東海第二発電所
津波評価について
（基準津波に対する安全性評価）

平成29年2月3日

日本原子力発電株式会社

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

1.2 砂移動評価（地形変化） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ） ・・・・・・・・・・・・・・・・ 28

2. 参考文献 ・・ 35

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40

2.2 砂移動評価（地形変化） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ） ・・・・・・・・・・・・・・・・ 54

3. 参考文献 ・・ 57

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

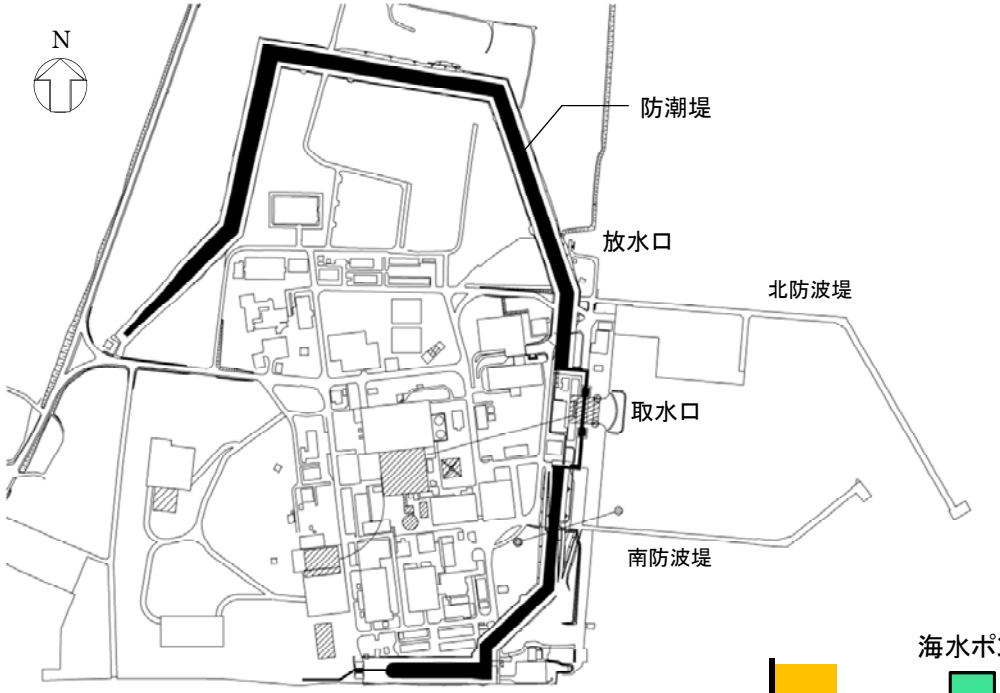
2.2 砂移動評価（地形変化）

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

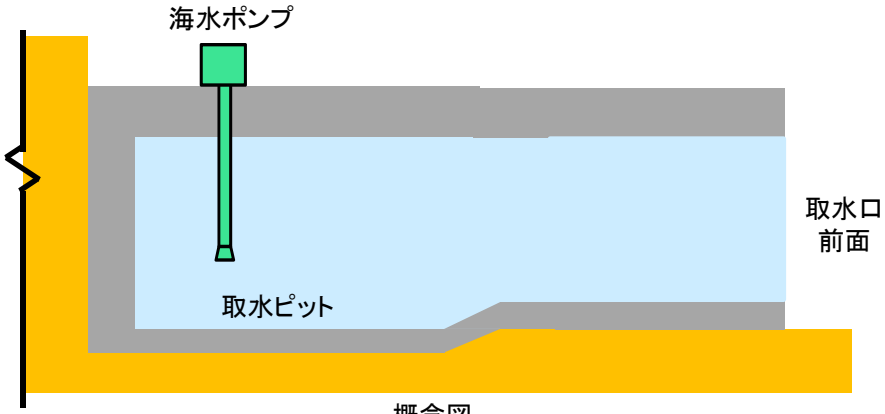
3. 参考文献

1.1 評価概要

- 基準津波に対する安全性の評価に関して，以下を確認する。
  - ✓ 基準津波に伴う砂移動（地形変化）について評価を実施し，取水口が閉塞しないことを確認する。
  - ✓ 海水ポンプ室（取水ピット）における砂の堆積厚さを評価し，非常用海水ポンプの取水に影響がないことを確認する。



敷地平面図



概念図

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

2.2 砂移動評価（地形変化）

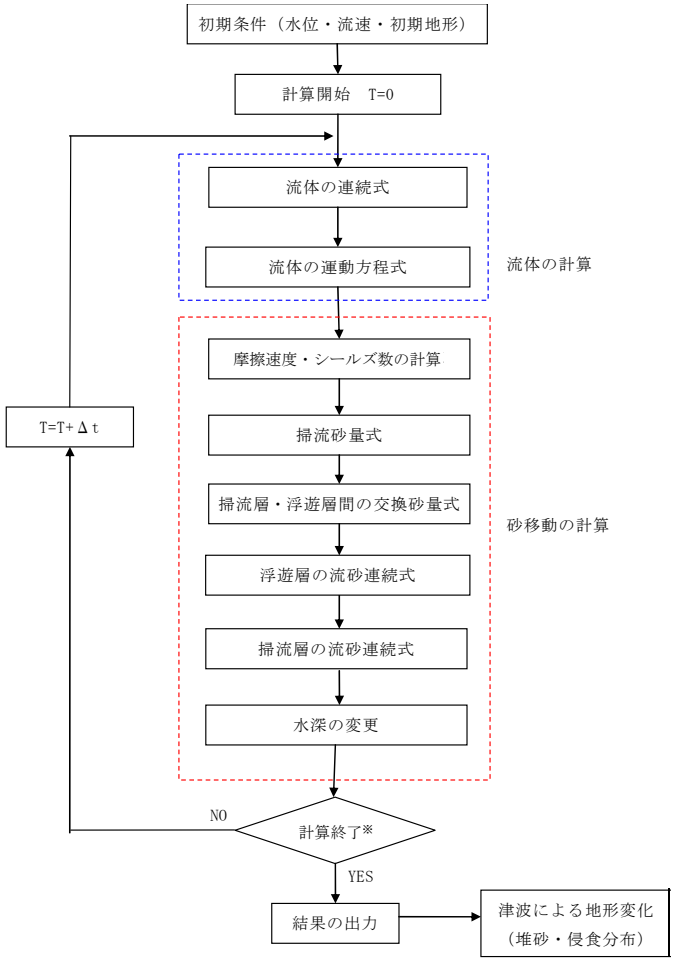
2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

3. 参考文献

解析概要

- 基準津波に伴う砂移動について評価を実施し，取水口が閉塞しないことを確認する。
- 藤井他（1998）及び高橋他（1999）の手法に基づき砂移動の数値シミュレーションを実施した。

【数値シミュレーションのフロー】



※計算終了は浮遊砂濃度の変動が収束するまでとする。

	藤井他（1998）の手法	高橋他（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	$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial(UC)}{\partial x}-\frac{E-S}{D}=0$	$\frac{\partial(C_sD)}{\partial t}+\frac{\partial(MC_s)}{\partial x}-\frac{E-S}{\sigma}=0$
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 $Q=21\tau_*^{1.5}\sqrt{sgd^3}$
巻き上げ量の算定式	$E=\frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z\left[1-\exp\left\{\frac{-wD}{k_z}\right\}\right]}$	$E=0.012\tau_*^2\sqrt{sgd}\cdot\sigma$
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	マニング則より算出 $u_*=\sqrt{gn^2U\lvert U\rvert/D^{1/3}}$

ここで、表中の記号は以下の意味を示す。

Z：水深変化量(m)　t：時間(s)　x：平面座標　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：砂の密度　s：σ／ρ－1　d：砂の粒径　g：重力加速度(m/s^2)　ρ：海水の密度(g/cm^3)　U：流速(m/s)
D：全水深(m)　M：U×D(m^2/s)　λ：空隙率　n：Manning の粗度係数
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)　Z_0：粗度高さ($=k_s/30$)(m)
k_z：鉛直拡散係数($=0.2\kappa u_*h$　藤井ほか(1998)より)(m^2/s)　k_s：相当粗度($=(7.66ng^{1/2})^6$)(m)
κ：カルマン定数(=0.4，藤井ほか(1998)より)　h：水深(m)
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/m^3)　C_s：浮遊砂体積濃度（浮遊砂濃度連続式より算出）
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

解析条件

主な解析条件

	設定値	備考
砂移動モデル	・藤井他(1998)によるモデル ・高橋他(1999)によるモデル	
空間格子間隔	沖合4320m→2160m→720m→沿岸域240m→ 敷地周辺80m→40m→20m→10m→5mへ順次細分化	
計算時間間隔	0.05秒	
マニングの粗度係数	0.03 $m^{-1/3}$・s	土木学会(2002)
浮遊砂上限濃度	・藤井他(1998)の手法　1%，5% ・高橋他(1999)の手法　1%	
砂の粒径	0.15mm	底質調査より設定
砂粒の密度	2.72 g/cm^3	底質調査より設定
空隙率	0.4	高橋他(1992)
海水の密度	1.03 g/cm^3	理科年表より設定
潮位条件※	水位上昇側：T.P.+0.81m 水位下降側：T.P.−0.61m	
計算時間	地震発生後240分間（4時間）	
初期砂層厚	無限	

※　2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量を考慮

解析条件（浮遊砂上限濃度）

- 高橋他（1999）の浮遊砂上限濃度について，砂移動評価に関する論文を整理した。
- 検証の結果，浮遊砂上限濃度5%は過大評価となっている。
- 検証の結果，浮遊砂上限濃度1%は再現性が良好である。

高橋他（1999）の検証事例

実規模検証	文献	計算使用砂粒径	計算格子間隔	浮遊砂上限濃度	浮遊砂上限濃度に関する評価
気仙沼湾 （1960年チリ地震津波）	玉田他 （2009）	0.001～1mm	25m，5m	1%，5%	• 計算格子間隔5mの場合，浮遊砂上限濃度5%では実績値より侵食深を過大に評価
八戸港 （1960年チリ地震津波）	藤田他 （2010）	0.26mm	10.3m	1%，2%，5%	• 浮遊砂上限濃度5%は過大に評価 • 浮遊砂上限濃度1～2%の場合の再現性が良好
宮古港 （2011年東北地方太平洋沖地震津波）	近藤他 （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 （2011年東北地方太平洋沖地震津波）	森下他 （2014）	0.3mm	10m	1% $C_{sat}=\alpha\times\sqrt{U^2\times V^2}$	• 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 • 上記の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向上につながることを示唆

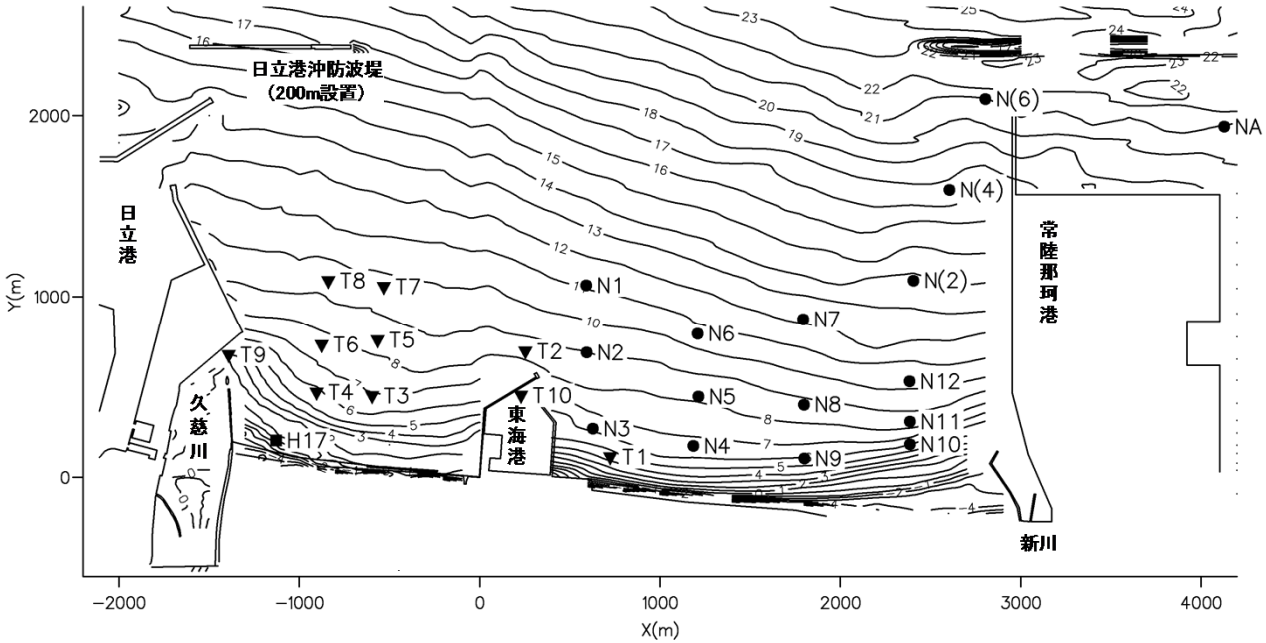
C_{sat}：飽和浮遊砂濃度　U，V：断面平均流速分布　α：係数（0.01）

- 以上より，高橋他（1999）の浮遊砂上限濃度を1%に設定する。

解析条件（粒径，密度）

- 砂の諸元については，茨城県（2005）を参考に設定した。
- 中央粒径については，全26地点の平均値で0.18mmとなり，本解析で用いる中央粒径の設定値は保守的に0.15mmとした。
- 密度については，全26地点の平均値である2.72g/cm^{3}を設定値とした。

●：常陸那珂港調査（2002年2月）
■：日立港調査（1998年1月）
▼：東海港調査（2002年1-2月）
（T10は最新の調査(2004年10月)を採用）



調査位置

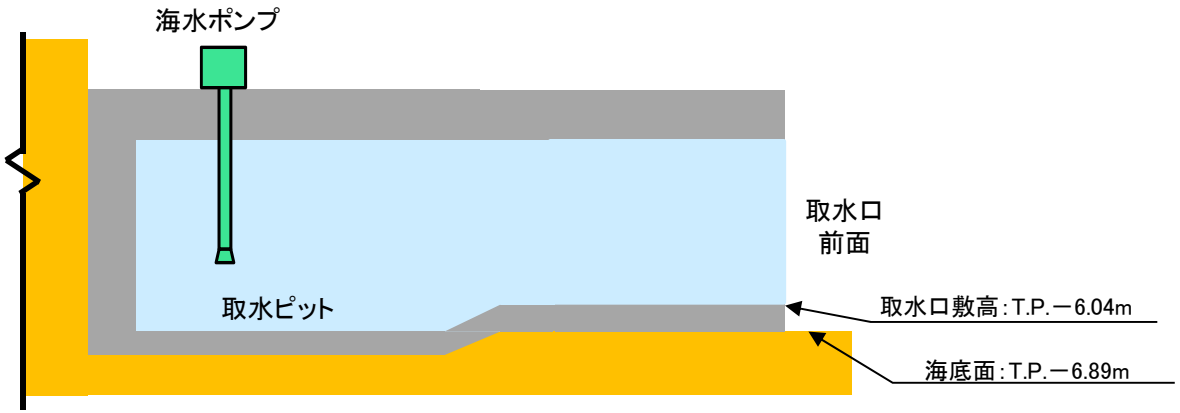
試料採取位置	密度（g/cm^3）	中央粒径（mm）
H17	2.69	0.48
N1	2.76	0.11
N2	2.76	0.12
N3	2.76	0.13
N4	2.82	0.14
N5	2.81	0.13
N6	2.73	0.12
N7	2.79	0.13
N8	2.75	0.11
N9	2.73	0.14
N10	2.70	0.16
N11	2.68	0.11
N12	2.70	0.11
N（2）	2.76	0.13
N（4）	2.66	0.89
N（6）	2.58	0.01
T1	2.72	0.15
T2	2.73	0.16
T3	2.70	0.15
T4	2.68	0.18
T5	2.69	0.17
T6	2.69	0.14
T7	2.70	0.13
T8	2.67	0.31
T9	2.68	0.16
T10	2.67	0.18
平均値	**2.72**	**0.18**
設定値	**2.72**	**0.15**

評価結果

- 取水口前面における砂の堆積厚さは，最大で0.4m程度であり，取水口は閉塞しない。
- 以上から，非常用海水ポンプの取水への影響はないことを確認した。

評価結果

基準津波	砂移動モデル	浮遊砂上限濃度	取水口前面における砂の堆積厚さ
水位上昇側	藤井他（1998）	1%	0.01 m
		5%	0.01 m
	高橋他（1999）	1%	0.33 m
水位下降側	藤井他（1998）	1%	0.01 m
		5%	0.01 m
	高橋他（1999）	1%	0.19 m



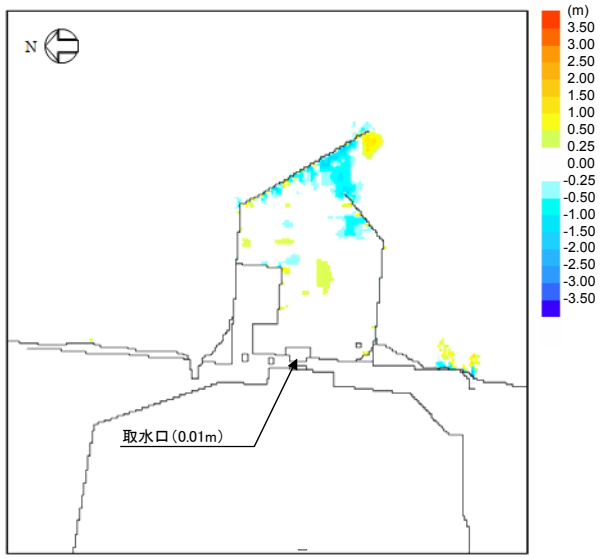
取水口概念図

余　白

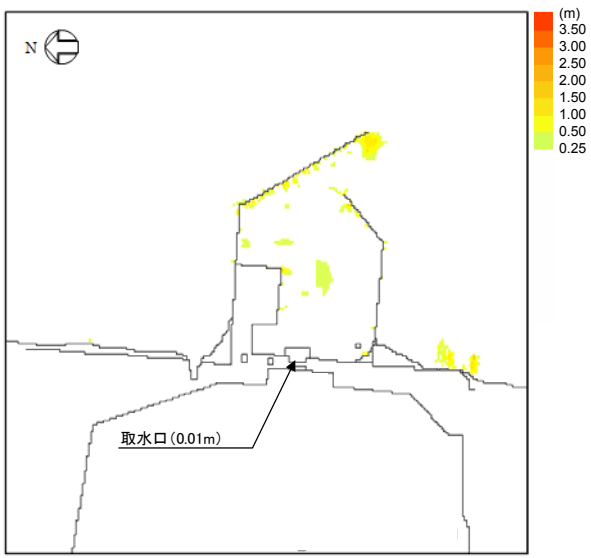
解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：1%，水位上昇側）

