

高浜湾を対象とした津波による砂移動評価における飽和浮遊砂濃度の設定に関する考察

村上 嘉謙¹・志方 建仁²・殿最 浩司²・菅原 大助³・平石 哲也⁴

Study on setting of saturation concentration of suspended sediment in numerical simulation of sediment transport associated with tsunami for off Takahama Bay

Yoshikane MURAKAMI¹, Takemi SHIKATA², Koji TONOMO²,
Daisuke SUGAWARA³ and Tetsuya HIRAIISHI⁴

Abstract

As for the estimation of sediment transport accompanied with tsunami, a numerical model considering the exchange sediment volume of the bed-load layer and suspended-sediment layer has been proposed. As for the Takahashi et al. (1999) model, properly setting of the saturation concentration as a parameter is considered one of the key issue, since this parameter may affect the calculation result. In this study, we compared the submarine topography changes calculated by two different models in extensive calculation domain under the condition that the saturation concentration was given as constant value, and showed that the aspect of topographic change greatly differs between both models. And also, we applied relational formula related to the saturation concentration proposed by Sugawara et al., 2014 and considered the spatial and temporal transition of this parameter. As a result, it is considered that the volume of suspended-sediment is estimated to be excessively large overall in this extensive calculation domain with the setting that the saturation concentration is given as constant value of 1%. In addition, it is also shown that it is difficult to determine the appropriate constant value applicable to the extensive calculation domain.

キーワード：津波，砂移動，移動床モデル，飽和浮遊砂濃度，海底地形変化

Key words: tsunami, sediment transport, movable bed model, saturation concentration of suspended sediment, submarine topography change

¹ 関西電力（株）水力エンジニアリングセンター
Hydropower Engineering Center, Kansai Electric Power Co., Inc.

² （株）ニュージェック港湾・海岸グループ
Port and Coastal Engineering Group, Newjec Inc.

³ ふじのくに地球環境史ミュージアム
Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka

⁴ 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本報告に対する討議は平成 31 年 2 月末日まで受け付ける。

1. はじめに

原子力発電所の新規規制基準適合性審査にあたっては、その審査ガイド(原子力規制委員会, 2013)において、津波そのものによる水位上昇および下降に伴う影響に加えて、津波の二次的影響として、基準津波による水位変動に伴う海底の砂移動・堆積等に対して、取水口および取水路の通水性の確保が求められている。

津波に伴う砂移動および海底地形変化に関しては、掃流砂層と浮遊砂層の交換砂量を考慮したモデルが提案され、既に実務に用いられている(例えば藤井ほか(1998), 高橋ほか(1999)。以下、藤井モデル, 高橋モデルという。)。このうち、高橋モデルを用いて砂移動計算を行う場合は、パラメータとして飽和浮遊砂濃度を便宜的に設定する必要があるが、飽和浮遊砂濃度が計算結果に与える影響は大きく、その設定方法の高度化が課題となっている。

従来、高橋モデルにおける飽和浮遊砂濃度は、物理的な根拠を持たない時空間的に一定の値(定数)として便宜的に与える方法が一般的であり、その設定値については港湾内等の比較的狭域を対象とした複数の実規模検証結果が示されている(表4を参照)が、計算領域を広域とした場合の検証はなされていない。また、近年の研究では、高橋モデルにおいて、流速と水深に応じた関数で飽和浮遊砂濃度を設定する手法(例えば菅原ほか(2014), 今井ほか(2015)。)の研究が進んでおり、より精度の高い砂移動予測が可能となるとされている。

本研究では、関西電力高浜発電所の基準津波を対象に、高橋モデルに飽和浮遊砂濃度を時空間的に一定の定数として与えた場合の発電所周辺の比較的広い海域における地形変化を算出し、藤井モデルによる計算結果と比較を行った。また、菅原ほか(2014)および今井ほか(2015)で提案された飽和浮遊砂濃度関係式を同計算領域に適用し、高橋モデルにおける飽和浮遊砂濃度の時間的な推移に関する考察を行った。

2. 砂移動の計算方法と飽和浮遊砂濃度

2.1 砂移動の計算方法と計算条件

津波に伴う掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した移動床モデルとして、実現象との比較による検証がなされており、審査ガイドにも例示されている藤井モデルおよび高橋モデルに基づいた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を図1に、モデルの支配方程式を表1に示す。

また、砂移動評価に当たっての各種計算条件を表2に、砂移動計算の計算領域および計算格子間隔を図2に示す。

砂移動数値シミュレーションは、図1に示すとおり、流体の計算(津波シミュレーション)パートと砂移動の計算パートの2つのパートで構成されている。まず、高浜発電所の基準津波を対象に、後藤・小川(1982)に基づく非線形長波理論式および連続式を Staggered Leap-frog 法で差分化した平面二次元津波シミュレーションを行う。ここで、本研究に用いた高浜発電所の基準津波は、福井県が想定する若狭海丘列付近断層による地震に起因して、隠岐トラフに想定した大規模な海底地

