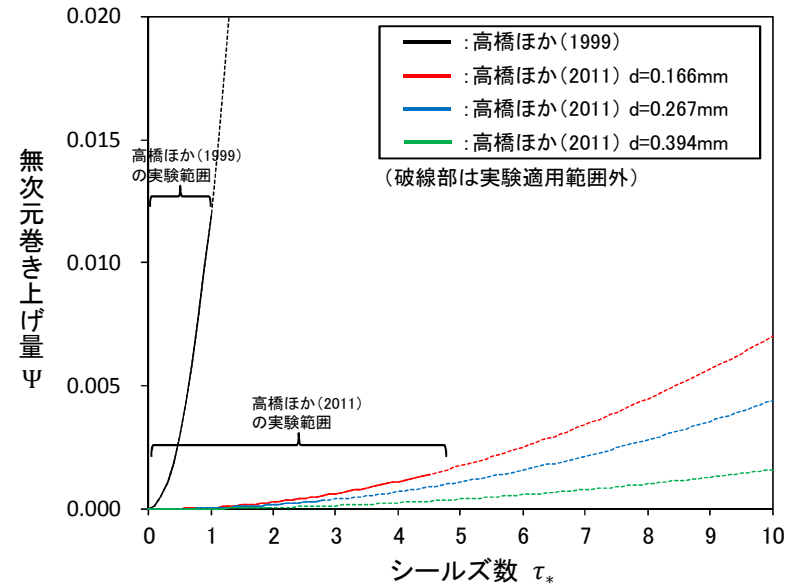
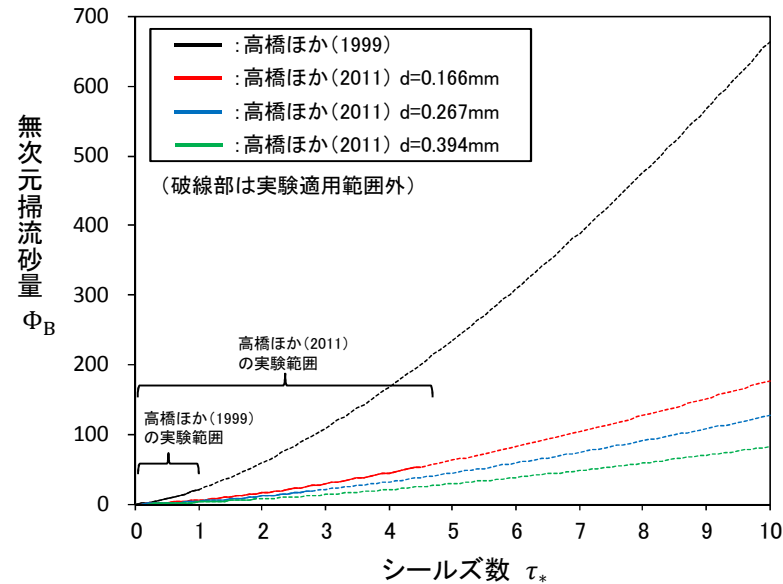
・ 固定床計算領域(流水のみを計算する領域)と移動床計算領域(流水と流砂の両方を計算する領域)の境界条件が確立されていない。特に浅海域では流砂量の不連続が生じて、計算の不安定性を招きやすいため、物理的な境界条件の検討と計算スキームの改良が必要である。

高橋ほか(2012)に一部加筆

補足説明資料 3. 高橋ほか(1999)の手法に関する補足資料

3.2 高橋ほか(1999)と高橋ほか(2011)の掃流砂量・巻き上げ量の比較

- 掃流砂量及び巻き上げ量の算定式の係数について、高橋ほか(1999)はシールズ数が概ね1以下の実験結果であるのに対し、高橋ほか(2011)はシールズ数が概ね1~5程度の実験結果であり、シールズ数が大きくなるほど両者の乖離が顕著に大きくなる。
- 上記について、高橋ほか(2011)によれば、高橋ほか(1999)は、ヘッドタンクから細い円管で水路内に導く際の整流化が十分ではなかった等の問題の可能性があるとしている。



評価手法	無次元掃流砂量
高橋ほか(1999)	$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 21\tau_*^{1.5}$
高橋ほか(2011) d=0.166mm	$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 5.6\tau_*^{1.5}$
高橋ほか(2011) d=0.267mm	$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 4.0\tau_*^{1.5}$
高橋ほか(2011) d=0.394mm	$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 2.6\tau_*^{1.5}$

評価手法	無次元巻き上げ量
高橋ほか(1999)	$\Psi = \frac{q_s}{\sqrt{sgd}} = 0.012\tau_*^2$
高橋ほか(2011) d=0.166mm	$\Psi = \frac{q_s}{\sqrt{sgd}} = 7.0 \times 10^{-5}\tau_*^2$
高橋ほか(2011) d=0.267mm	$\Psi = \frac{q_s}{\sqrt{sgd}} = 4.4 \times 10^{-5}\tau_*^2$
高橋ほか(2011) d=0.394mm	$\Psi = \frac{q_s}{\sqrt{sgd}} = 1.6 \times 10^{-5}\tau_*^2$

ここに、 Φ_B : 無次元掃流砂量 q_B : 掃流砂量 Ψ : 無次元巻き上げ量 q_s : 巻き上げ量 τ_* : シールズ数 $s := \sigma / \rho - 1$ σ : 砂の密度(kg/m³) ρ : 海水の密度(kg/m³) g : 重力加速度(m/s²) d : 砂の粒径(m)