■地形変化量分布（地震発生4時間後），最大堆積量分布

取水口前面における砂の堆積厚さ
0.01 m



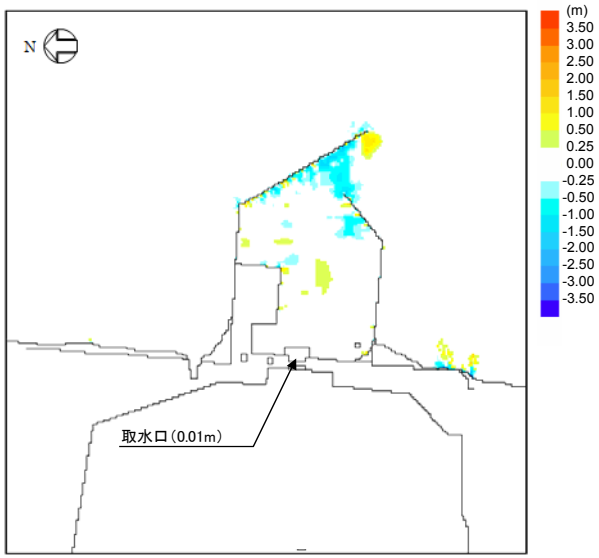
地形変化量分布（地震発生4時間後）



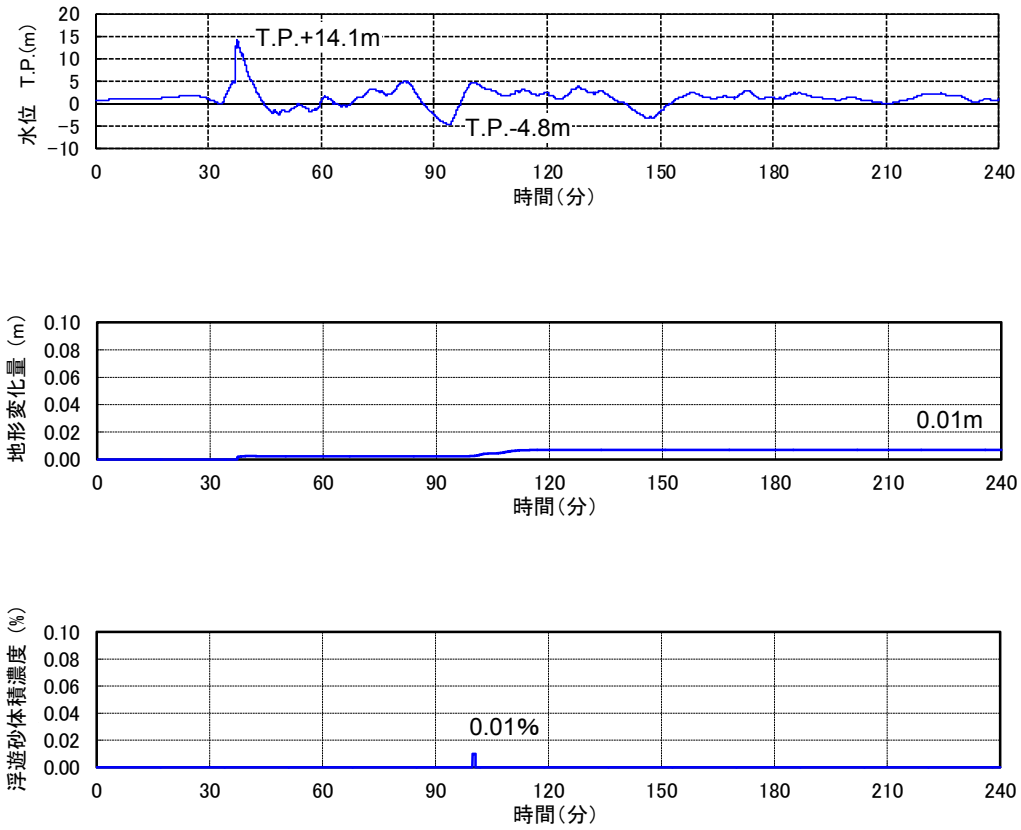
最大堆積量分布

解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：1%，水位上昇側）

■取水口前面における水位，地形変化量，浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



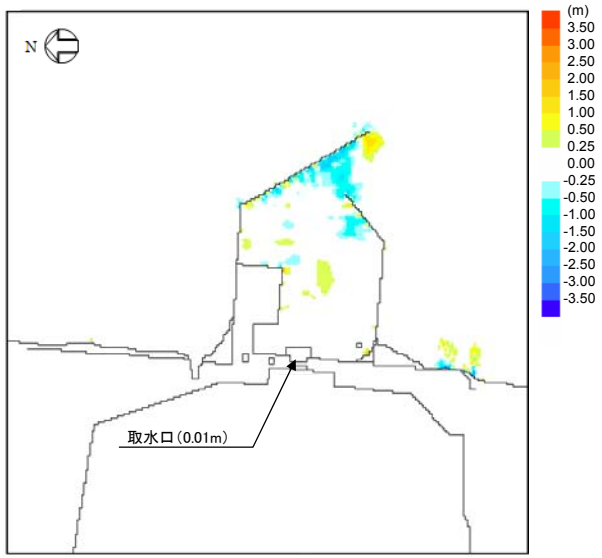
地形変化量分布（地震発生4時間後）



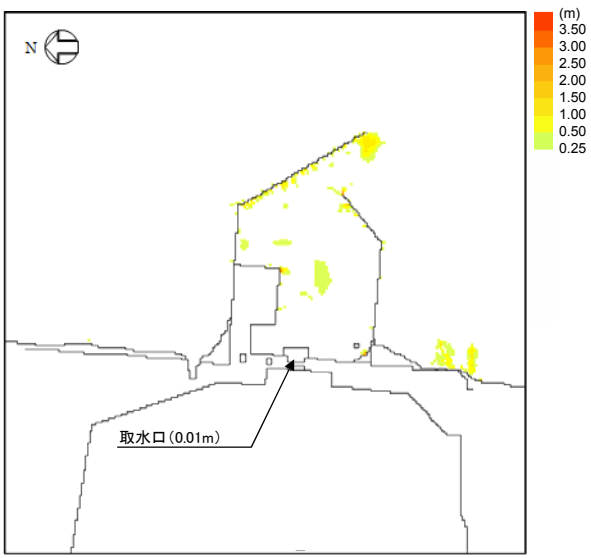
解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：5%，水位上昇側）

■地形変化量分布（地震発生4時間後），最大堆積量分布

取水口前面における砂の堆積厚さ
0.01 m



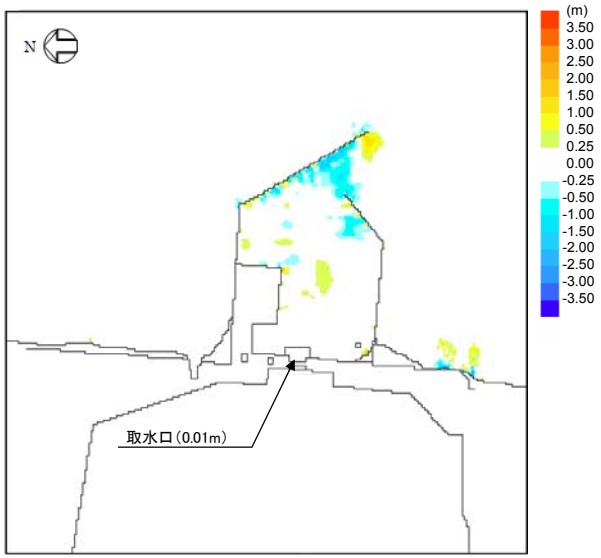
地形変化量分布（地震発生4時間後）



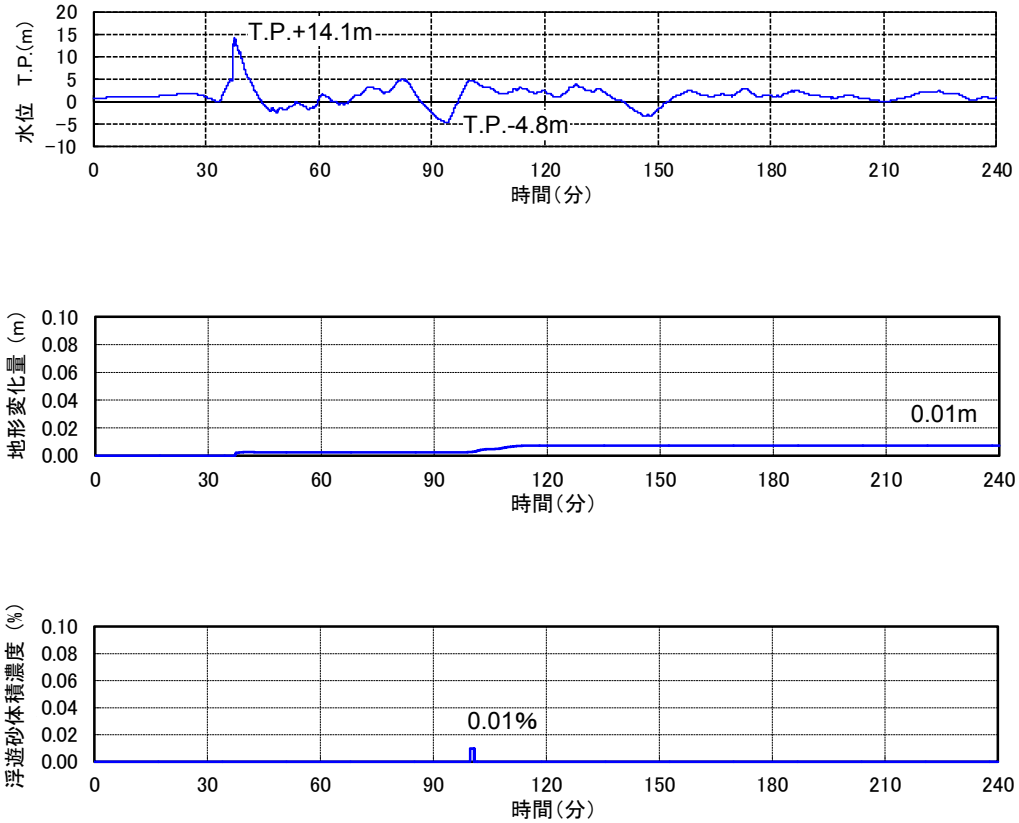
最大堆積量分布

解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：5%，水位上昇側）

■取水口前面における水位，地形変化量，浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



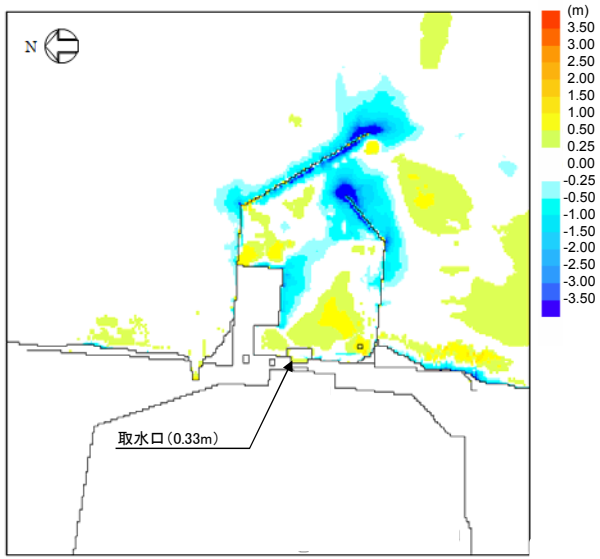
地形変化量分布（地震発生4時間後）



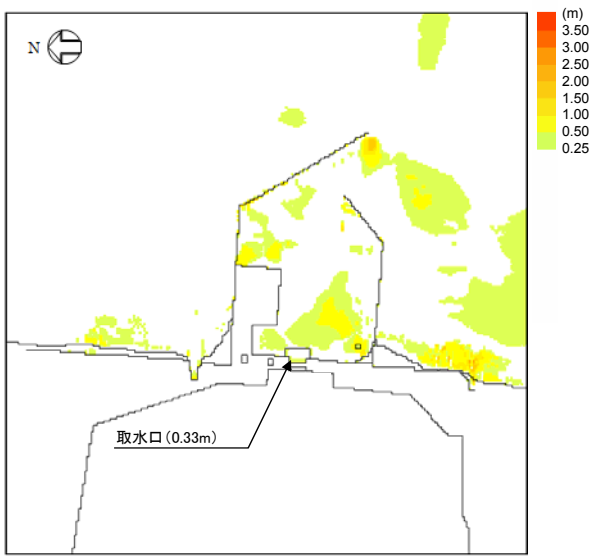
解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位上昇側）

■地形変化量分布（地震発生4時間後），最大堆積量分布，最大シールズ数分布

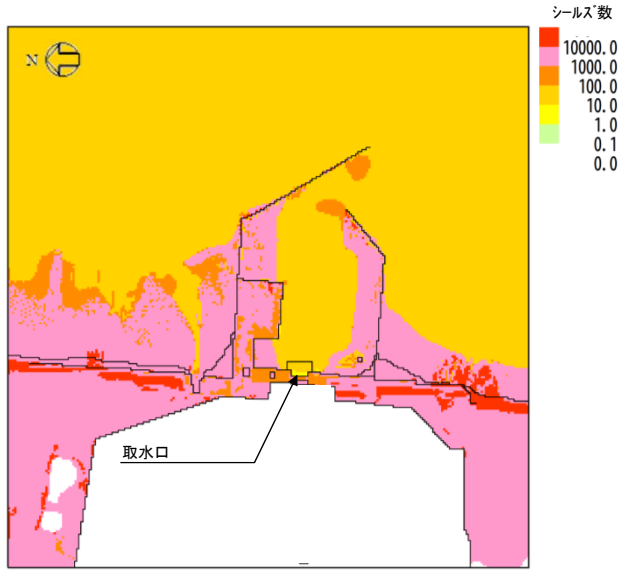
取水口前面における砂の堆積厚さ
0.33 m



地形変化量分布（地震発生4時間後）



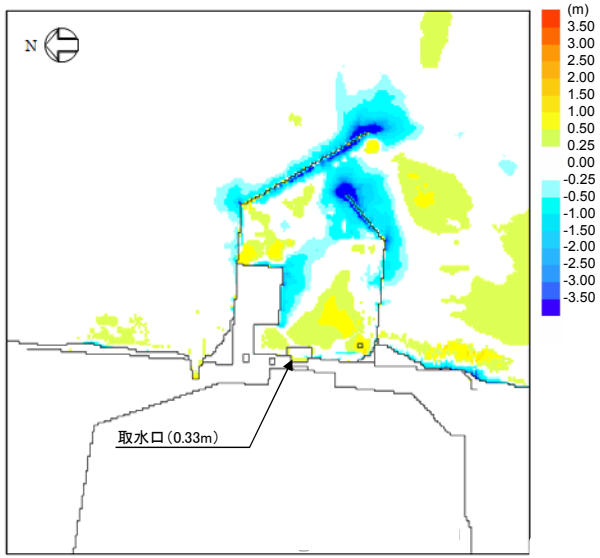
最大堆積量分布



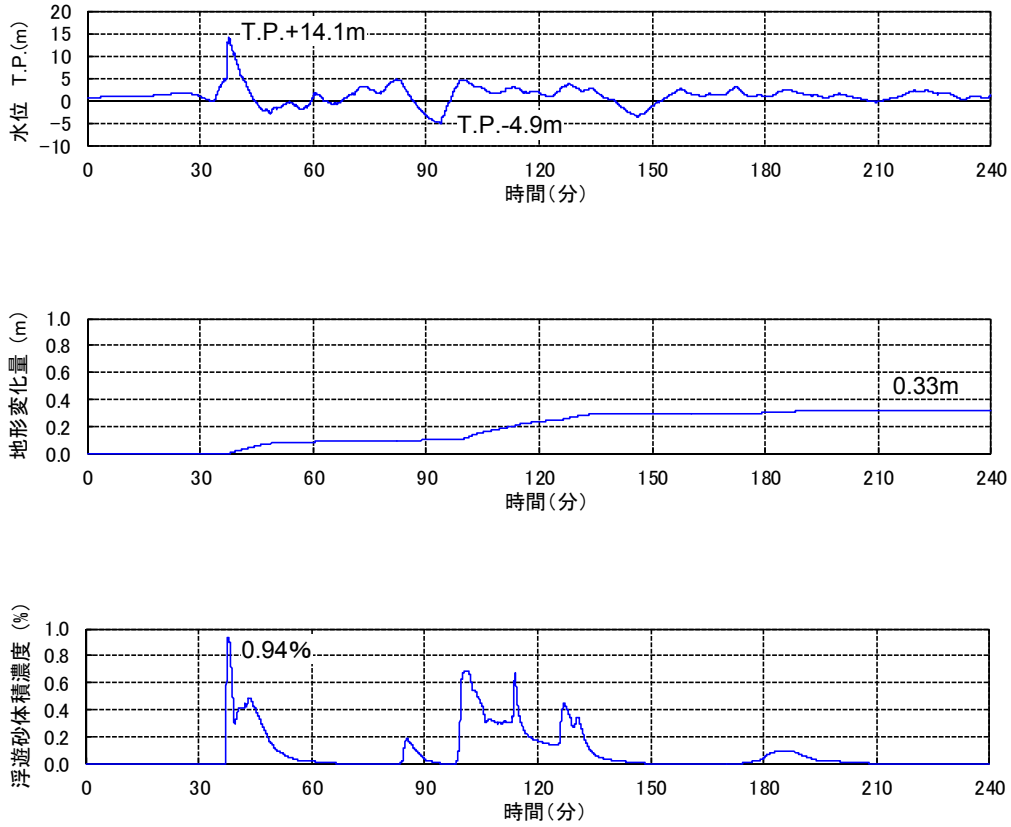
最大シールズ数分布

解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位上昇側）

■取水口前面における水位，地形変化量，浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



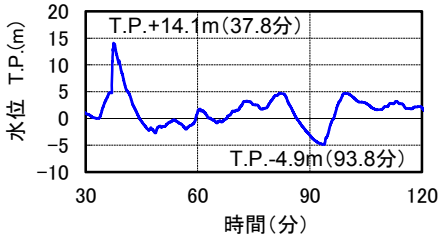
地形変化量分布（地震発生4時間後）



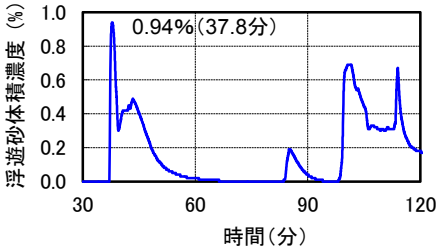
解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位上昇側）

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形，スナップショット（地震発生後34分～38分）

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約38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。



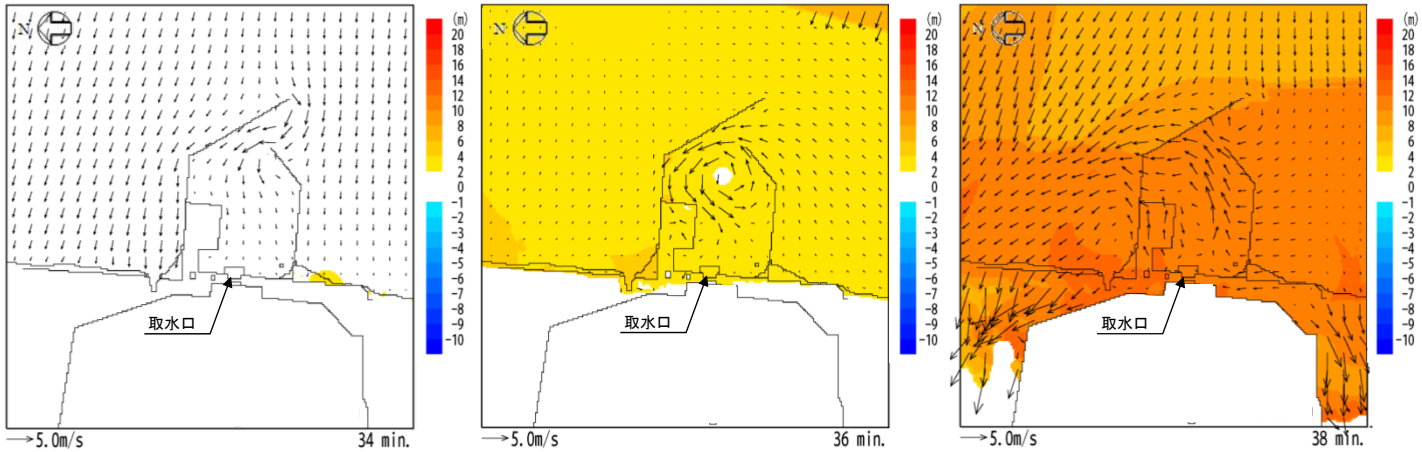
水位の時刻歴波形



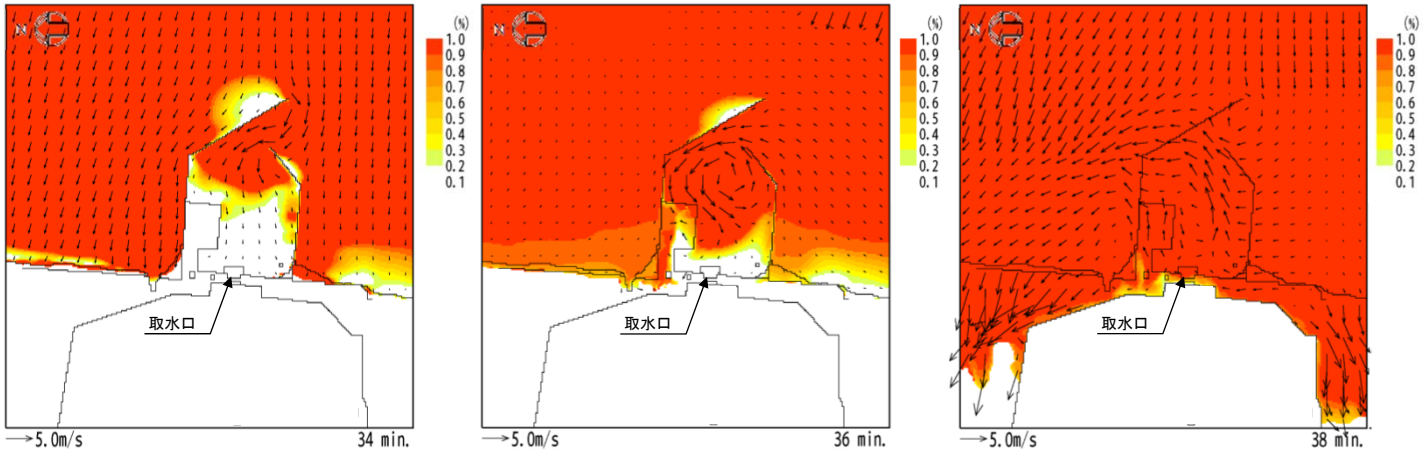
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後34分　地震発生後36分　地震発生後38分

【水位】



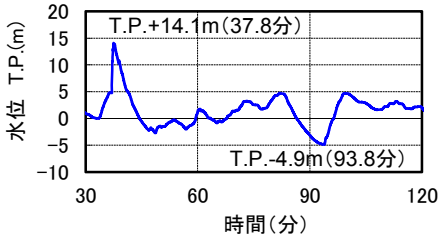
【浮遊砂体積濃度】



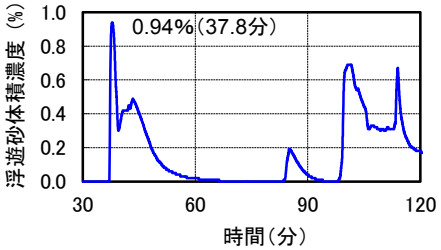
解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位上昇側）

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形，スナップショット（地震発生後38分～42分）

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約38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。



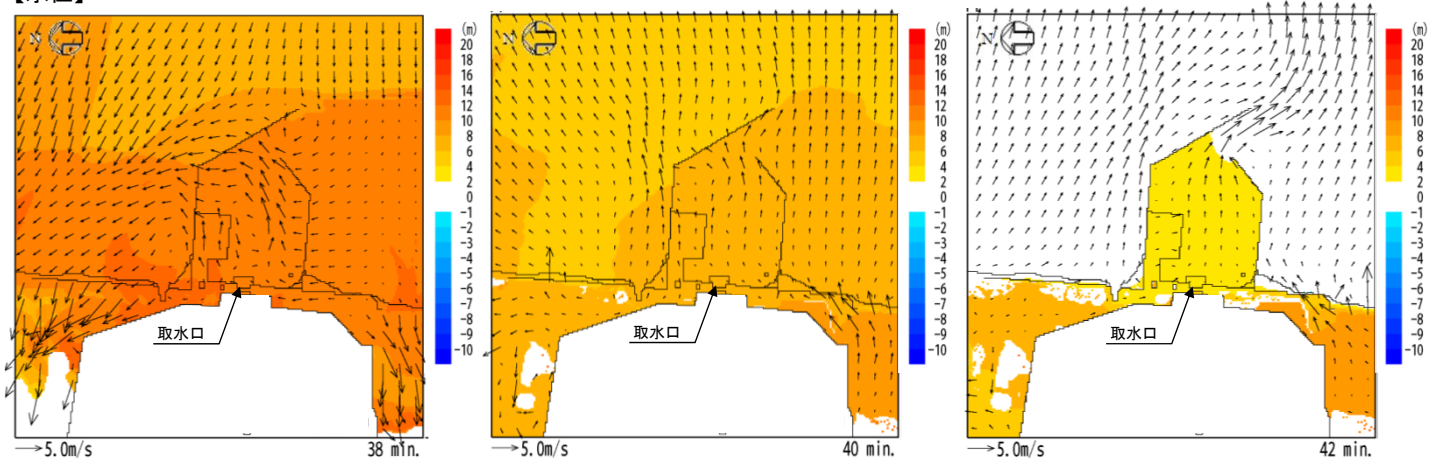
水位の時刻歴波形



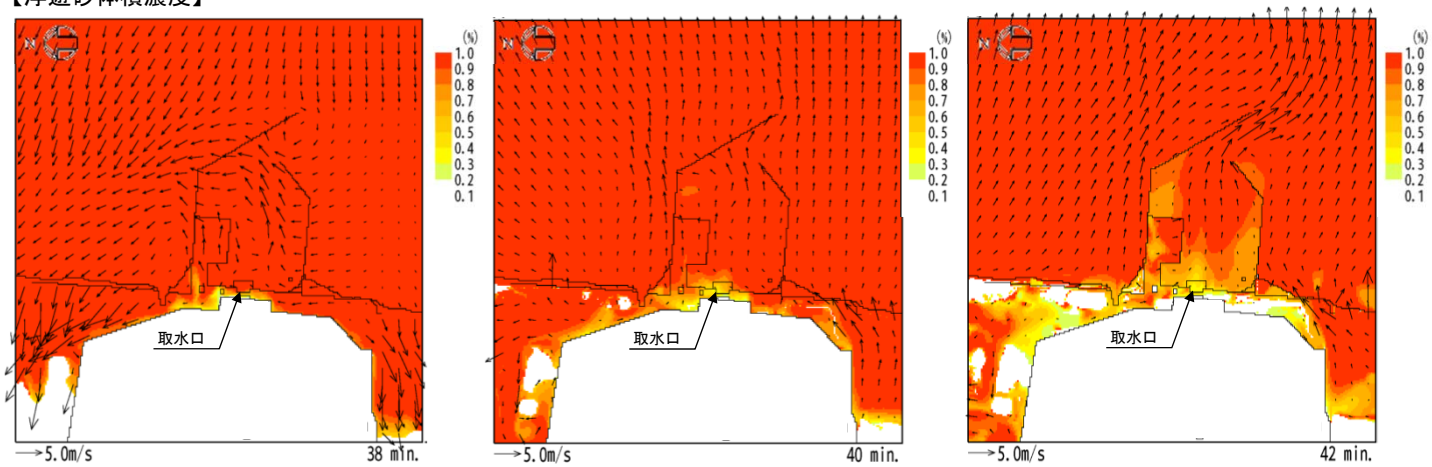
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後38分（前頁再掲）　地震発生後40分　地震発生後42分

【水位】



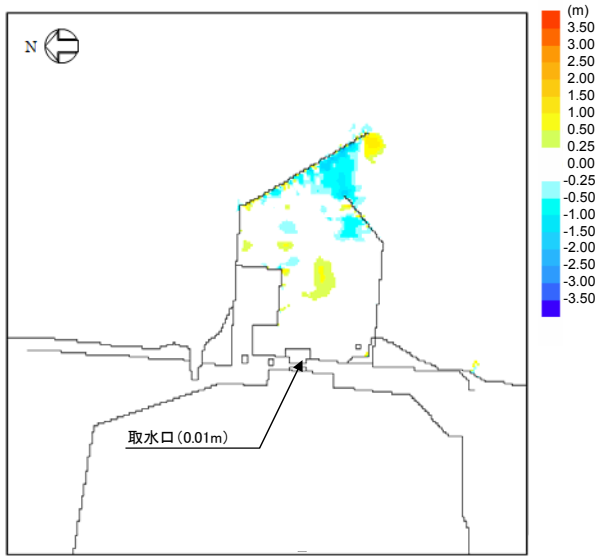
【浮遊砂体積濃度】



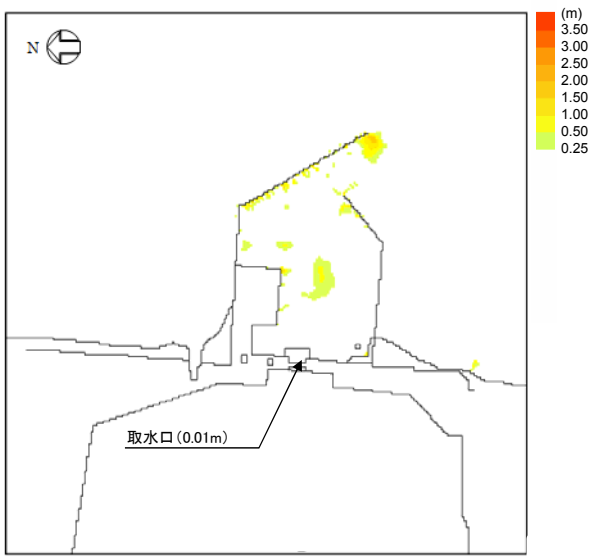
解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：1%，水位下降側）

■地形変化量分布（地震発生4時間後），最大堆積量分布

取水口前面における砂の堆積厚さ
0.01 m



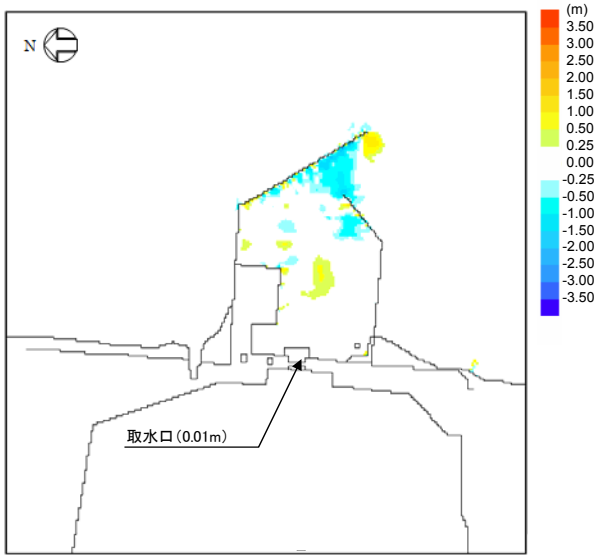
地形変化量分布（地震発生4時間後）



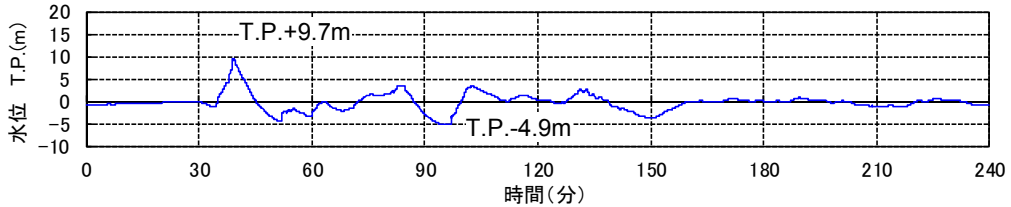
最大堆積量分布

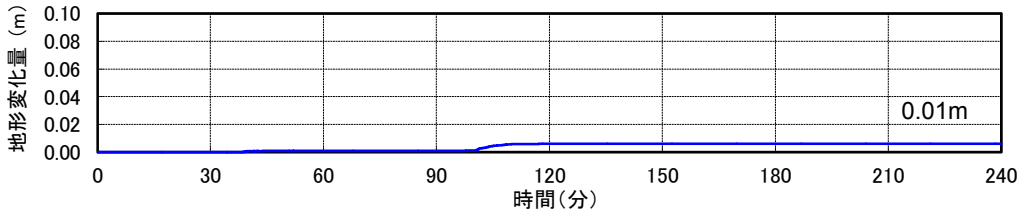
解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：1%，水位下降側）

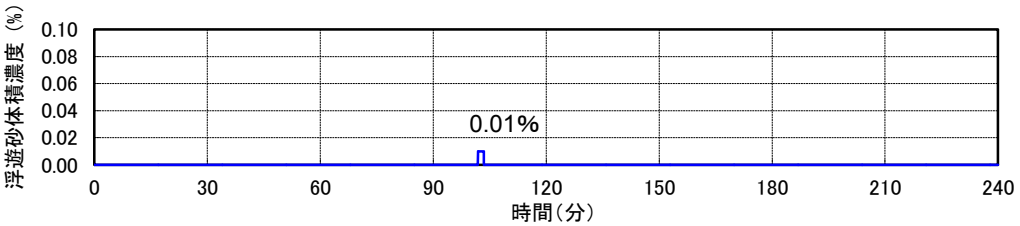
■取水口前面における水位，地形変化量，浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



地形変化量分布（地震発生4時間後）



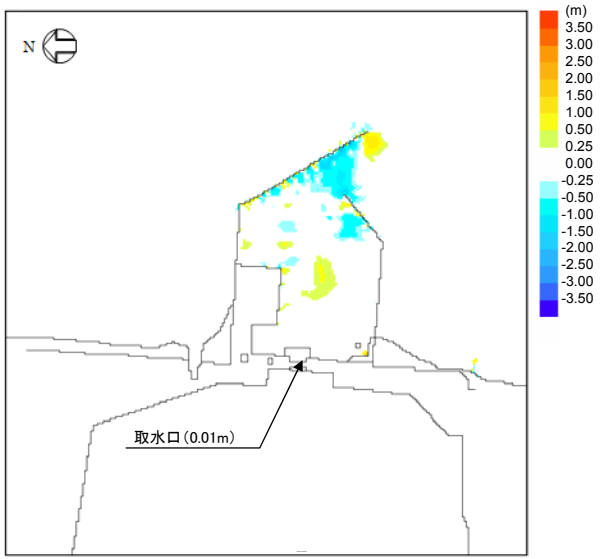




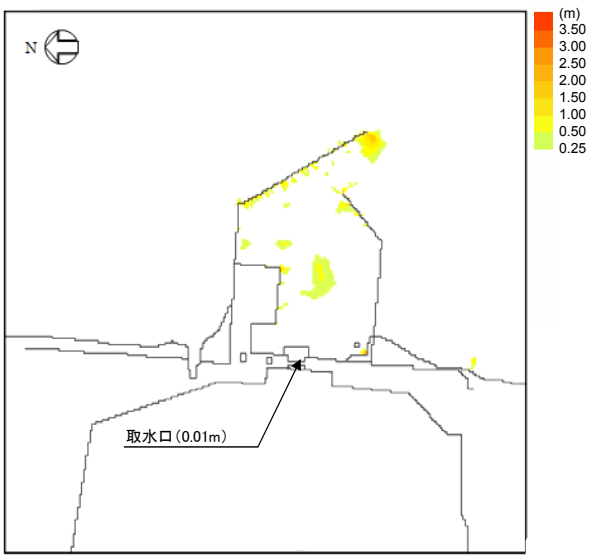
解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：5%，水位下降側）