補足説明資料

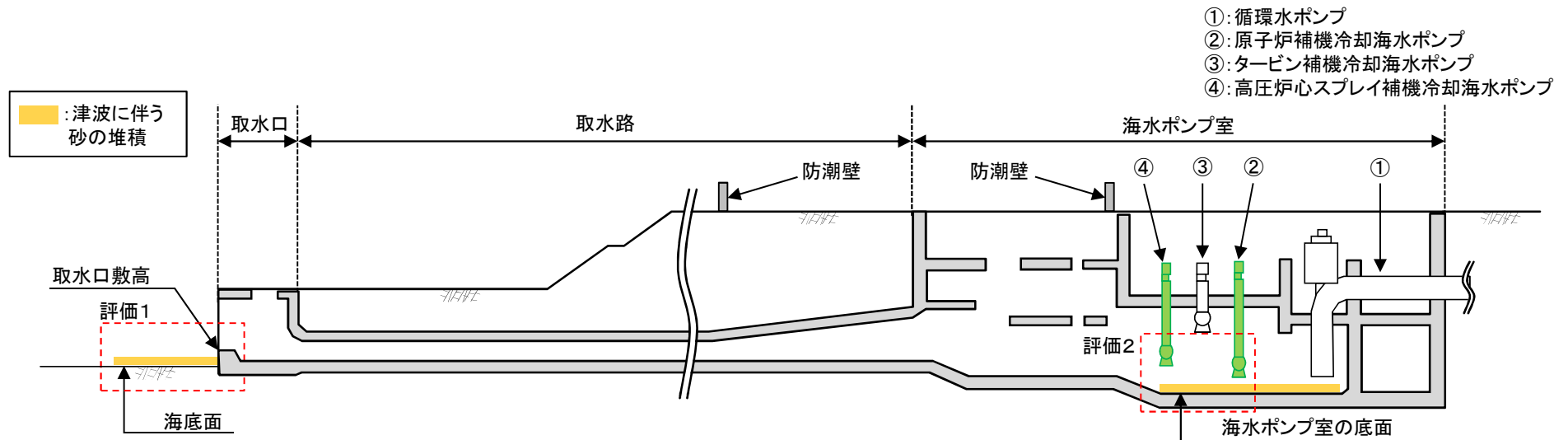
4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4. 1	評価方針	58
4. 2	浮遊砂濃度上限値の設定	59
4. 3	海底地形変化	60
4. 4	海水ポンプ室内における砂の堆積	69
4. 5	まとめ	71

補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.1 評価方針

- 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度上限値を3%とした場合の非常用海水ポンプの取水に及ぼす影響を確認するため、基準津波に伴う砂移動(海底地形変化)(下図:評価1)及び2号海水ポンプ室内における砂の堆積高さ(下図:評価2)を評価した。
- 浮遊砂濃度上限値3%の設定根拠を次頁に示す。



評価内容と2号取水設備(概要)の関係

取水口高さ, 非常用海水ポンプの高さ

		設定値	備考			
取水口高さ		1.20m	取水口敷高: O.P.-6.3m, 海底面: O.P.-7.5m			
非常用海水ポンプの高さ	原子炉補機冷却海水ポンプ	1.15m	海水ポンプの下端	O.P.-11.25m	海水ポンプ室の底面	O.P.-12.4m
	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ	2.45m		O.P.-9.95m		

補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.2 浮遊砂濃度上限値の設定

- 高橋ほか(1999)の砂移動評価に関する文献調査, 並びに発電所周辺における3.11地震津波による砂移動の再現解析結果を踏まえ, 浮遊砂濃度上限値1%を基本とし, 各検証箇所(各検証津波)(下表)を再現する浮遊砂濃度上限値を上回る3%を影響評価用の設定値とした。

■文献調査(p12再掲)

- ✓ 上限値5%の検証結果から, 浮遊砂濃度上限値5%は過大評価になると考えられる。
- ✓ 上限値1%の検証結果から, 浮遊砂濃度上限値1%は妥当な設定値であると考えられる。

文献調査結果

検証箇所 (検証津波)	文献	計算使用 砂粒径	計算格子 間隔	浮遊砂濃度 上限値	浮遊砂濃度上限値に関する評価
気仙沼湾 (1960年チリ津波)	玉田ほか (2009)	0.001~ 1mm	25m, 5m	1%, 5%	・ 計算格子間隔5mの場合, 浮遊砂濃度上限値5%は実績値より浸食深を過大に評価
八戸港 (1960年チリ津波)	藤田ほか (2010)	0.26mm	10.3m	1%, 2%, 5%	・ 浮遊砂濃度上限値5%は過大に評価 ・ 浮遊砂濃度上限値1%, 2%の場合の再現性が良好
宮古湾 (3.11地震津波)	近藤ほか (2012)	0.08mm	10m	1%	・ 土砂移動の全体的な傾向は良く一致 ・ 防波堤堤頭部の最大洗掘深や断面地形も定量的に概ね良く一致
気仙沼湾 (3.11地震津波)	森下・ 高橋(2014)	0.3mm	10m	1% 可変※	・ 砂移動評価に影響を及ぼす因子として, 無次元掃流力, 流砂量式係数, 飽和浮遊砂濃度の3つを抽出 ・ 上記3つの因子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 ・ 飽和浮遊砂濃度については, 摩擦速度の関数とすることで再現性の向上に繋がることを示唆

※: 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), $\alpha = 0.01$)

補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.3 海底地形変化: 評価結果

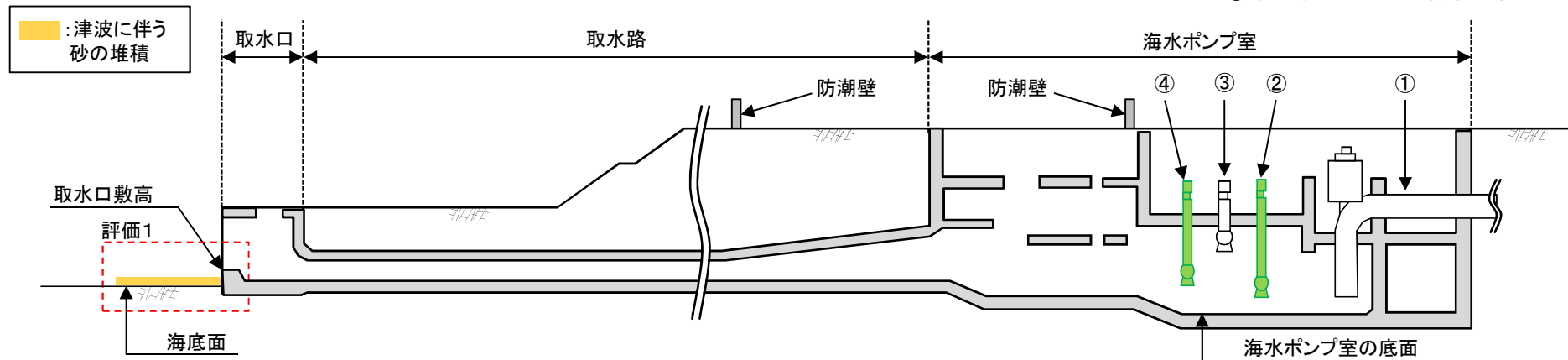
- ・ 2号取水口前面における砂の堆積高さは最大で0.5m程度であり、取水口高さを上回らない。
- ・ 以上から、非常用海水ポンプの取水への影響は無いことを確認した。
- ・ 各検討ケースの最大堆積厚分布、2号取水口前面における海底地形変化量の時刻歴データ及び水位、浮遊砂体積濃度のスナップショット等を次頁以降に示す。