■地形変化量分布（地震発生4時間後），最大堆積量分布

取水口前面における砂の堆積厚さ
0.01 m



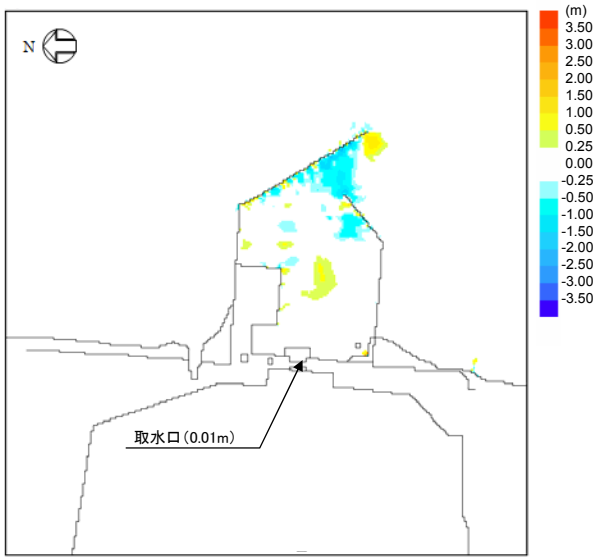
地形変化量分布（地震発生4時間後）



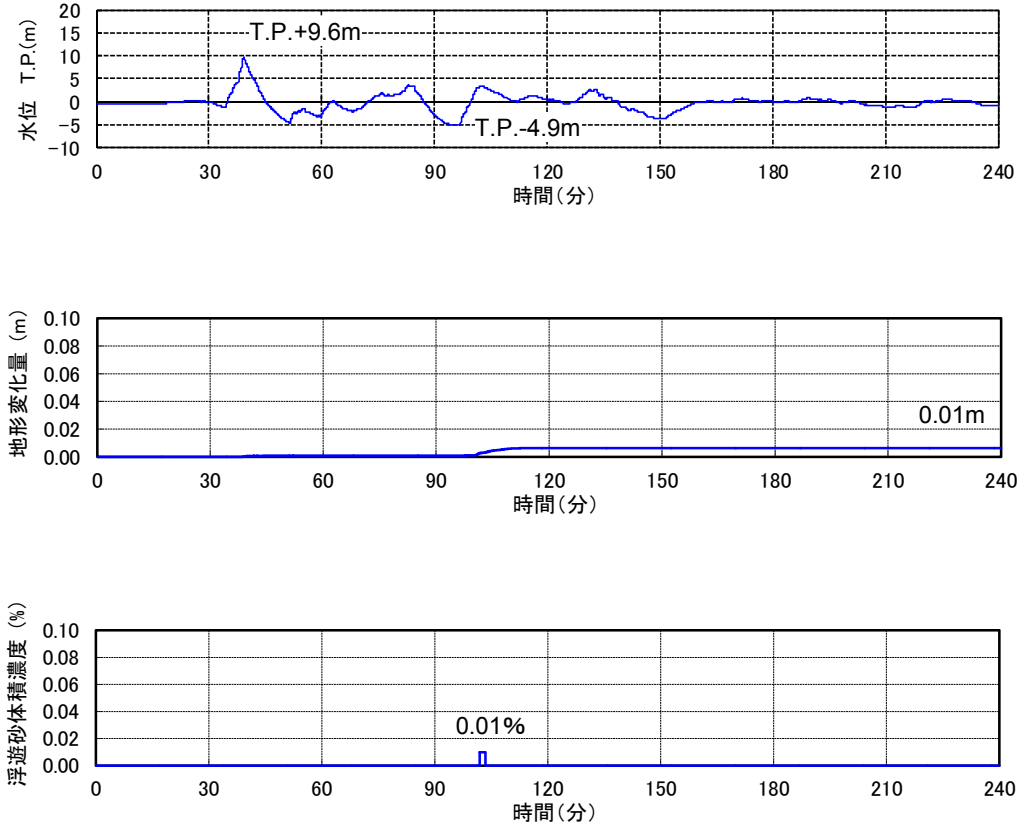
最大堆積量分布

解析結果（藤井他（1998），浮遊砂上限濃度：5%，水位下降側）

■取水口前面における水位，地形変化量，浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



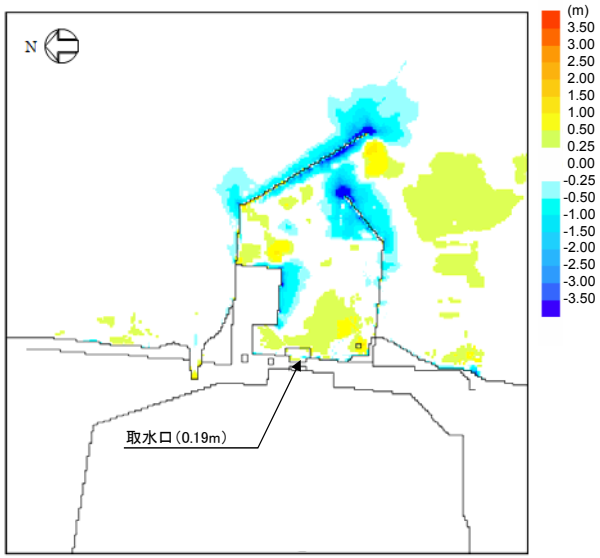
地形変化量分布（地震発生4時間後）



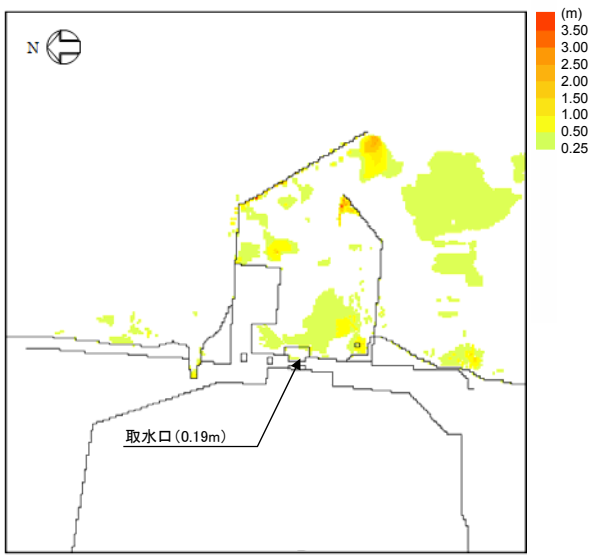
解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位下降側）

■地形変化量分布（地震発生4時間後），最大堆積量分布，最大シールズ数分布

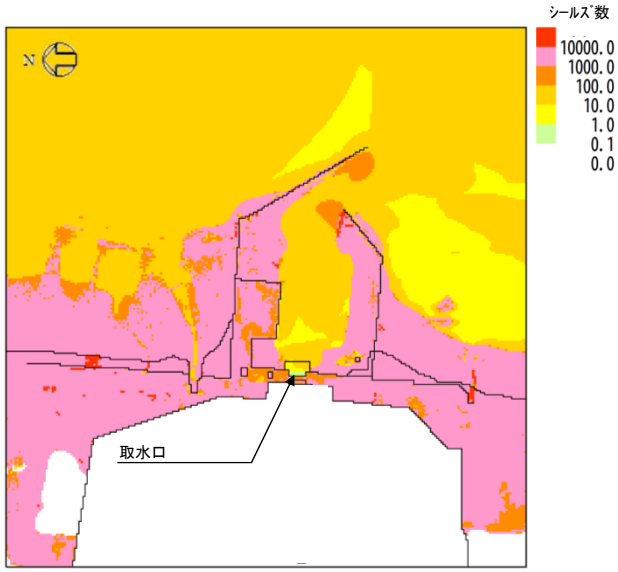
取水口前面における砂の堆積厚さ
0.19 m



地形変化量分布（地震発生4時間後）



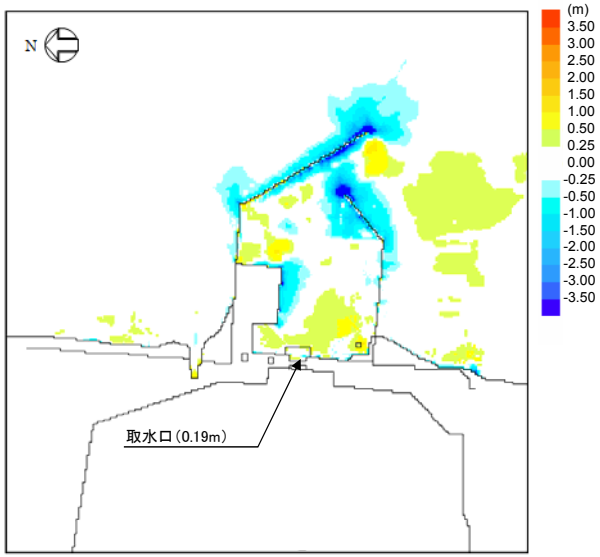
最大堆積量分布



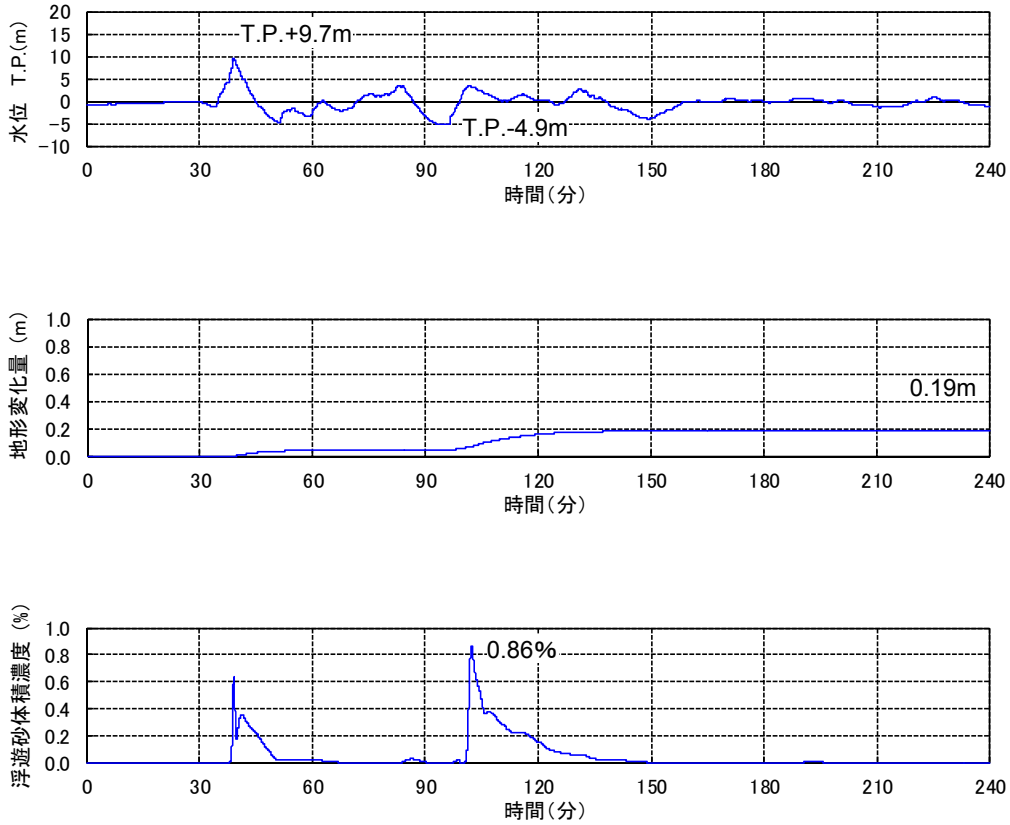
最大シールズ数分布

解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位下降側）

■取水口前面における水位，地形変化量，浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



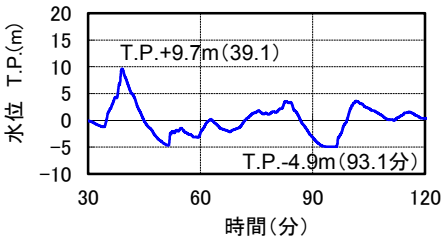
地形変化量分布（地震発生4時間後）



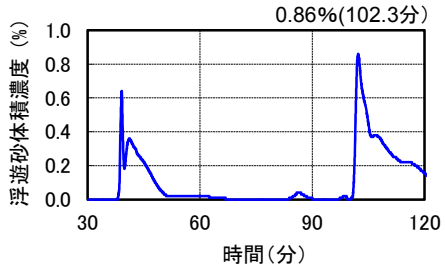
解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位下降側）

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形，スナップショット（地震発生後98分～102分）

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約102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。



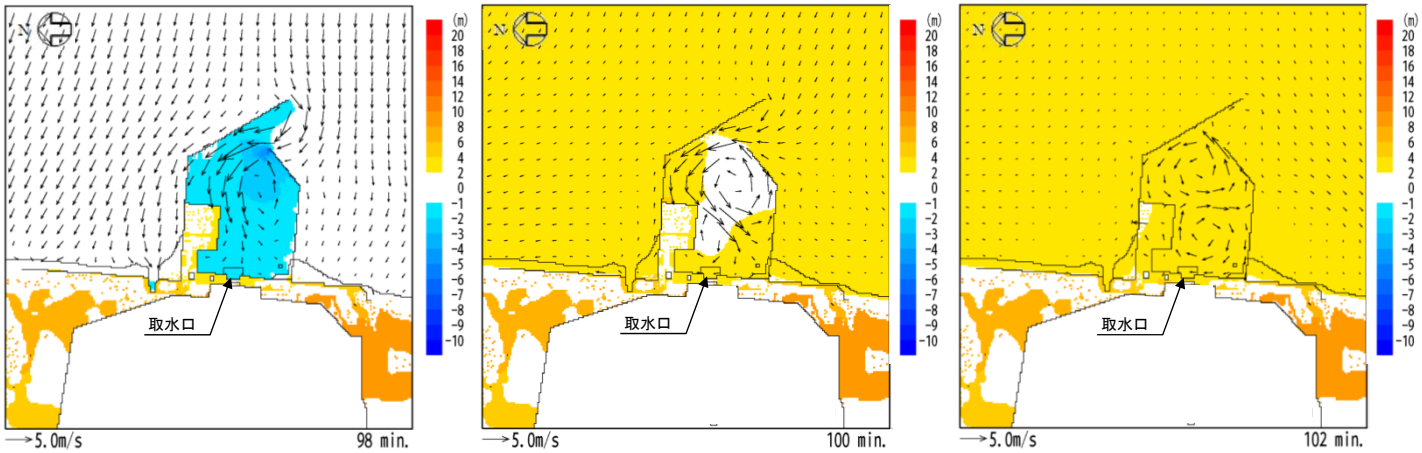
水位の時刻歴波形



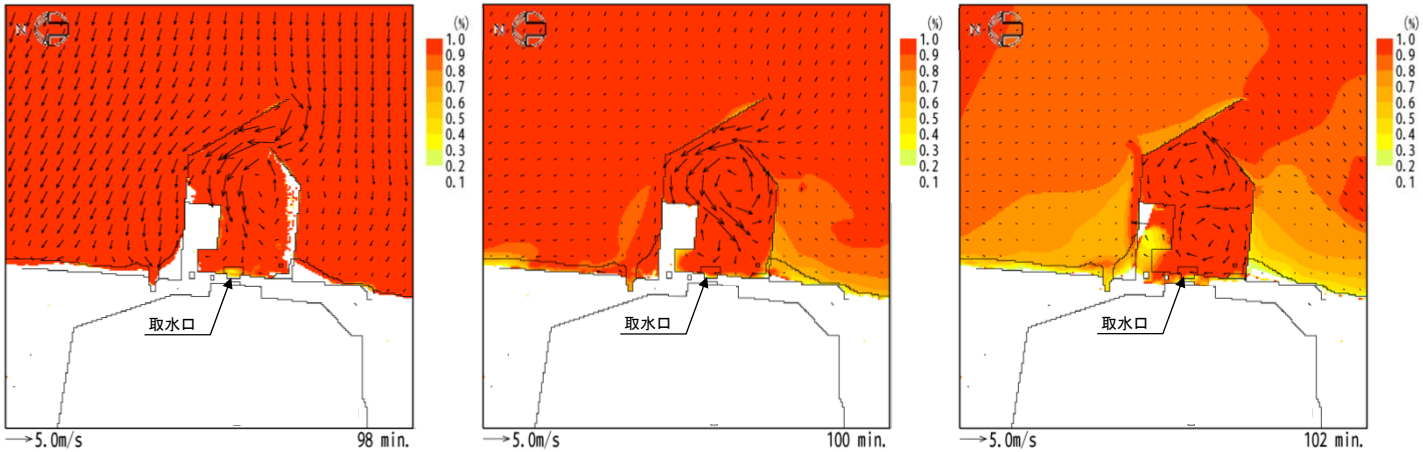
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後98分　　地震発生後100分　　地震発生後102分

【水位】



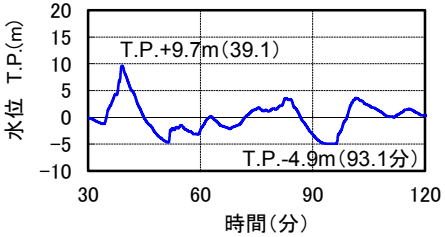
【浮遊砂体積濃度】



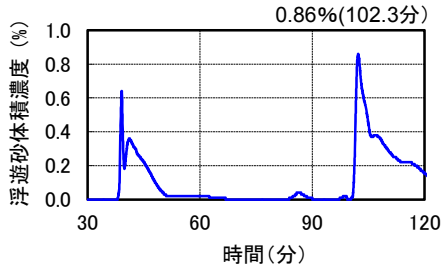
解析結果（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%，水位下降側）

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形，スナップショット（地震発生後102分～106分）

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約102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。