評価結果

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	2号取水口前面における 砂の堆積高さ(m)	取水口高さ (m)
水位上昇側	高橋ほか(1999)	3%	0.45	1.20※
水位下降側	高橋ほか(1999)	3%	0.37	

※: 取水口敷高: O.P.-6.3m, 海底面: O.P.-7.5m

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレィ補機冷却海水ポンプ



評価内容と2号取水設備(概要)の関係

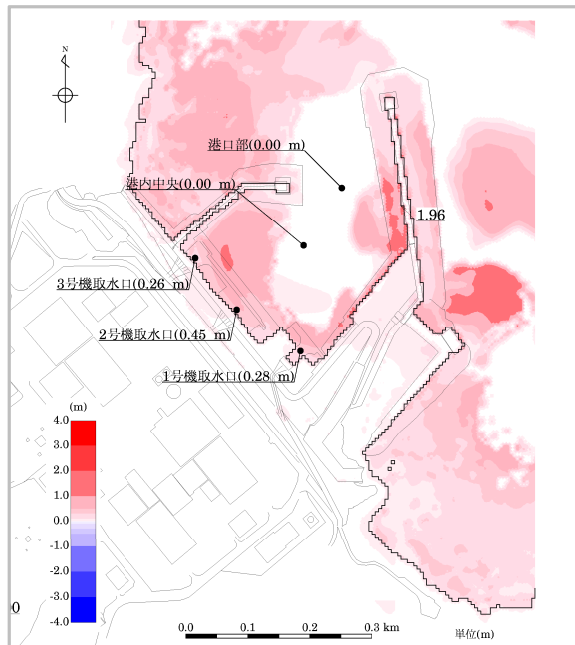
補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.3 海底地形変化: 評価結果 基準津波(水位上昇側)①

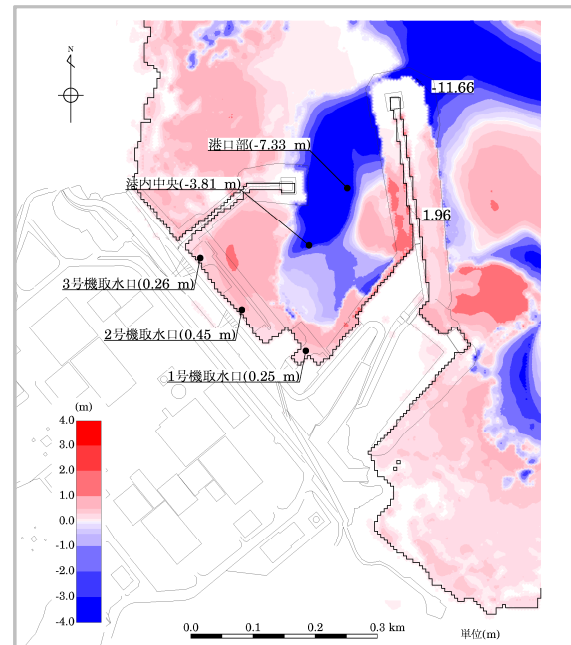
コメントNo.160

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位上昇側	高橋ほか(1999)	3%

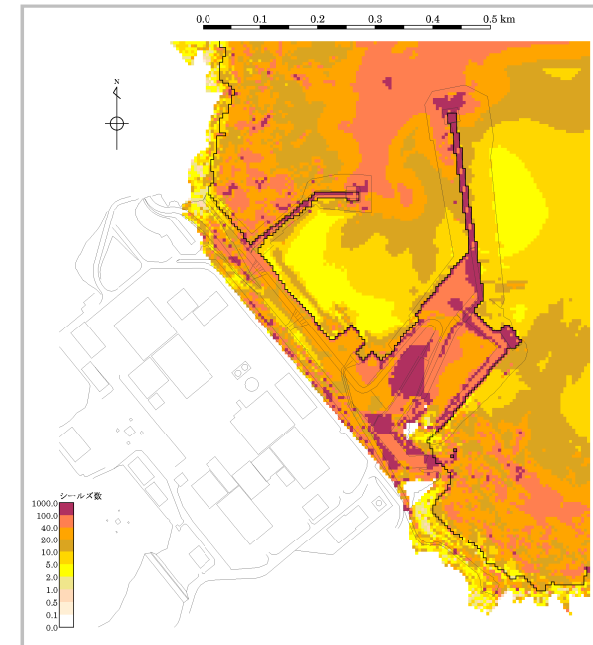
■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布, 最大シールズ数の空間分布



最大堆積厚分布



4時間後の海底地形変化量分布



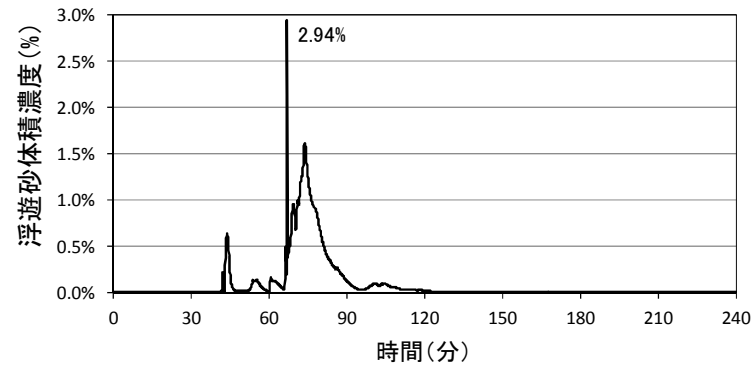
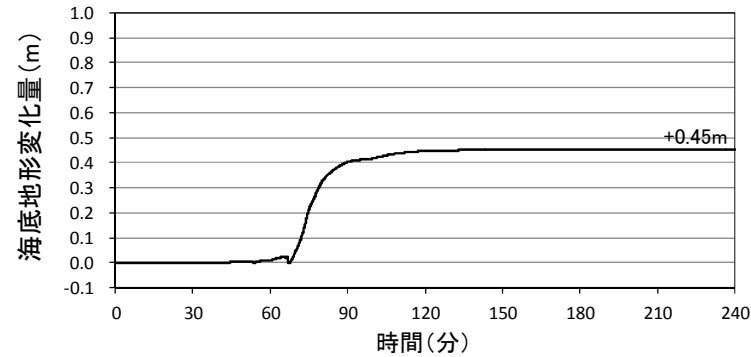
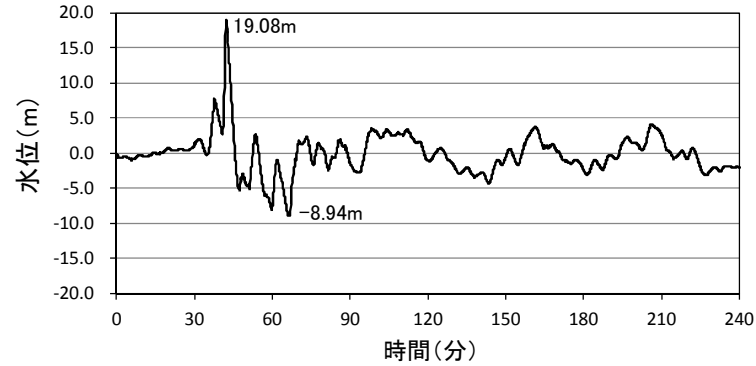
最大シールズ数の空間分布