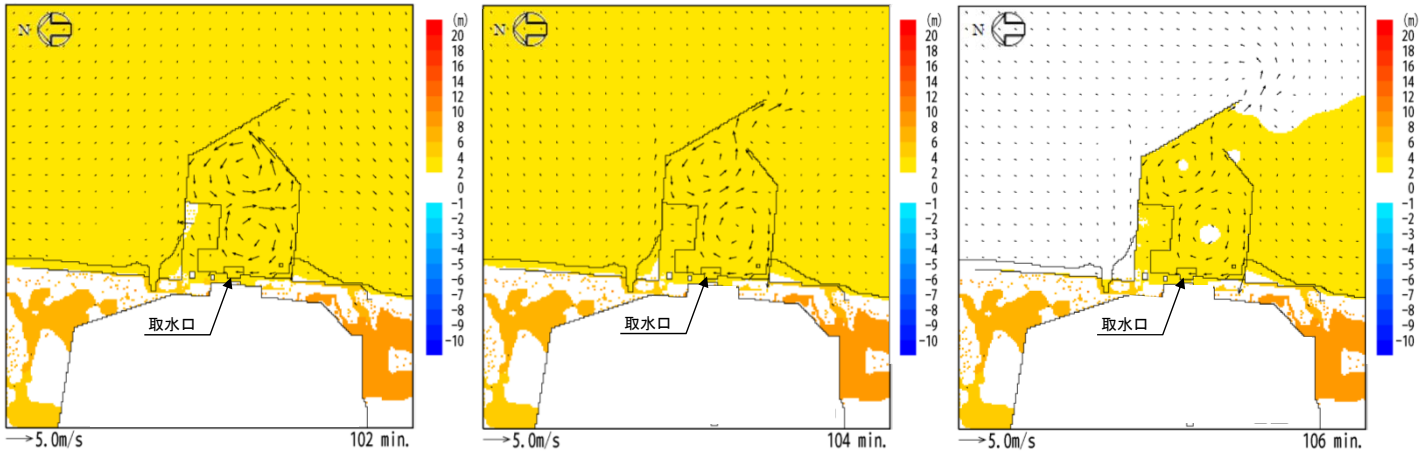
水位の時刻歴波形



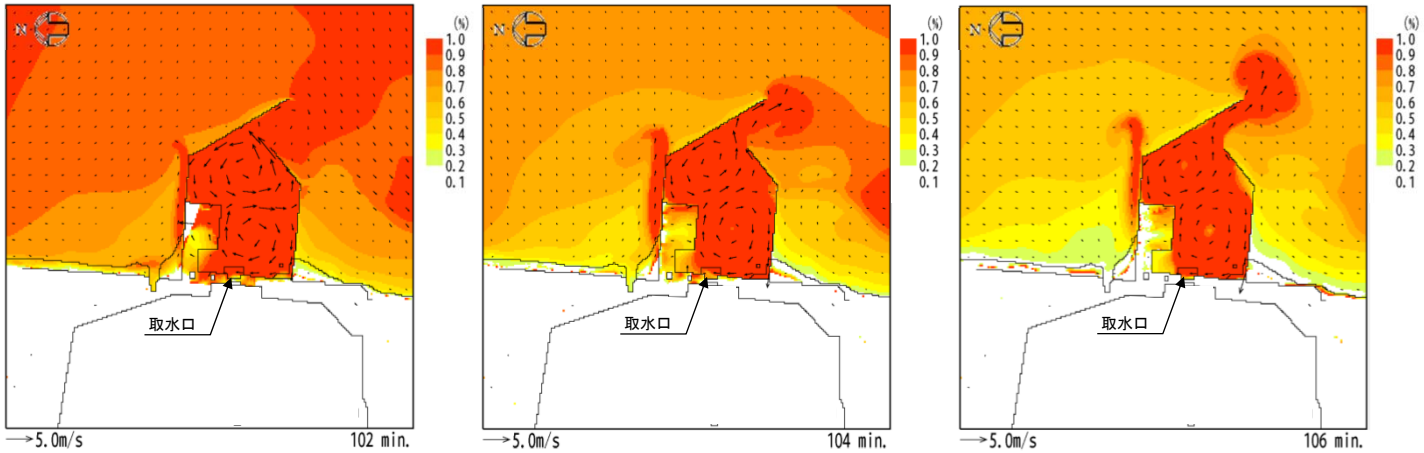
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後102分（前頁再掲）　地震発生後104分　地震発生後106分

【水位】



【浮遊砂体積濃度】



目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

2.2 砂移動評価（地形変化）

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

3. 参考文献

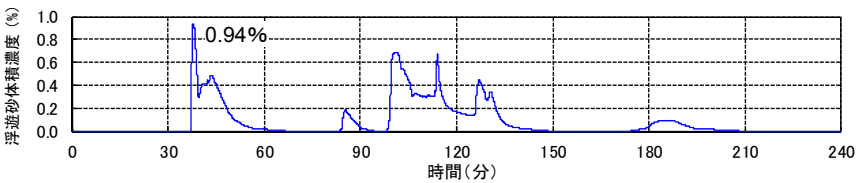
解析概要

- 海水ポンプ室（取水ピット）における砂の堆積厚さを評価し，非常用海水ポンプの取水に影響がないことを確認する。
- 取水設備を一次元でモデル化し，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，取水設備内の浮遊砂濃度を算定し，非常用海水ポンプ位置における砂の堆積厚さを算定した。
- 取水路及び海水ポンプ室内の流量及び流速は，当該解析モデルで計算される管路解析結果を使用した。
- 水路内の砂移動評価については，地形変化の検討において取水口前面における砂の堆積厚さが最も大きくなるケースを対象に，高橋他（1999）の手法に基づき数値シミュレーションを実施した。

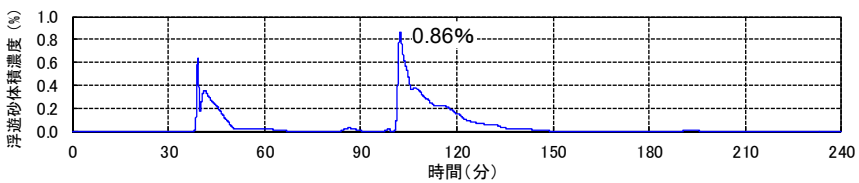
評価結果（地形変化）

基準津波	砂移動モデル	浮遊砂上限濃度	取水口前面における砂の堆積厚さ	備考
水位上昇側	藤井他（1998）	1%	0.01 m	
		5%	0.01 m	
	高橋他（1999）	**1%**	**0.33 m**	検討ケース
水位下降側	藤井他（1998）	1%	0.01 m	
		5%	0.01 m	
	高橋他（1999）	**1%**	**0.19 m**	検討ケース

■取水口前面における浮遊砂体積濃度の時刻歴波形（高橋他（1999），浮遊砂上限濃度：1%）



水位上昇側



水位下降側

解析条件（設定項目）

項目	設定内容
計算領域	取水口～取水路～取水ピット
基礎方程式	非定常開水路流及び管路流の連続式・運動方程式※1
非常用海水ポンプ 取水条件	流量：2,549.4（m^3/hr） ・残留熱除去系海水ポンプ：885.7（m^3/hr/台）×2 台 ・非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ：272.6（m^3/hr/台）×2 台 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ：232.8（m^3/hr/台）×1 台
マニングの粗度係数	n=0.020$m^{-1/3}$・s
貝の付着代	貝代10cmを考慮
局所損失係数	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－ 千秋信一(1967)：発電水力演習 土木学会(1999)：水理公式集［平成11年版］
入射条件	基準津波：水位上昇側，水位下降側
計算時間間隔	⊿t=0.01秒
計算時間	地震発生後240分間（4時間）
潮位条件※2	水位上昇側：T.P.+0.81m 水位下降側：T.P.−0.61m

※1　基礎方程式

＜開水路＞

a)運動方程式

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

b)連続式

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

＜管路＞

a)運動方程式

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

b)連続式

$$\frac{\partial Q}{\partial x}=0$$

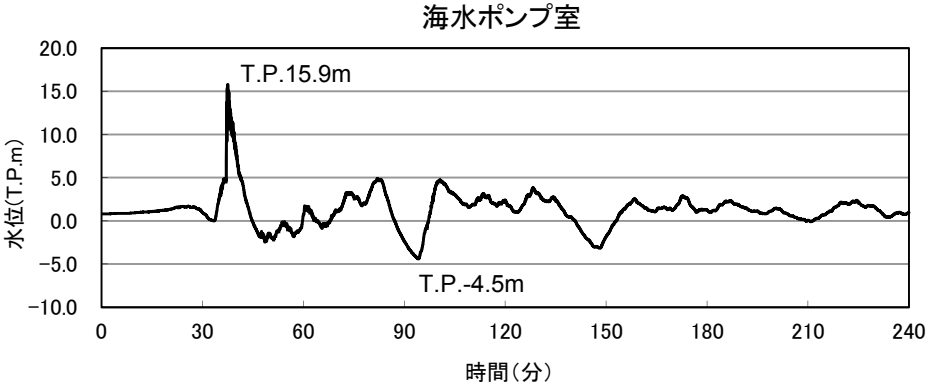
ここに，　t ：時間　Q ：流量　v ：流速　x ：管底に沿った座標　A ：流水断面積　H ：圧力水頭＋位置水頭（管路の場合）/位置水頭（開水路の場合）
z ：管底高　g ：重力加速度　n ：マニングの粗度係数　R ：径深　⊿x ：管路の流れ方向の長さ　f ：局所損失係数

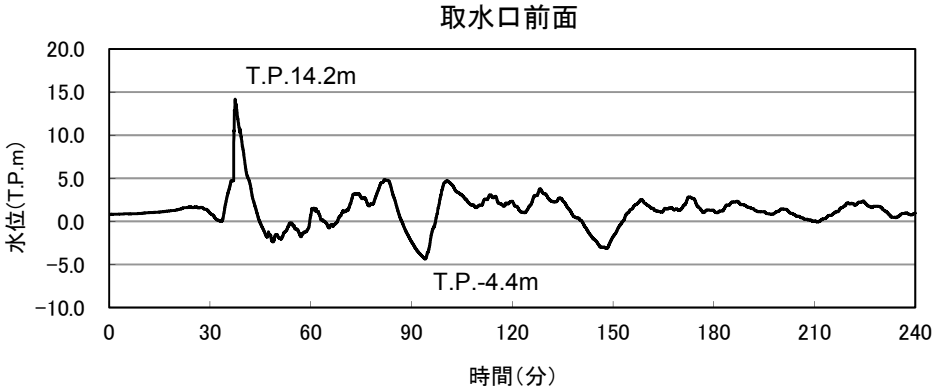
※2　2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量を考慮

余　白

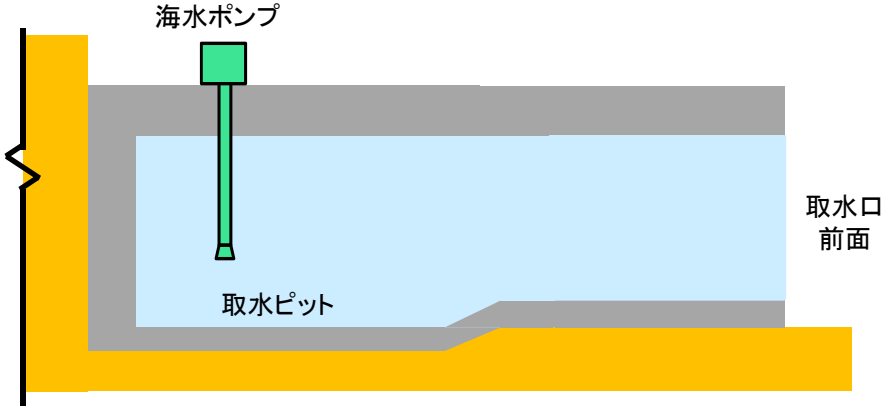
解析条件（取水設備の水理特性を考慮した水変動解析結果：基準津波（水位上昇側））

- 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。





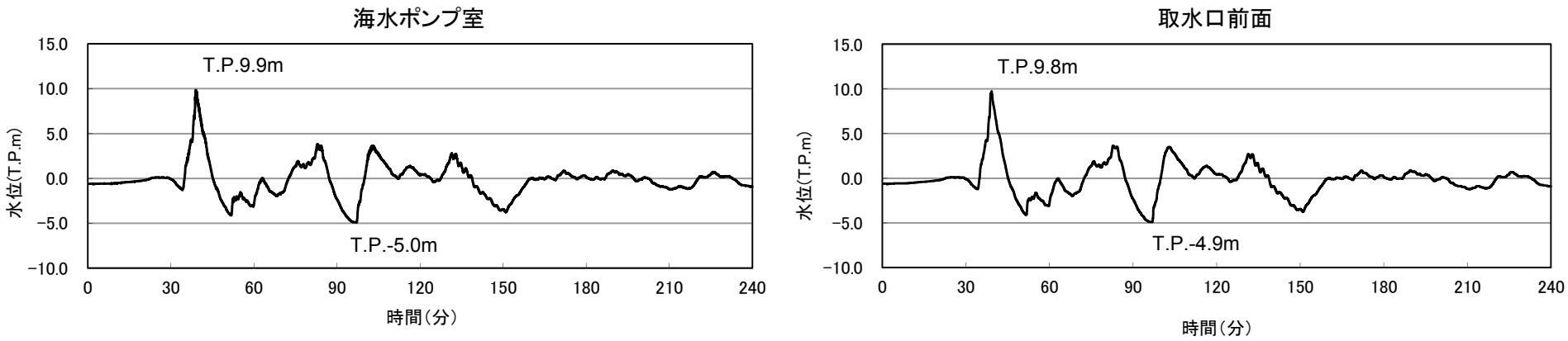
水位の時刻歴波形（水位上昇側）



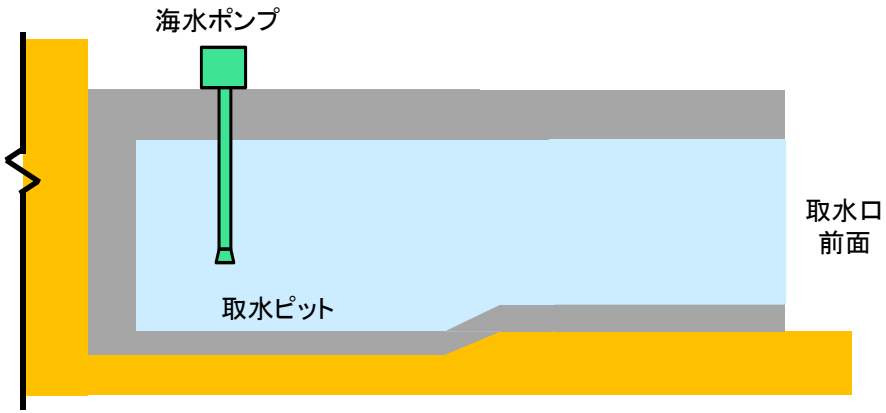
取水口概念図

解析条件（取水設備の水理特性を考慮した水変動解析結果：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。



水位の時刻歴波形（水位下降側）



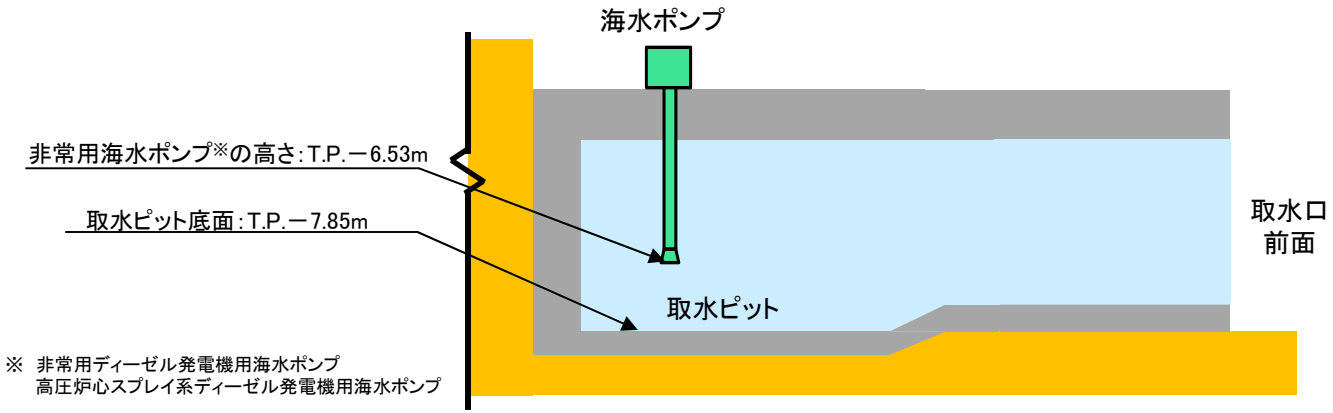
取水口概念図

評価結果

- 海水ポンプ室（取水ピット）における砂の堆積厚さは最大で0.01m程度であり，非常用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ないことを確認した。

評価結果

基準津波	砂移動モデル	浮遊砂上限濃度	海水ポンプ室における砂の堆積厚さ
水位上昇側	高橋他（1999）	1%	0.01 m
水位下降側	高橋他（1999）	1%	0.01 m



取水口概念図

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

2.2 砂移動評価（地形変化）

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

3. 参考文献

2. 参考文献

- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 茨城県東海地区海岸保全対策研究会(2005):茨城県東海地区海岸の保全に関する技術検討資料
- 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ー増補改訂版ー, pp826-833
- 千秋信一(1967):発電水力演習, pp76-89
- 土木学会(1999):水理公式集[平成11年版], pp373-377
- 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

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

2.2 砂移動評価（地形変化）

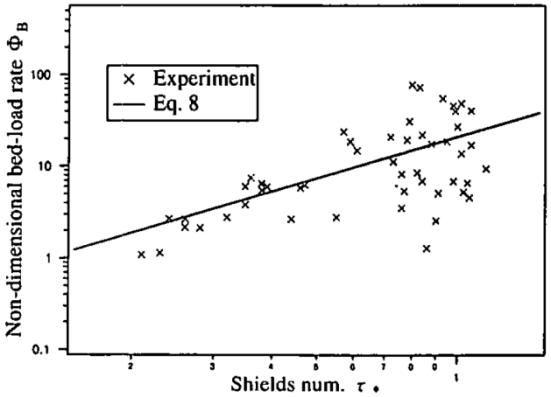
2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