補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.3 海底地形変化: 評価結果 基準津波(水位上昇側)②

■ 2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

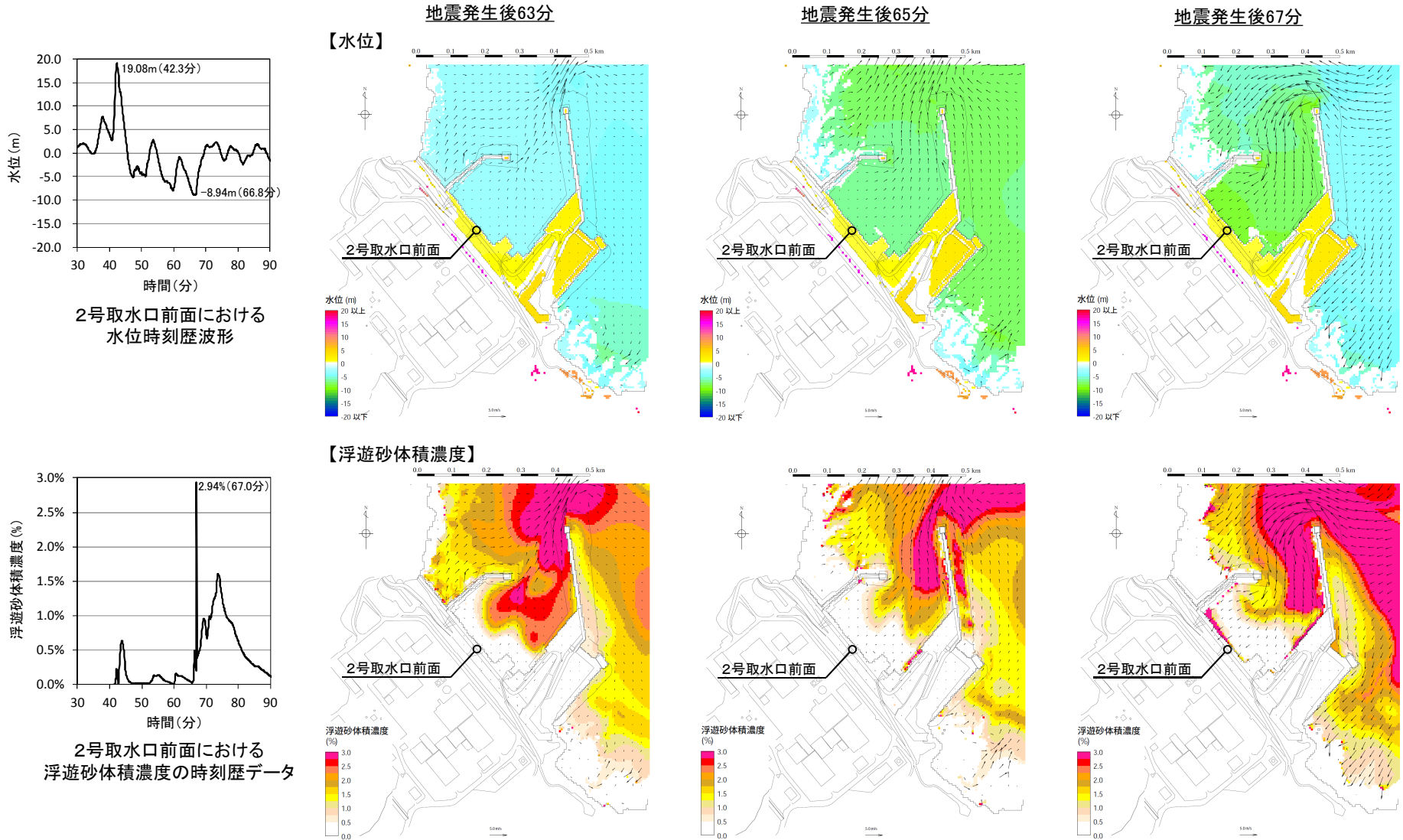
【高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値: 3%】



4.3 海底地形変化:評価結果 基準津波(水位上昇側)③

■高橋ほか(1999):水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後63分~71分)①

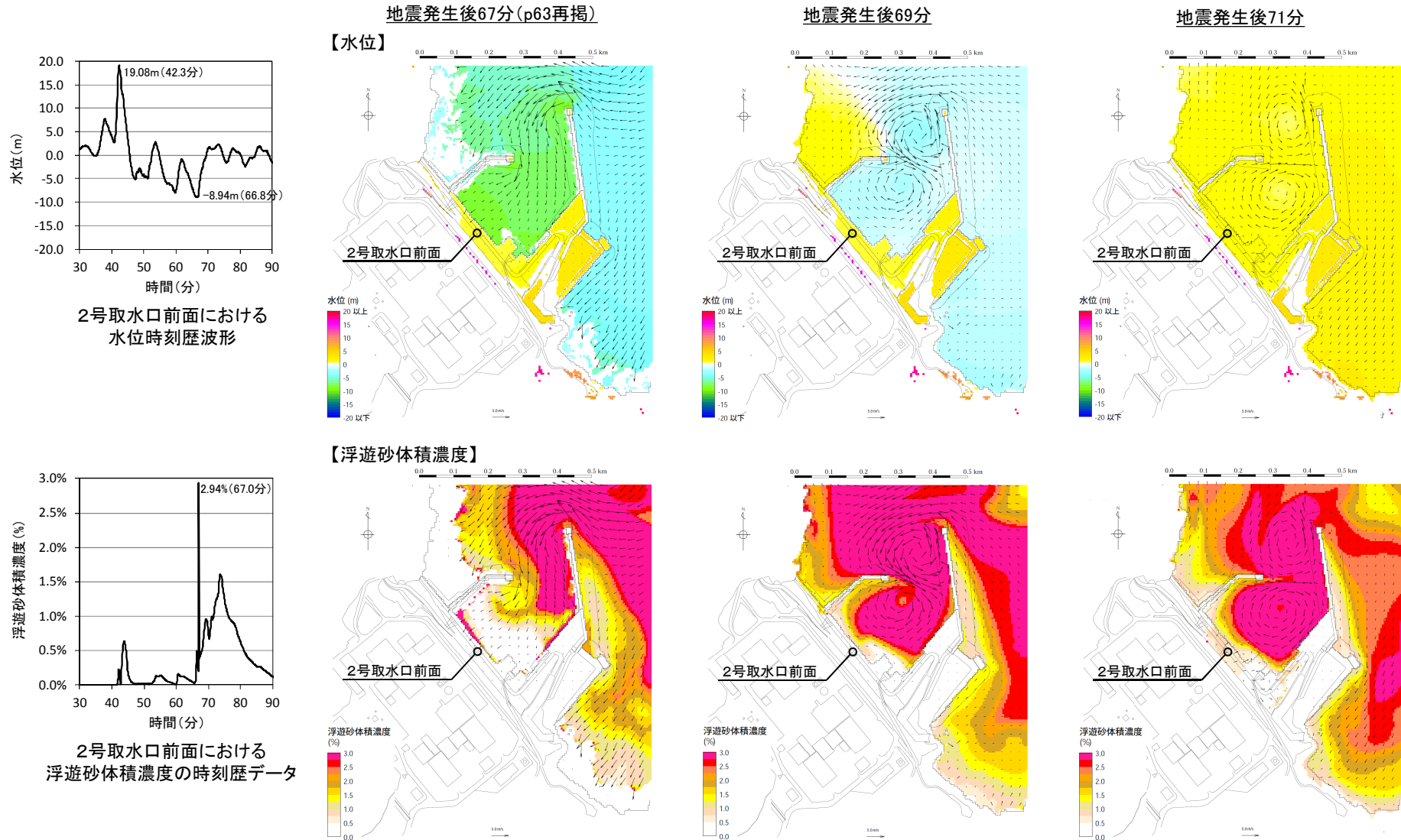
- ・ 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約67分前後の水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショットを以下に示す。
- ・ 水位低下時(63分~65分)に沖合いへ移動した濃度が高い浮遊砂が, 水位上昇時に敷地方向へ移動し, 2号取水口前面における浮遊砂体積濃度が高くなるが(67分), その後, 津波は港湾内で渦状になりながら水位上昇するため, 2号取水口前面の浮遊砂体積濃度は低くなっていく(69分~71分(次頁記載))。



補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.3 海底地形変化:評価結果 基準津波(水位上昇側)③

■高橋ほか(1999):水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後63分~71分)②



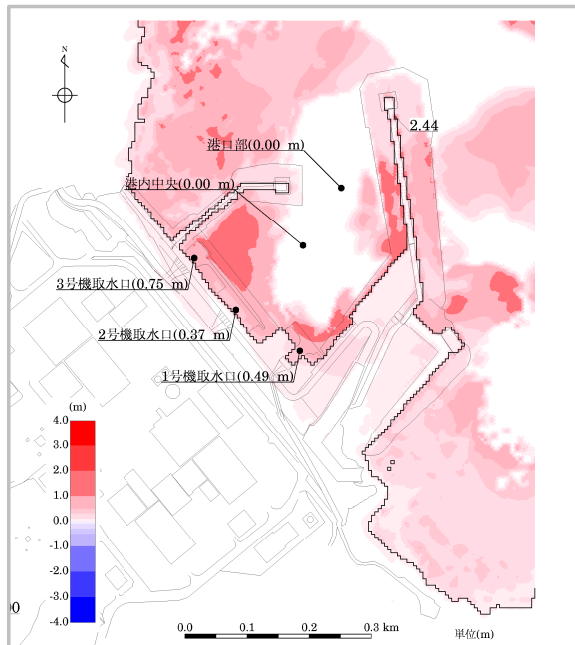
補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.3 海底地形変化: 評価結果 基準津波(水位下降側)①

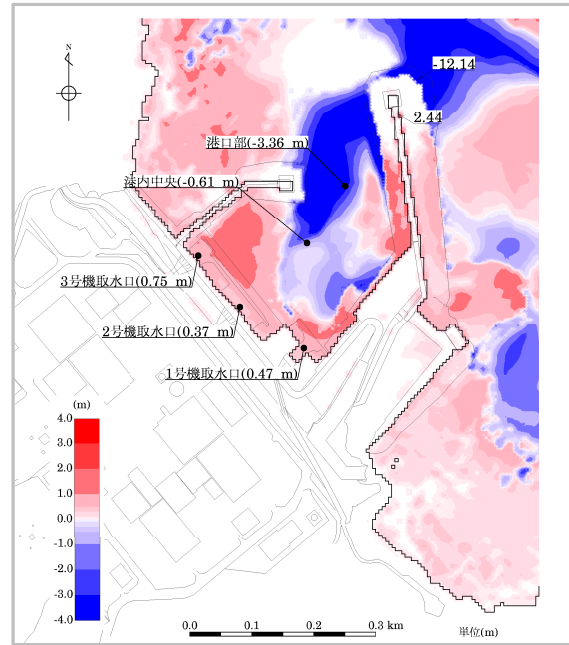
コメントNo.160

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位下降側	高橋ほか(1999)	3%

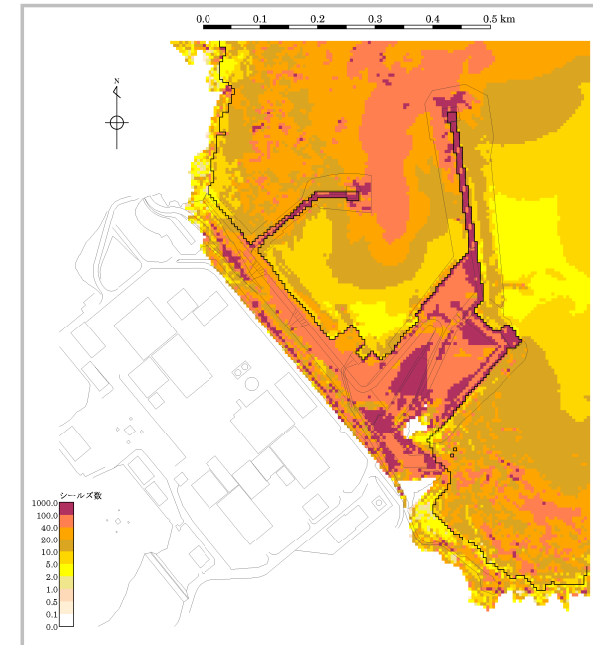
■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布, 最大シールズ数の空間分布