3. 参考文献

高橋他（1999）の適用範囲と浮遊砂上限濃度について

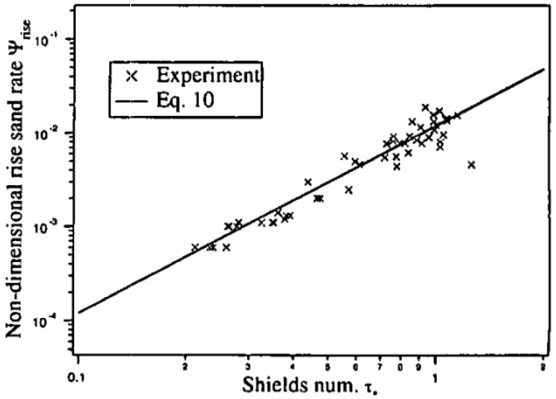
- 高橋他（1999）では，掃流砂量及び巻き上げ砂量の測定実験が行われ，シールズ数（無次元掃流力）で整理されており，実験範囲はシールズ数が概ね0.2～1程度となっている。
- 高橋（2012）によると，高橋他（1999）の手法において，津波の場合は巻き上げ砂が過大に見積もられる危険性があり，浮遊砂濃度の上限を便宜的に導入しているとされている。

高橋他（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

高橋他（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．

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

$$\beta=\begin{cases}7.0\times10^{-5} & (d=0.166mm)\\ 4.4\times10^{-5} & (d=0.267mm)\\ 1.6\times10^{-5} & (d=0.394mm)\end{cases} \quad (9)$$

・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，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．

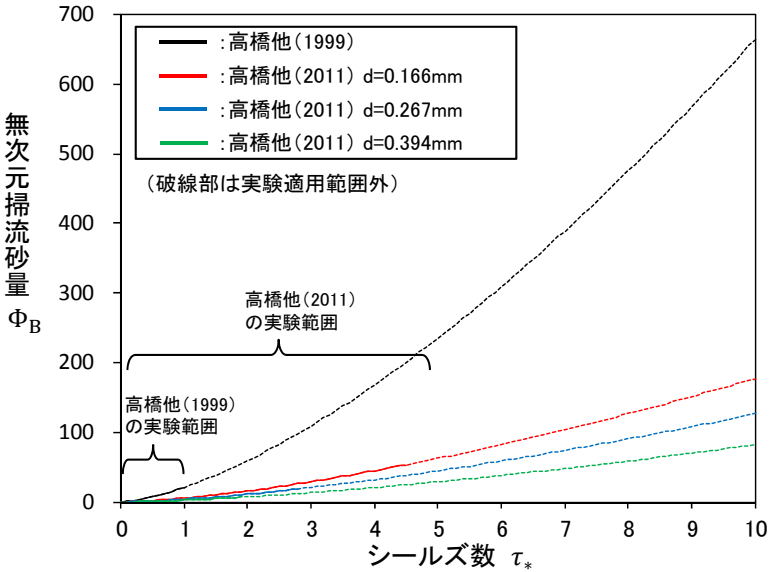
・複雑な実地形や波形勾配が大きな津波を対象とした場合，流速が時空間的に急激に変化することがあり，せん断応力の不連続性が強くなることがある．そのような流況が発生すると，現行モデルでは計算が不安定になりやすいため，計算スキームの改良が必要である．

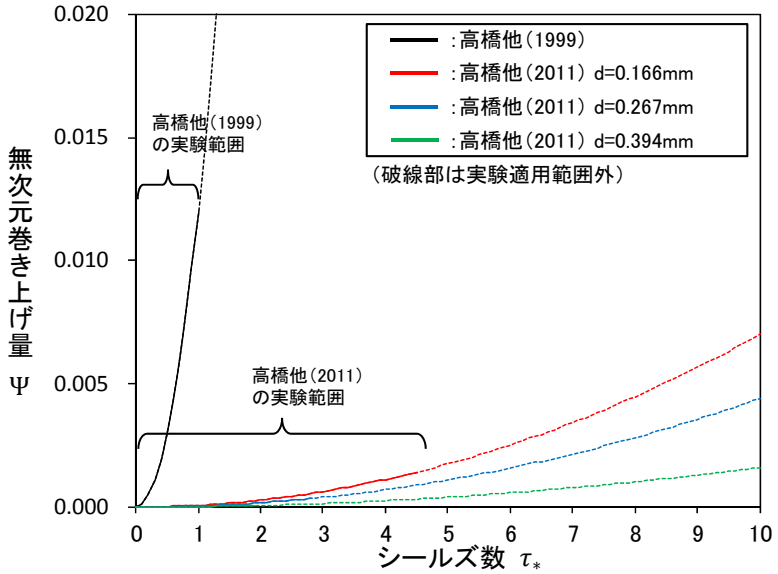
・固定床計算領域（流水のみを計算する領域）と移動床計算領域（流水と流砂の両方を計算する領域）の境界条件が確立されていない．特に浅海域では流砂量の不連続が生じて，計算の不安定性を招きやすいため，物理的な境界条件の検討と計算スキームの改良が必要である．

高橋（2012）に加筆

高橋他（1999）と高橋他（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，高橋他（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，高橋他（2011）はシールズ数が概ね0.2～5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，高橋他（2011）によれば，高橋他（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
高橋他（1999）	$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 21{\tau_*}^{1.5}$
高橋他（2011） d=0.166mm	$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 5.6{\tau_*}^{1.5}$
高橋他（2011） d=0.267mm	$\Phi_B = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 4.0{\tau_*}^{1.5}$
高橋他（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
高橋他（1999）	$\Psi = \frac{q_s}{\sqrt{sgd}} = 0.012{\tau_*}^2$
高橋他（2011） d=0.166mm	$\Psi = \frac{q_s}{\sqrt{sgd}} = 7.0 \times 10^{-5}{\tau_*}^2$
高橋他（2011） d=0.267mm	$\Psi = \frac{q_s}{\sqrt{sgd}} = 4.4 \times 10^{-5}{\tau_*}^2$
高橋他（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)

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

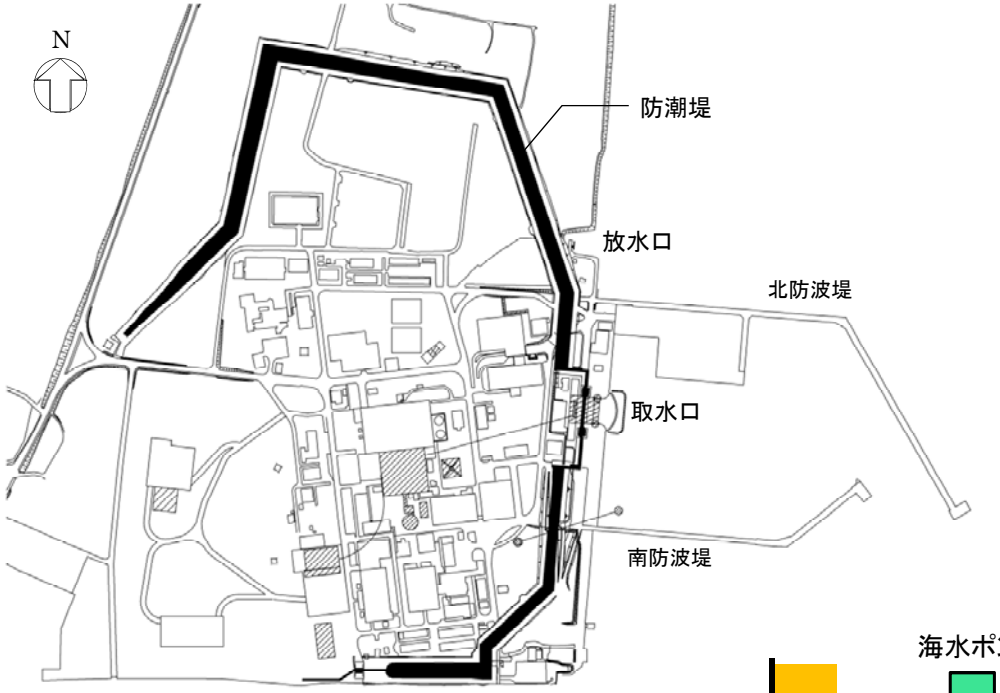
2.2 砂移動評価（地形変化）

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

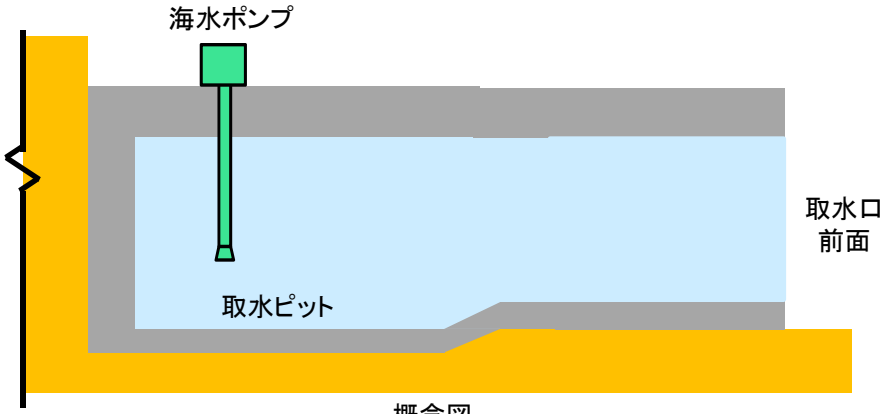
3. 参考文献

2.1 評価概要

- 高橋他(1999)の手法における浮遊砂上限濃度を3%とした場合の基準津波に対する安全性の評価に関して，以下を確認する。
  - ✓ 基準津波に伴う砂移動(地形変化)について評価を実施し，取水口が閉塞しないことを確認する。
  - ✓ 海水ポンプ室(取水ピット)における砂の堆積厚さを評価し，非常用海水ポンプの取水に影響がないことを確認する。



敷地平面図



概念図

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

2.2 砂移動評価（地形変化）

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

3. 参考文献

解析条件(浮遊砂上限濃度)

- 高橋他(1999)の浮遊砂上限濃度について，砂移動評価に関する論文を整理した。
- 検証の結果，浮遊砂上限濃度5%は過大評価となっている。
- 検証の結果，浮遊砂上限濃度1%は再現性が良好である。

高橋他(1999)の検証事例

実規模検証	文献	計算使用砂粒径	計算格子間隔	浮遊砂上限濃度	浮遊砂上限濃度に関する評価
気仙沼湾 (1960年チリ地震津波)	玉田他 (2009)	0.001～1mm	25m，5m	1%，5%	• 計算格子間隔5mの場合，浮遊砂上限濃度5%では実績値より侵食深を過大に評価
八戸港 (1960年チリ地震津波)	藤田他 (2010)	0.26mm	10.3m	1%，2%，5%	• 浮遊砂上限濃度5%は過大に評価 • 浮遊砂上限濃度1～2%の場合の再現性が良好
宮古港 (2011年東北地方太平洋沖地震津波)	近藤他 (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 (2011年東北地方太平洋沖地震津波)	森下他 (2014)	0.3mm	10m	1% $C_{sat}=\alpha\times\sqrt{U^2\times V^2}$	• 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 • 上記の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向上につながることを示唆

C_{sat}：飽和浮遊砂濃度　U，V：断面平均流速分布　α：係数（0.01）

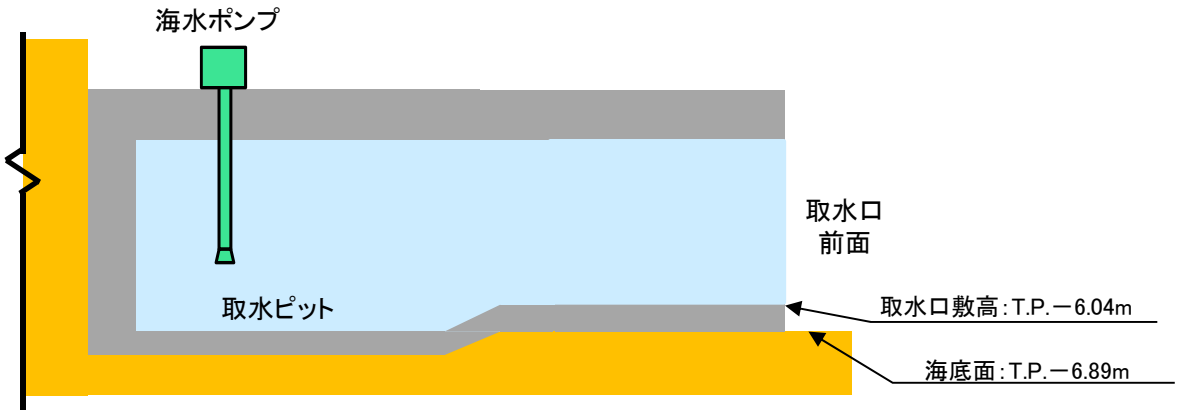
- 以上より，高橋他(1999)の浮遊砂上限濃度1%を基本とし，各検証箇所(各検証津波)(上表)を再現する浮遊砂上限濃度を上回る3%を影響評価用の設定値とした。

評価結果

- 取水口前面における砂の堆積厚さは，最大で0.6m程度であり，取水口は閉塞しない。
- 以上から，非常用海水ポンプの取水への影響はないことを確認した。

評価結果

基準津波	砂移動モデル	浮遊砂上限濃度	取水口前面における砂の堆積厚さ
水位上昇側	高橋他(1999)	3%	0.60 m
水位下降側	高橋他(1999)	3%	0.38 m



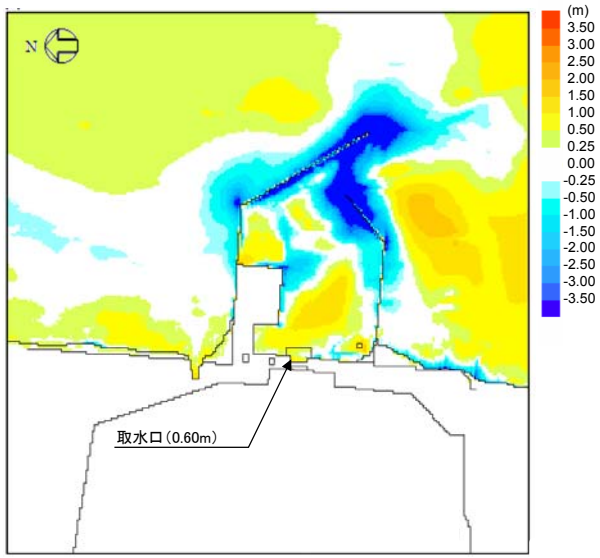
取水口概念図

余　白

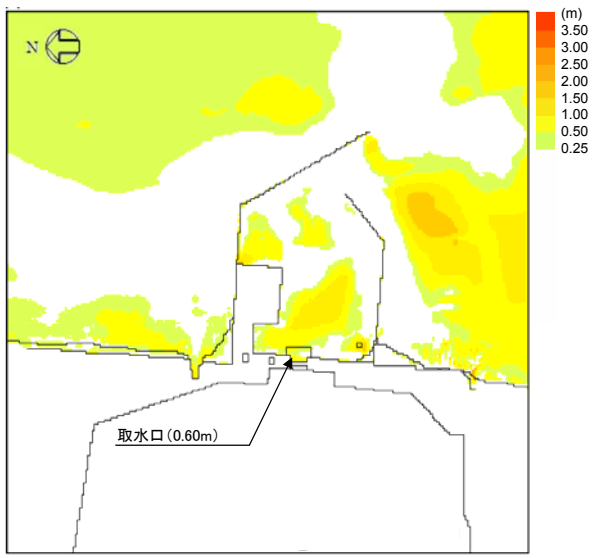
解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位上昇側)

■地形変化量分布(地震発生4時間後), 最大堆積量分布, 最大シールズ数分布

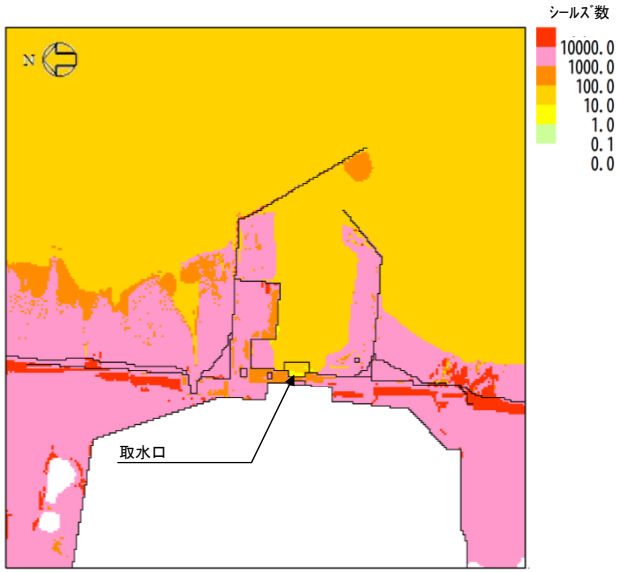
取水口前面における砂の堆積厚さ
0.60 m



地形変化量分布(地震発生4時間後)