最大堆積厚分布



4時間後の海底地形変化量分布



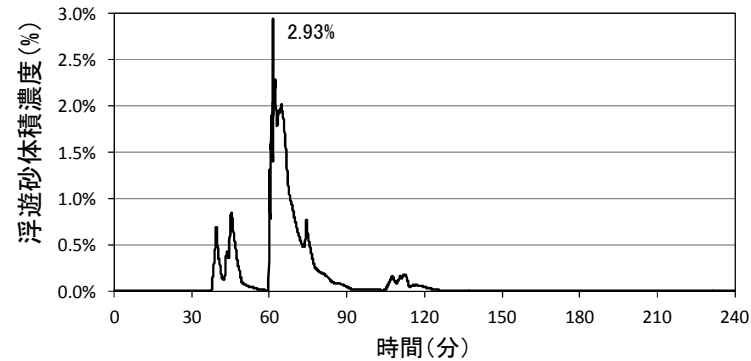
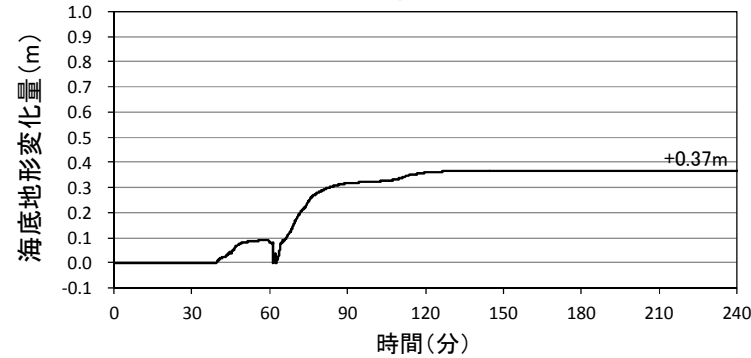
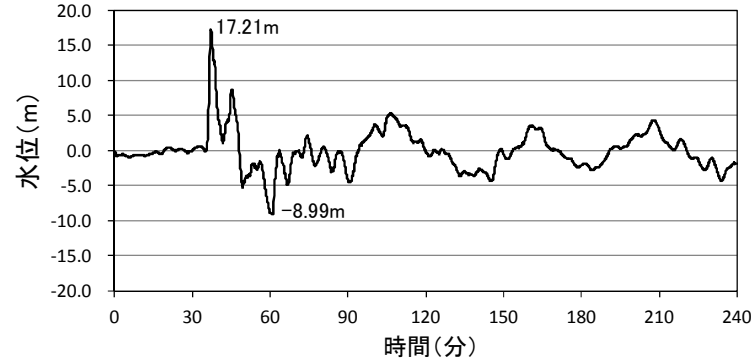
最大シールズ数の空間分布

補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.3 海底地形変化: 評価結果 基準津波(水位下降側)②

■2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

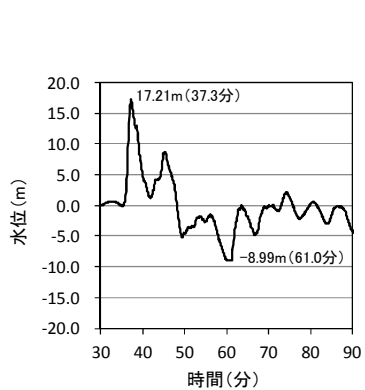
【高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値: 3%】



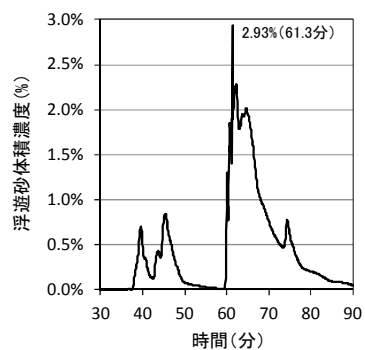
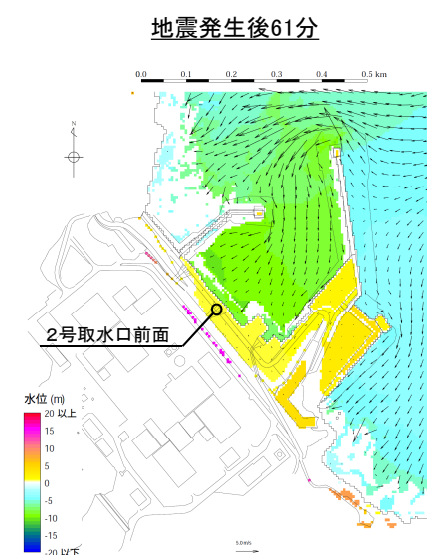
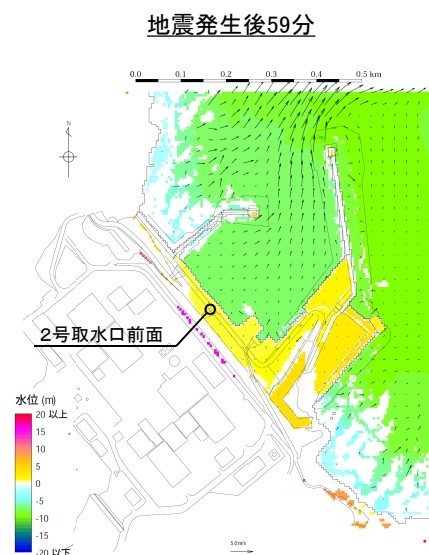
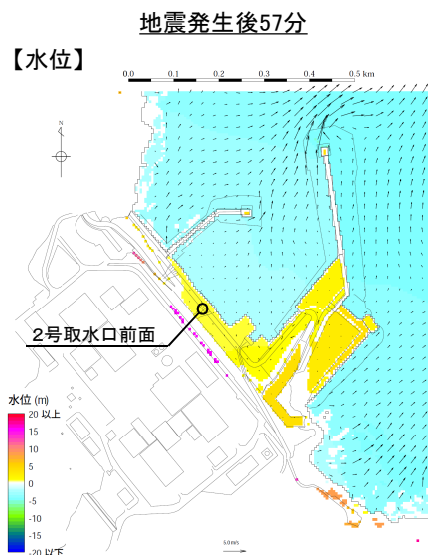
4.3 海底地形変化:評価結果 基準津波(水位下降側)③