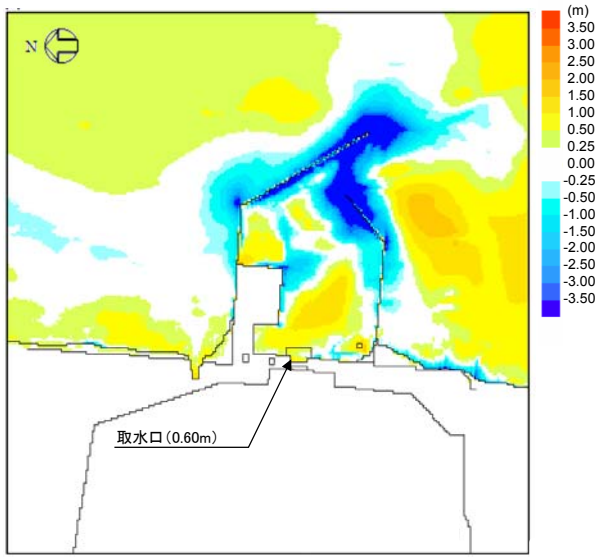
最大堆積量分布



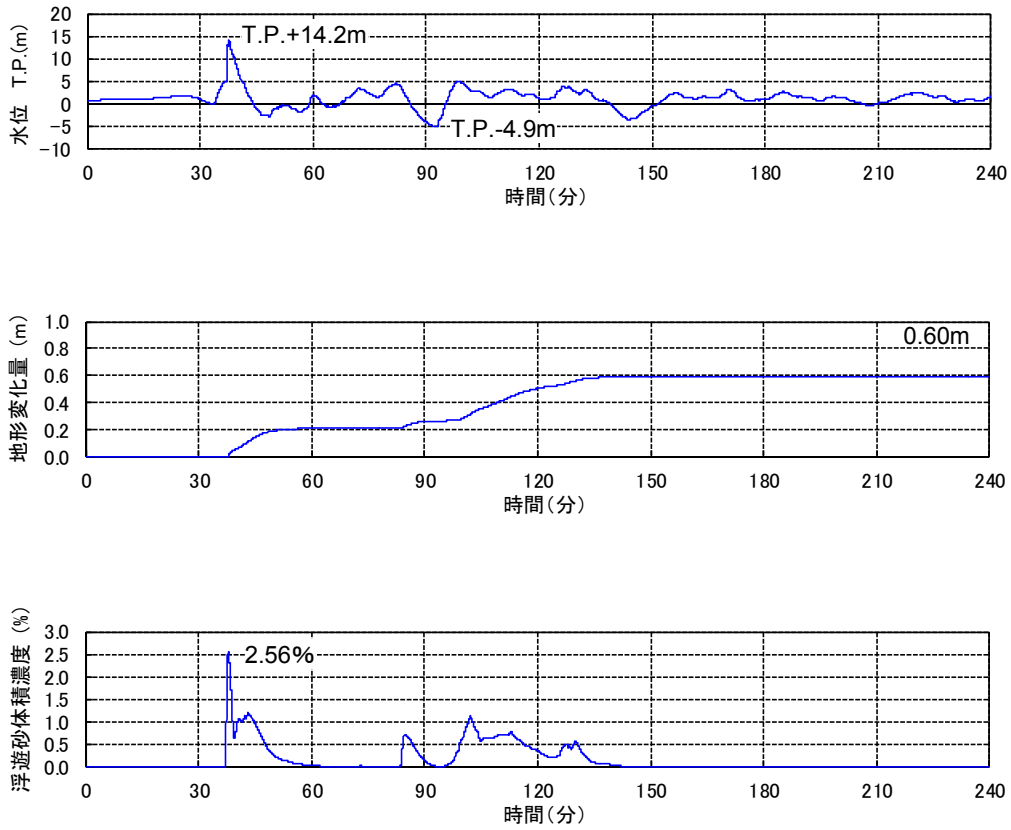
最大シールズ数分布

解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位上昇側)

■取水口前面における水位, 地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



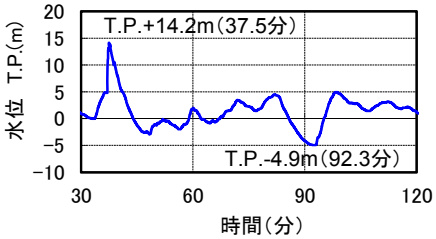
地形変化量分布(地震発生4時間後)



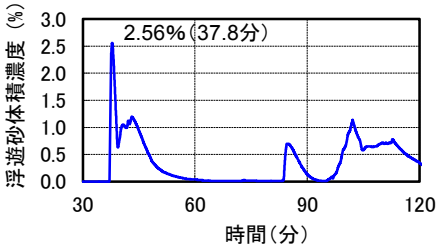
解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位上昇側)

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形, スナップショット(地震発生後34分～38分)

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約38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。



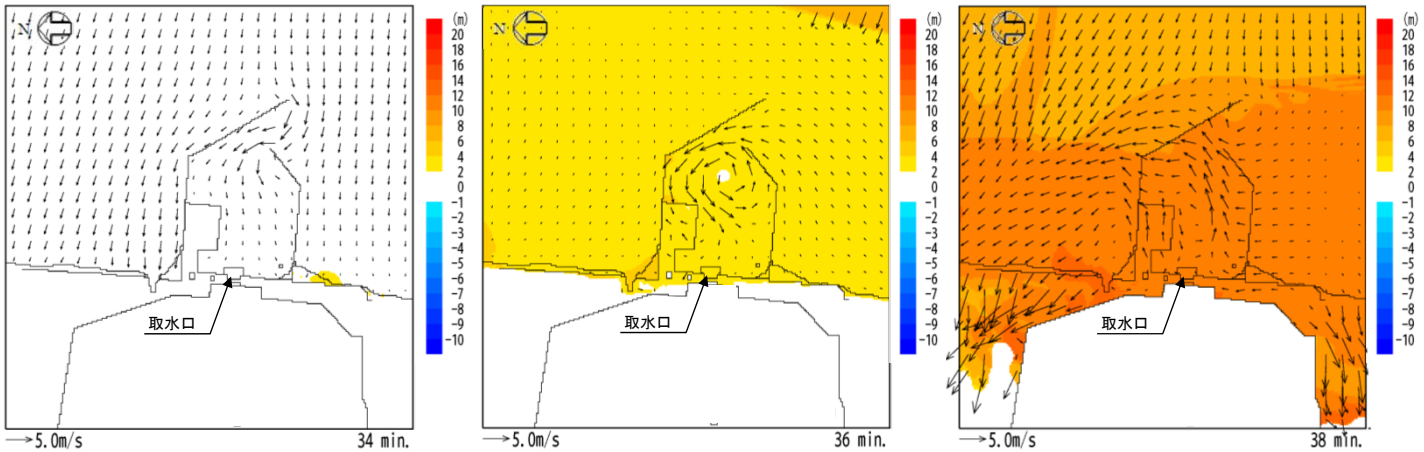
水位の時刻歴波形



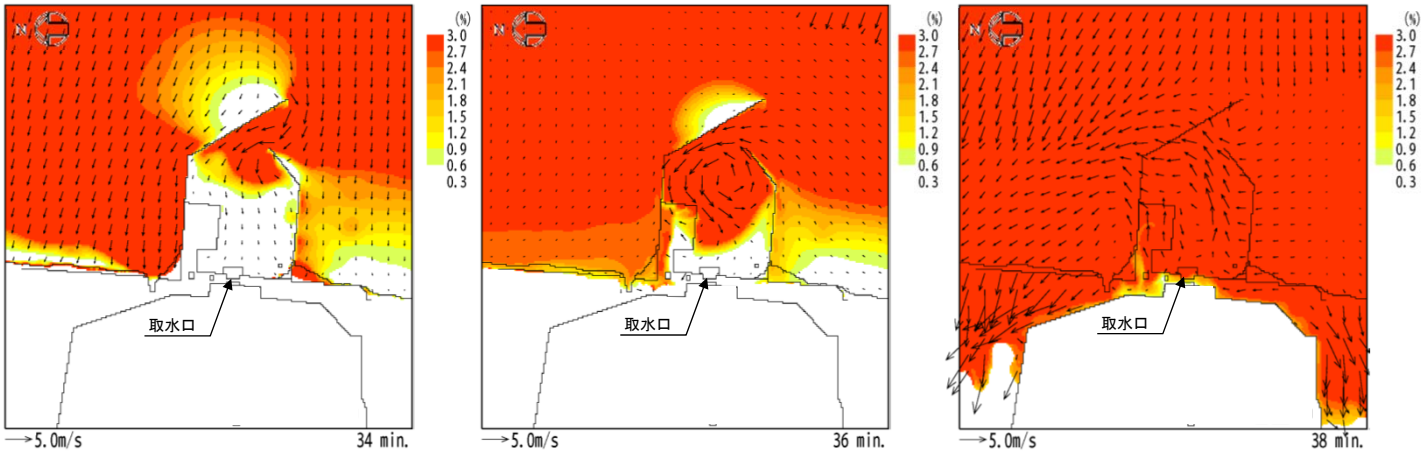
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後34分　地震発生後36分　地震発生後38分

【水位】



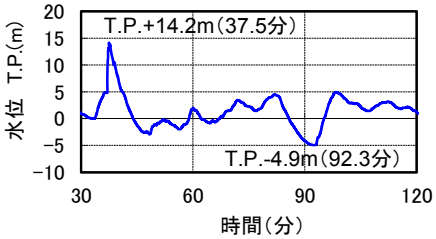
【浮遊砂体積濃度】



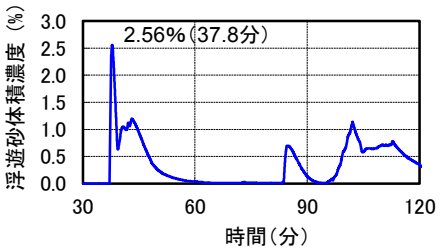
解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位上昇側)

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形, スナップショット(地震発生後38分～42分)

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約38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。



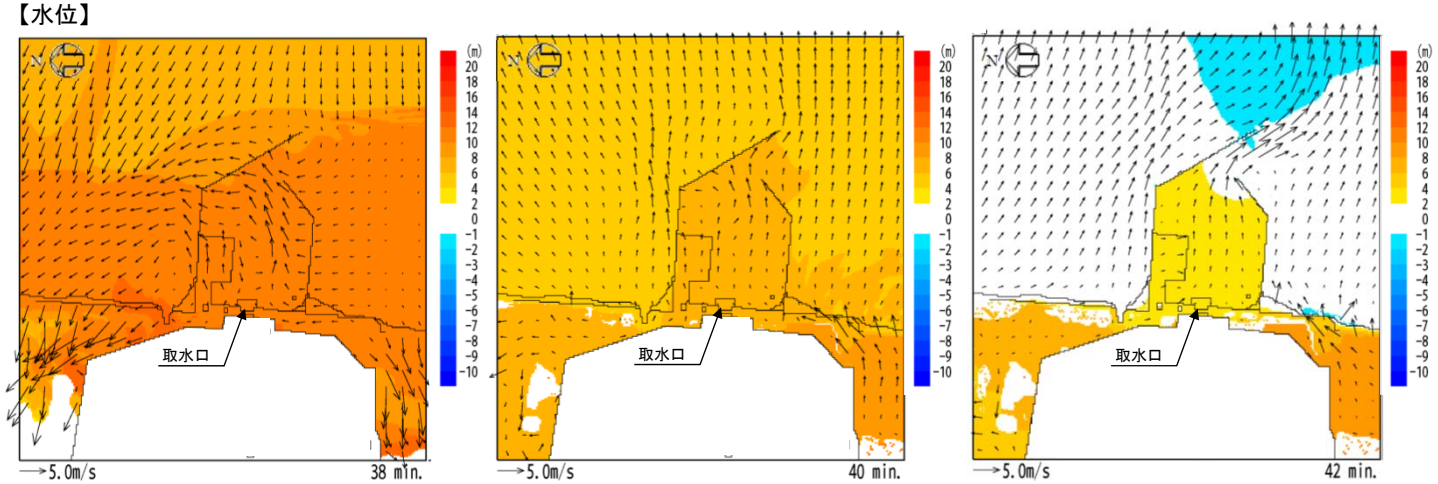
水位の時刻歴波形



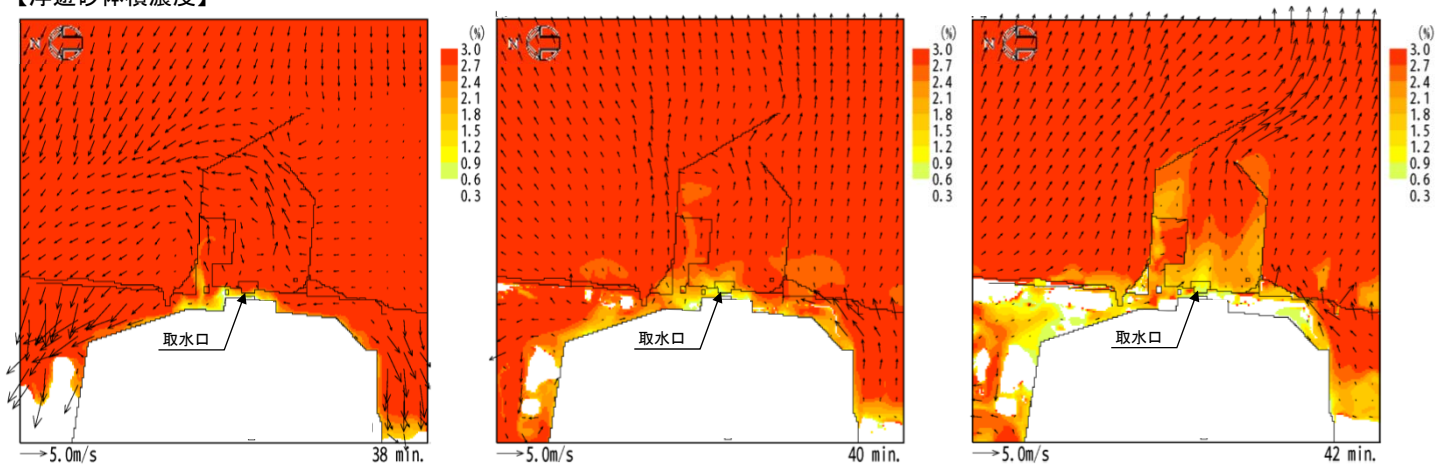
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後38分(前頁再掲)　　地震発生後40分　　地震発生後42分

【水位】



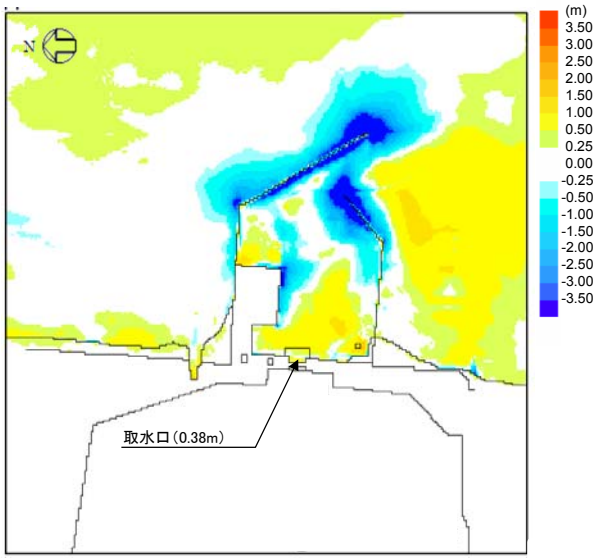
【浮遊砂体積濃度】



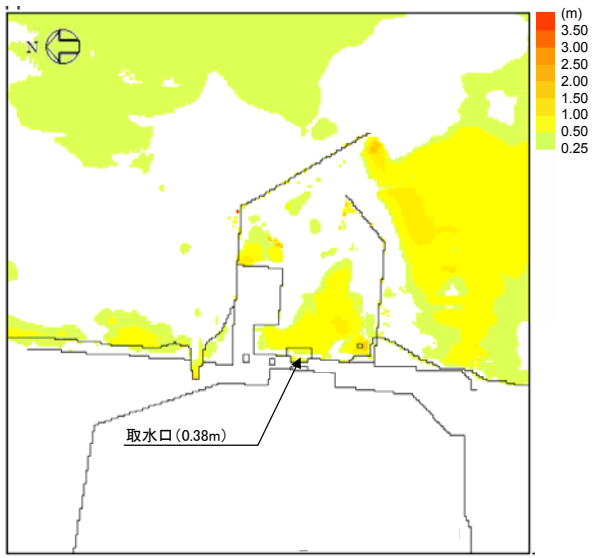
解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位下降側)

■地形変化量分布(地震発生4時間後), 最大堆積量分布, 最大シールズ数分布

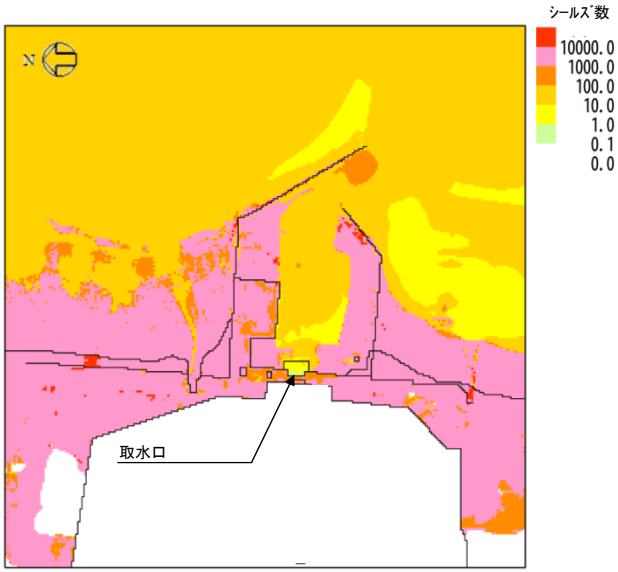
取水口前面における砂の堆積厚さ
0.38 m



地形変化量分布(地震発生4時間後)