■高橋ほか(1999):水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後57分~65分)①

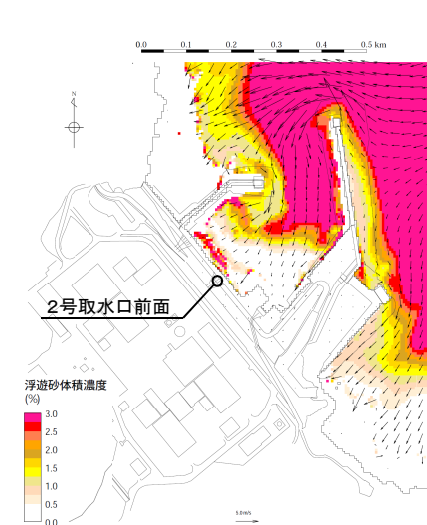
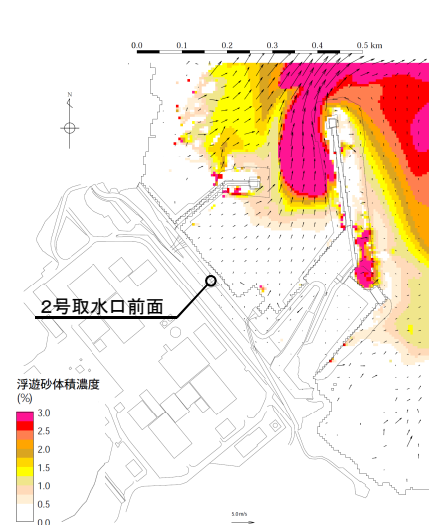
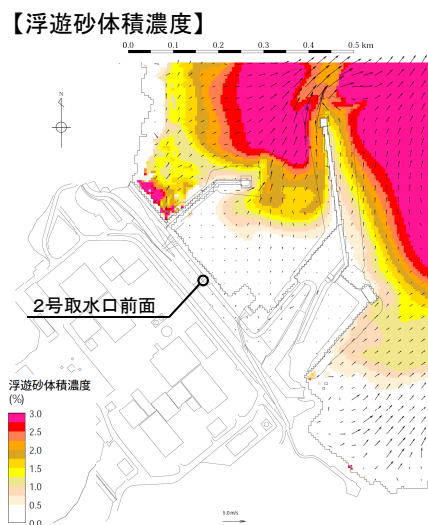
- ・ 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約61分前後の水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショットを以下に示す。
- ・ 水位低下時(57分~59分)に沖合いへ移動した濃度が高い浮遊砂が, 水位上昇時に敷地方向へ移動し, 2号取水口前面における浮遊砂体積濃度が高くなるが(61分), その後, 津波は港湾内で渦状になりながら水位上昇するため, 2号取水口前面の浮遊砂体積濃度は低くなっていく(63分~65分(次頁記載))。



2号取水口前面における
水位時刻歴波形



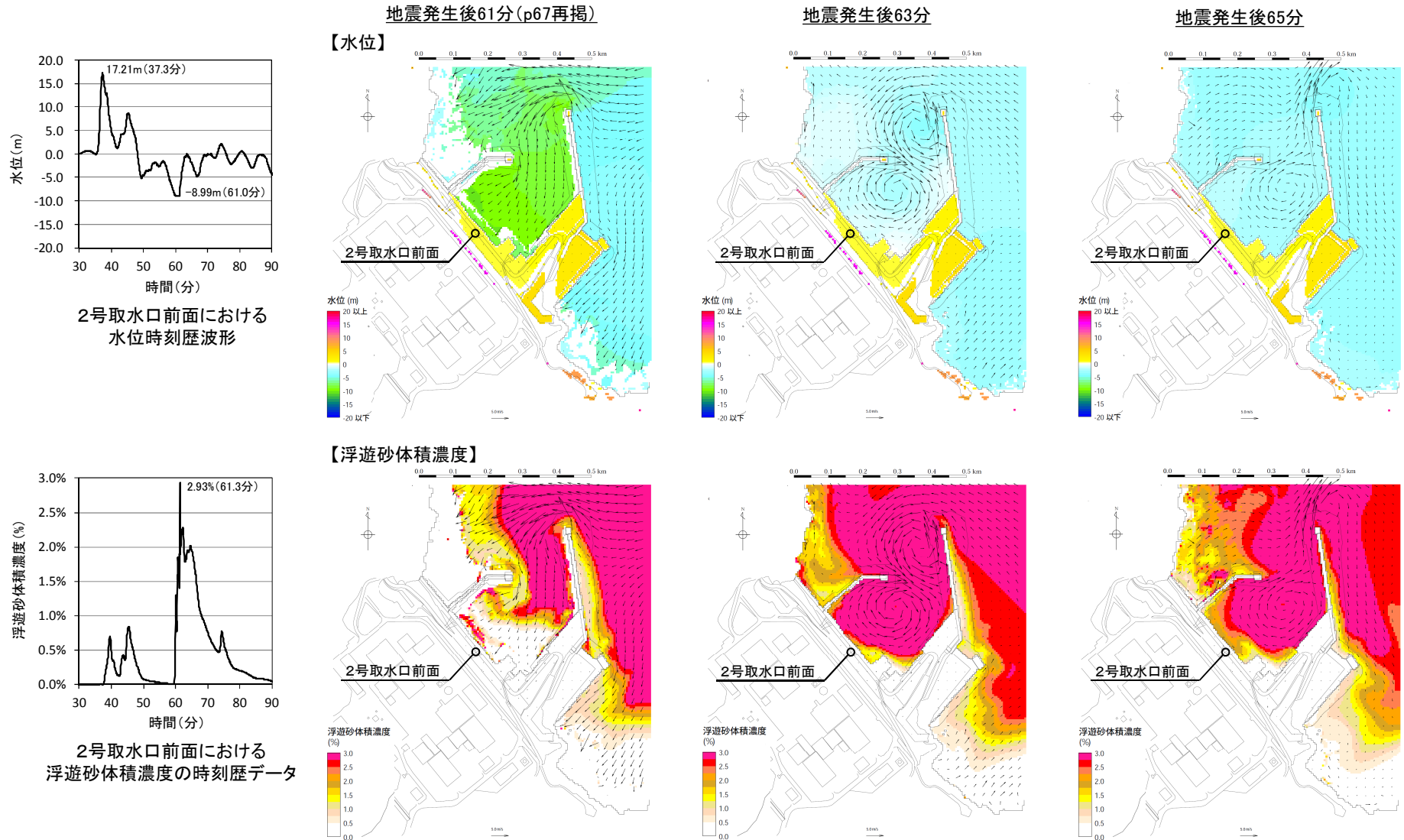
2号取水口前面における
浮遊砂体積濃度の時刻歴データ



補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.3 海底地形変化:評価結果 基準津波(水位下降側)③

■高橋ほか(1999):水位, 浮遊砂体積濃度のスナップショット(地震発生後57分~65分)②

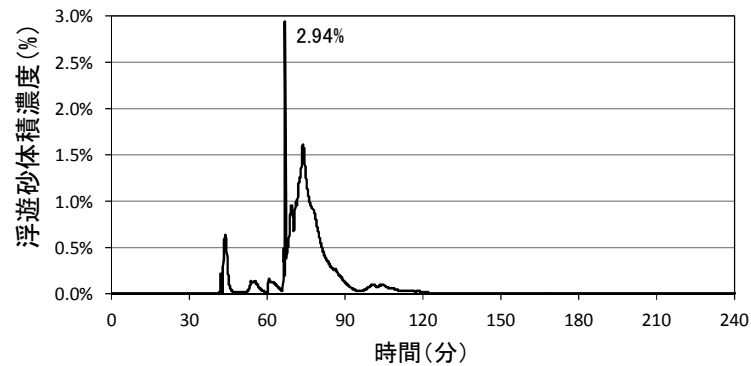


補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

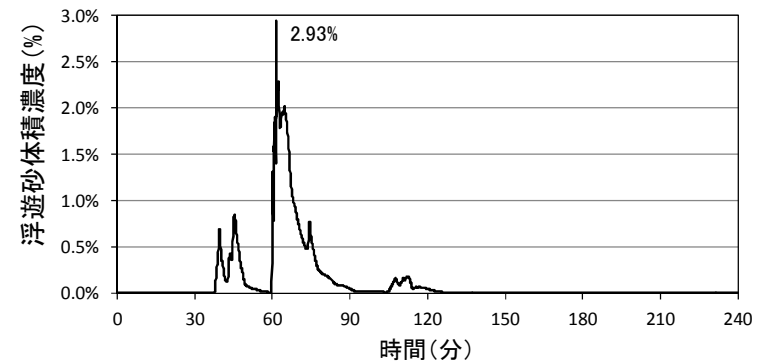
4.4 海水ポンプ室内における砂の堆積: 検討方法

- 本資料「2.3 海底地形変化」の評価から得られる2号取水口前面の浮遊砂濃度を境界条件として、高橋ほか(1999)の手法を用いて砂移動解析を実施し、非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さを算定した。
- なお、上記評価に用いる取水設備内の流量及び流速は、取水設備の水理特性を考慮した一次元水位変動解析(p35～p37)により算定した。

■ 2号取水口前面における浮遊砂濃度



基準津波(水位上昇側) (p62再掲)



基準津波(水位下降側) (p66再掲)

補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.4 海水ポンプ室内における砂の堆積: 評価結果

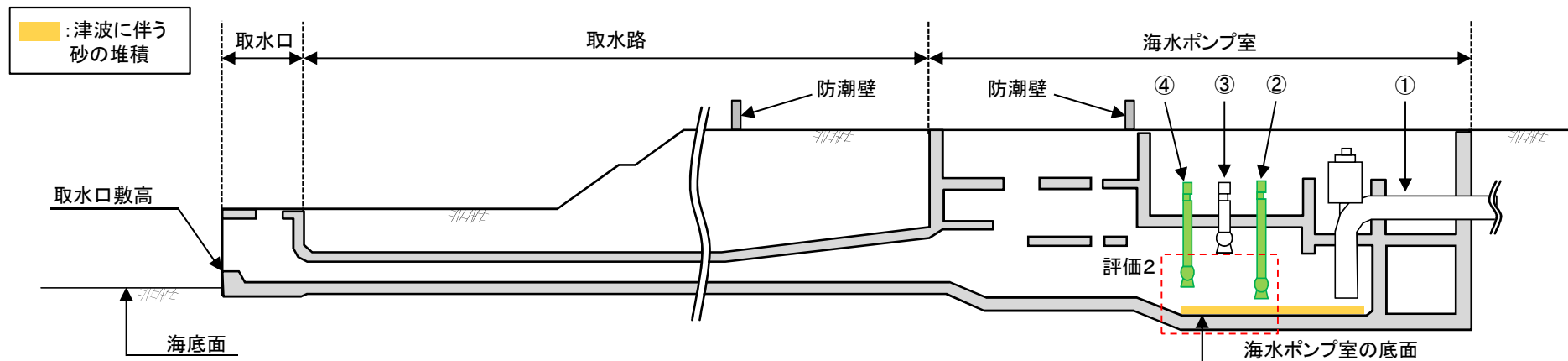
- ・ 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ位置における砂の堆積高さは最大で0.2m程度, 原子炉補機冷却海水ポンプ位置における砂の堆積高さは最大で0.1m程度であり, 各海水ポンプの高さを上回らない。
- ・ 以上から, 非常用海水ポンプの取水への影響は無いことを確認した。

評価結果

基準津波	浮遊砂体積濃度		高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ		原子炉補機冷却海水ポンプ	
	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	砂の堆積高さ (m)	海水ポンプの高さ (m)	砂の堆積高さ (m)	海水ポンプの高さ (m)
水位上昇側	高橋ほか(1999)	3%	0.08	2.45※1	0.01	1.15※2
水位下降側	高橋ほか(1999)	3%	0.18		0.03	

※1: 海水ポンプの下端: O.P.-9.95m, 海水ポンプ室底面: O.P.-12.4m
 ※2: 海水ポンプの下端: O.P.-11.25m, 海水ポンプ室底面: O.P.-12.4m

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ



評価内容と2号取水設備(概要)の関係

補足説明資料 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価

4.5 まとめ

- ・ 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度上限値を3%とした場合の非常用海水ポンプの取水に及ぼす影響を確認するため、基準津波に伴う砂移動(海底地形変化)及び2号海水ポンプ室内における砂の堆積高さを算定した。
- ・ 検討の結果、①2号取水口前面における砂の堆積高さは取水口高さを上回らないこと、②各非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さは各海水ポンプの高さを上回らないことを確認した。
- ・ 以上から、浮遊砂濃度上限値を3%にした場合でも、非常用海水ポンプの取水に及ぼす影響は無いことを確認した。

参考文献

参考文献

1. 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
2. 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
3. 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅野大輔(1999):掃流砂層・浮遊砂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
4. 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水理実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.67, No.2, I_231-I_235
5. 阿部勝征(1989):地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測, 東京大学地震研究所彙報, Vol.64, pp.51-69
6. 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, 第2号, pp.149-155
7. 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.B2-65, No.1, pp.301-305
8. 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.213-216
9. 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
10. 森下祐・高橋智幸(2014):2011年東北地方太平洋沖地震津波襲来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