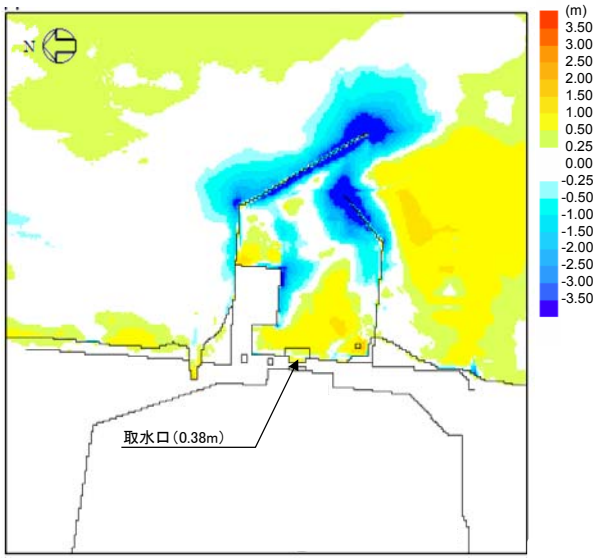
最大堆積量分布



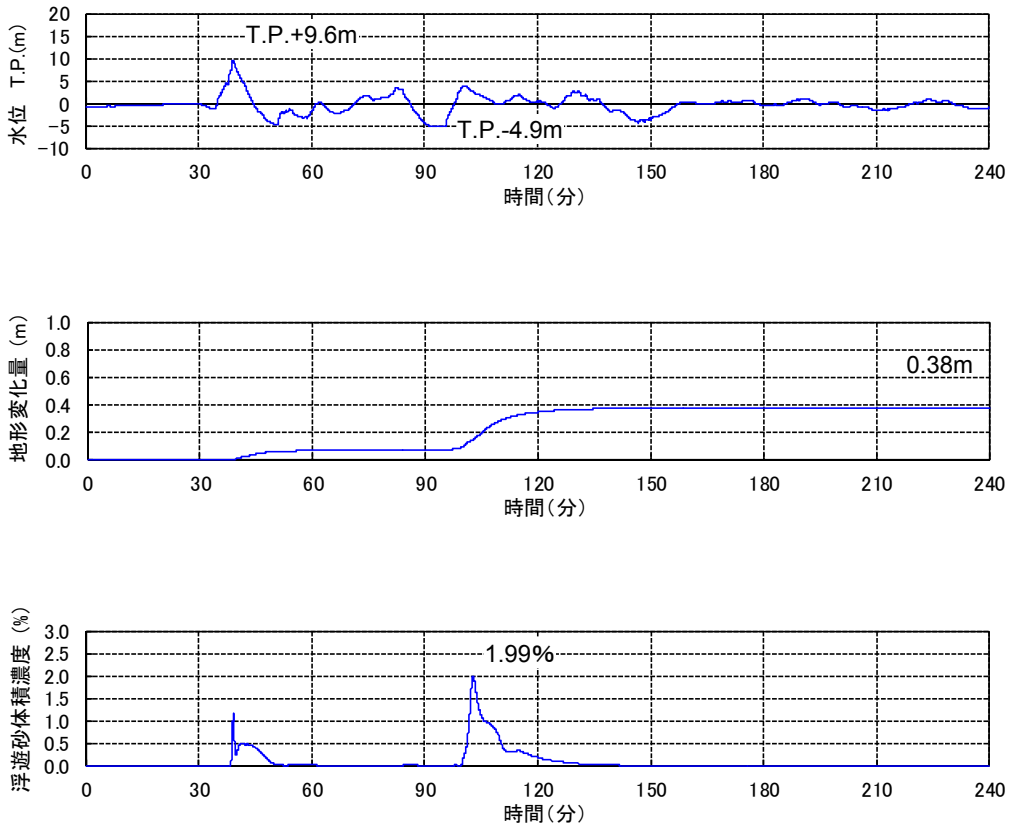
最大シールズ数分布

解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位下降側)

■取水口前面における水位, 地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴波形



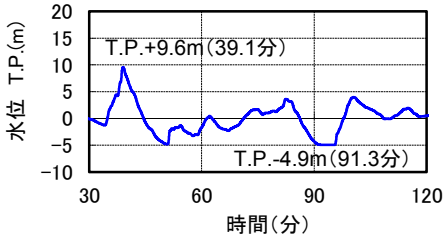
地形変化量分布(地震発生4時間後)



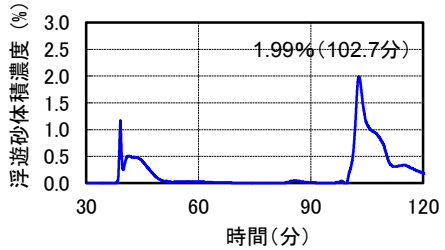
解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位下降側)

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形, スナップショット(地震発生後99分～103分)

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約103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。



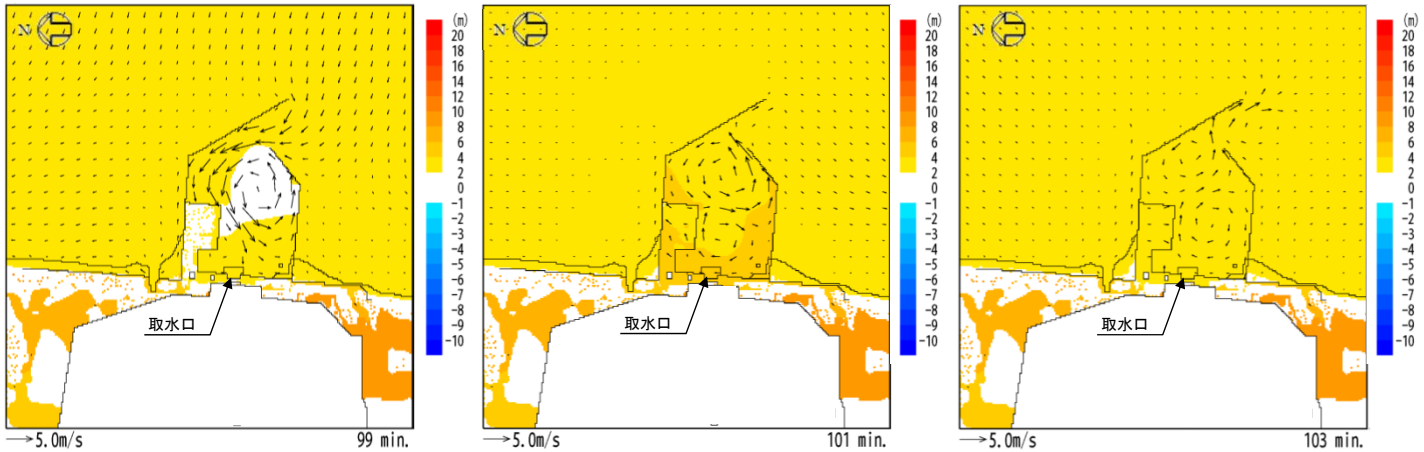
水位の時刻歴波形



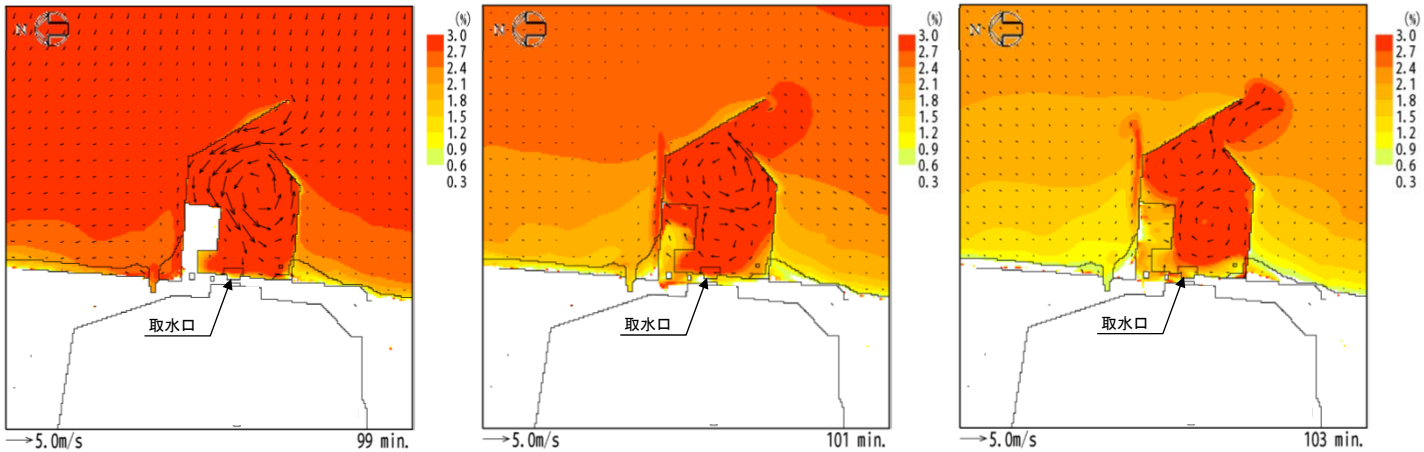
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後99分　地震発生後101分　地震発生後103分

【水位】



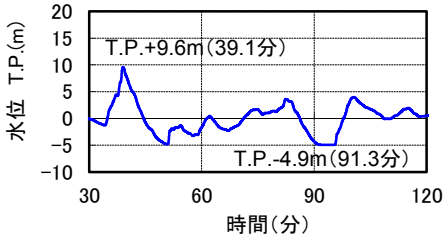
【浮遊砂体積濃度】



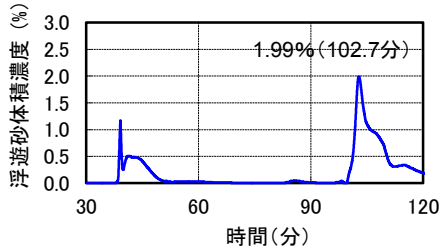
解析結果(高橋他(1999), 浮遊砂上限濃度:3%, 水位下降側)

■取水口前面における水位及び浮遊砂体積濃度の時刻歴波形, スナップショット(地震発生後103分～107分)

- 浮遊砂体積濃度が最大となる地震発生後約103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。



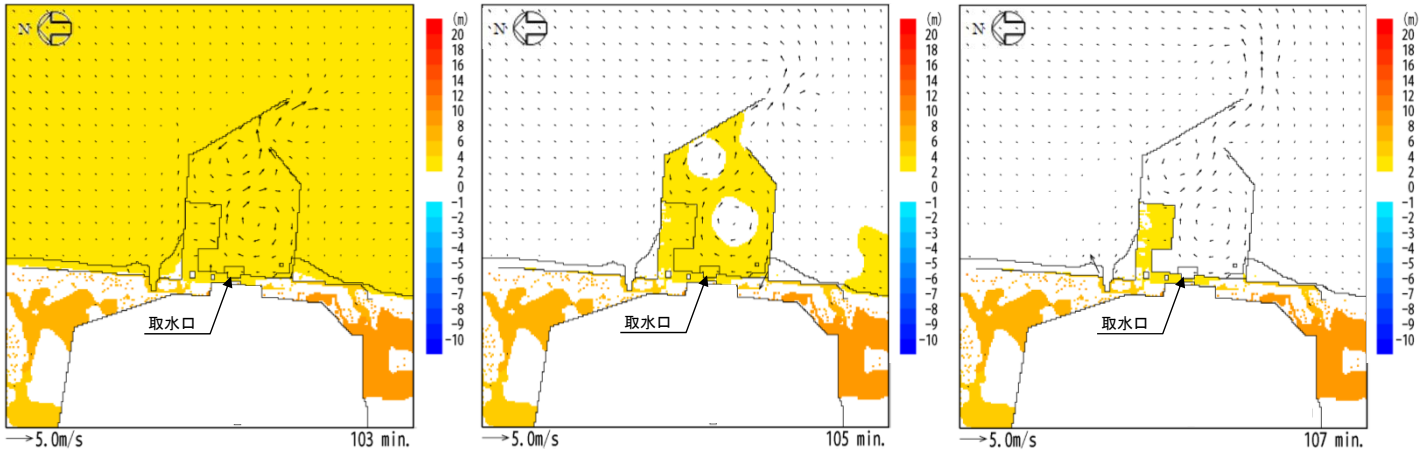
水位の時刻歴波形



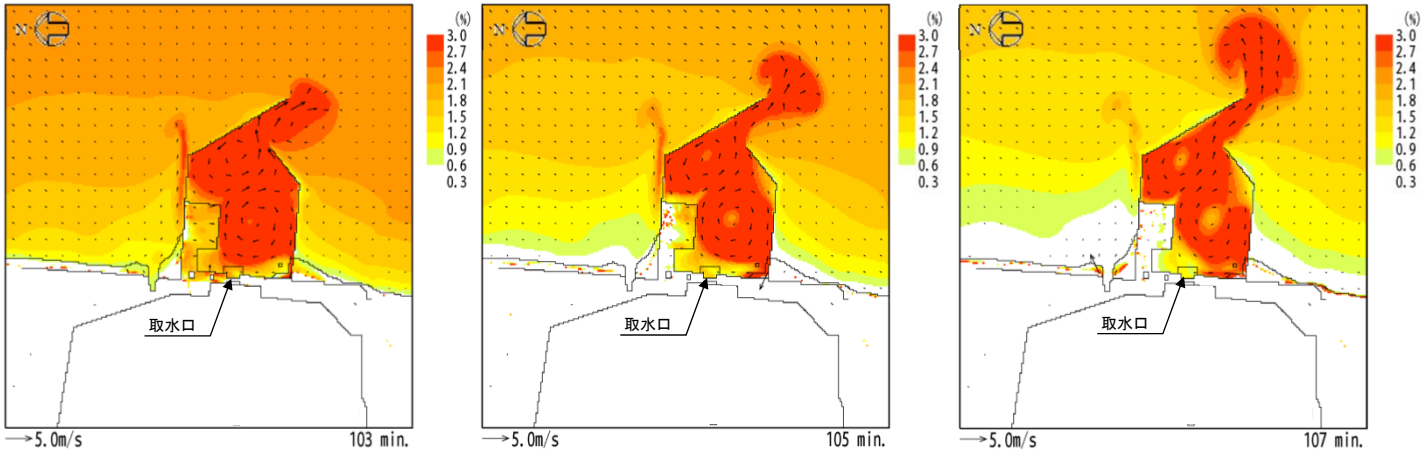
浮遊砂体積濃度の時刻歴波形

地震発生後103分(前頁再掲)　　地震発生後105分　　地震発生後107分

【水位】



【浮遊砂体積濃度】



目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

2.2 砂移動評価（地形変化）

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

3. 参考文献

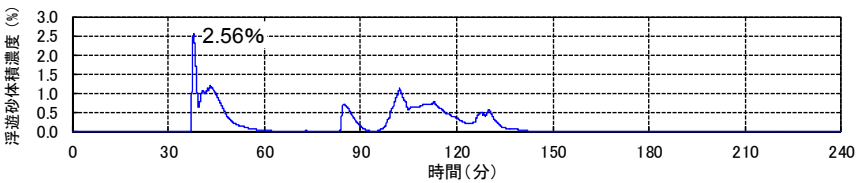
解析概要

- 海水ポンプ室(取水ピット)における砂の堆積厚さを評価し，非常用海水ポンプの取水に影響がないことを確認する。
- 取水設備を一次元でモデル化し，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，取水設備内の浮遊砂濃度を算定し，非常用海水ポンプ位置における砂の堆積厚さを算定した。
- 取水路及び海水ポンプ室内の流量及び流速は，当該解析モデルで計算される管路解析結果を使用した。
- 水路内の砂移動評価については，地形変化の検討において取水口前面における砂の堆積厚さが最も大きくなるケースを対象に，高橋他(1999)の手法に基づき数値シミュレーションを実施した。

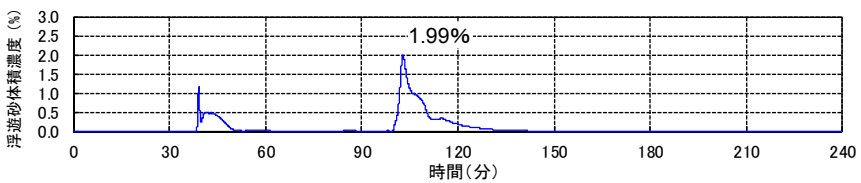
評価結果(地形変化)

基準津波	砂移動モデル	浮遊砂上限濃度	取水口前面における砂の堆積厚さ
水位上昇側	高橋他(1999)	3%	0.60 m
水位下降側	高橋他(1999)	3%	0.38 m

■取水口前面における浮遊砂体積濃度の時刻歴波形(高橋他(1999)，浮遊砂上限濃度:3%)



水位上昇側



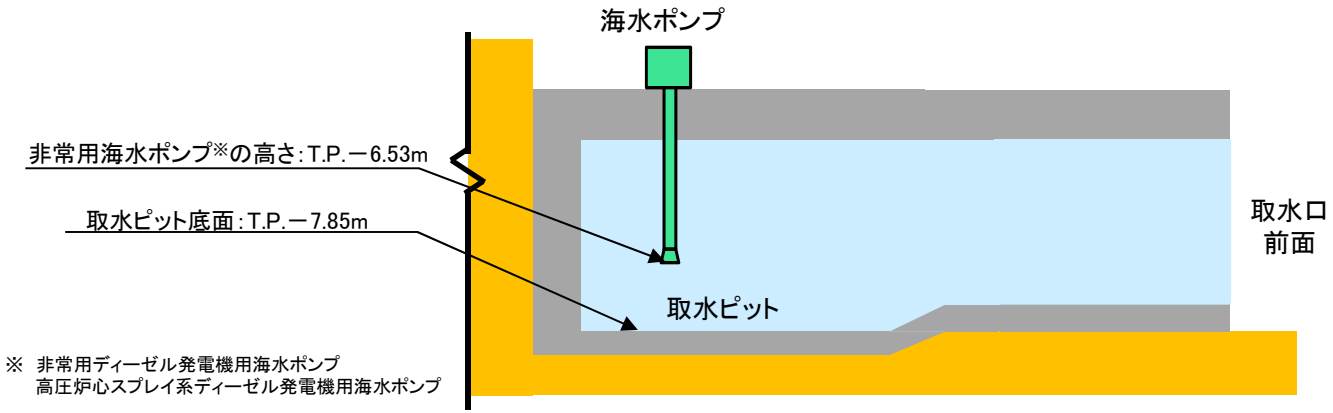
水位下降側

評価結果

- 海水ポンプ室(取水ピット)における砂の堆積厚さは最大で0.01m程度であり，非常用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ないことを確認した。

評価結果

基準津波	砂移動モデル	浮遊砂上限濃度	海水ポンプ室における砂の堆積厚さ
水位上昇側	高橋他(1999)	3%	0.01 m
水位下降側	高橋他(1999)	3%	0.01 m



取水口概念図

目　次

1. 基準津波に対する安全性評価

1.1 評価概要

1.2 砂移動評価（地形変化）

1.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

2. 参考文献

補足説明資料

1. 高橋他（1999）の手法に関する補足資料

2. 高橋他（1999）の手法における浮遊砂濃度の影響評価

2.1 評価概要

2.2 砂移動評価（地形変化）

2.3 砂移動評価（海水ポンプ室における砂の堆積厚さ）

3. 参考文献

3. 参考文献

- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 茨城県東海地区海岸保全対策研究会(2005):茨城県東海地区海岸の保全に関する技術検討資料
- 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ー増補改訂版ー, pp826-833
- 千秋信一(1967):発電水力演習, pp76-89
- 土木学会(1999):水理公式集[平成11年版], pp373-377
- 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, Vol.71, No.2, p.145-155
- 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