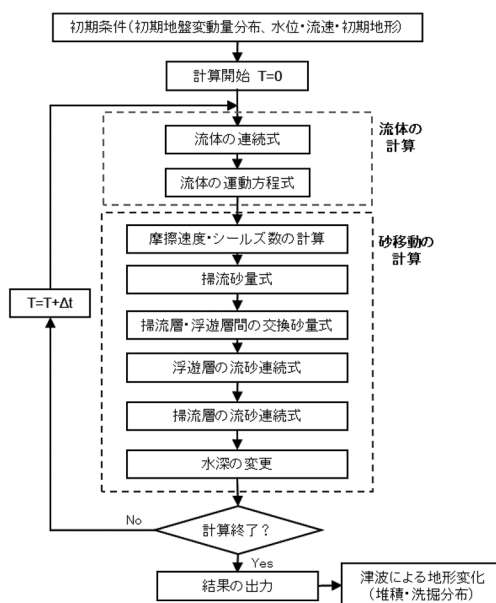


図1 砂移動数値シミュレーションのフロー

表1 各モデルの支配方程式

	藤井モデル	高橋モデル
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	$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial(C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial(MC_s)}{\partial x} - \frac{E-S}{\sigma} = 0$
掃流砂量式	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 $Q = 21\tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
浮遊砂層への 巻き上げ算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{ \frac{-wD}{k_z} \right\} \right]}$	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 $u_* / U = \kappa / (\ln(h/Z_s) - 1)$ 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
 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 (=u*²/sgd)
 u* : 摩擦速度(m/s) σ : 砂粒の密度 (g/cm³) ρ : 海水の密度 (g/cm³)
 s : =σρ-1 g : 重力加速度 (m/s²) d : 砂の粒径 (mm)
 U : 流速 (m/s) D : 全水深 (m)
 n : Manningの粗度係数 (=0.03m^{-1/3}・s 土木学会(2016)より)
 w : 土粒子の沈降速度 (Rubey式より算出) (m/s)
 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, 藤井ほか(1998))
 k_z : 鉛直拡散係数 (0.2κ・u*・h, 藤井ほか(1998)より) (m²/s)
 κ : カルマン定数 (=0.4, 藤井ほか(1998)より)
 h : 水深 (m) Z₀ : 粗度高さ (=ks/30) (m) ks : 相当粗度 (=d) (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)
 λ : 空隙率 (=0.4, 高橋ほか(1992)より)

表2 砂移動評価における計算条件

設定項目	設定値
砂移動モデル	・藤井モデル ・高橋モデル
解析領域	高浜発電所周辺海域 (東西約11.4 km, 南北約10.2 km の範囲)
空間格子間隔	6.25 m → 3.125 m
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およ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流入出を考慮する
陸域境界条件	完全反射条件
飽和浮遊砂濃度	藤井モデル: 5 % 高橋モデル: 1 %
砂の粒径	0.117 mm (関西電力, 2014による)
砂粒の密度	2.686 g/cm ³ (関西電力, 2014による)
海水の密度	1.03 g/cm ³
空隙率	0.4 (高橋ほか, 1992による)
マンングの粗度係数	0.03 (土木学会, 2016による)
限界摩擦速度	岩垣式 (岩垣, 1956) で算定
計算潮位	T.P.0.00 m
計算時間	地震発生後3.0時間
初期砂層厚	無限厚さ (発電所周辺を除く)

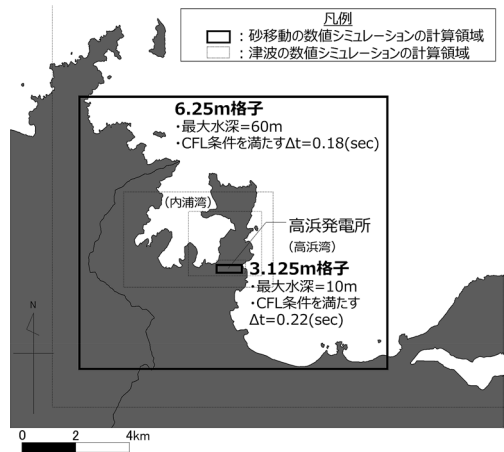


図2 砂移動計算の計算領域および計算格子間隔

すべりが発生したと仮定した場合の、両波源による津波の組み合わせ（重畳）を考慮した仮想的な津波であり、同発電所取水口前面で水位上昇が最大約4.5 mとなる、既往最大津波（同発電所周辺で高さ1 m程度）を大きく上回る規模のものである。図3に基準津波の波源位置を、表3に基準津波のパラメータを示す。

次に、平面二次元シミュレーションで得られた水位および単位幅当たりの流量を砂移動計算領域の沖側境界から与え、砂移動の計算パートに引き継ぐ。砂移動計算領域では、図1の下側の点線枠内のフローに従って順次移動床計算を実施し、海底の侵食・堆積に伴う地形変化を反映するとともに、計算領域境界での砂の流入出を考慮した上で再度流体の計算パートに戻るという流れで計算を実施し、津波により刻一刻と変化する海底地形を算定した。

ここで、計算領域は、高浜発電所を中心とした

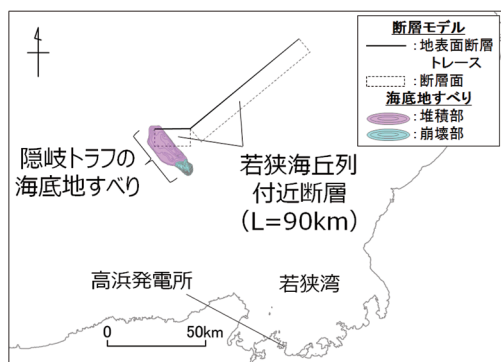


図3 高浜発電所基準津波の波源位置図

表3 高浜発電所の基準津波のパラメータ

波源	パラメータ	設定値
若狭海丘列 付近断層	断層長さ	90 km
	断層幅	17.32 km
	地震規模 Mw	7.63
	上端深さ	0.1 km
	傾斜角	60°
	すべり角	90°
	すべり量	6.43 m
隠岐トラフの 海底地すべり	鉛直方向 破壊伝播速度	1 m/s
	破壊継続時間	2分

内浦湾および高浜湾を含む約10 km 四方とし、海岸や施設付近の浅海部と比べて流況が大きく異なると考えられる比較的水深の深い沖合（水深約60 m）まで含まれるように、表4に示す。既往の研究事例よりも広域に設定した。計算領域の空間格子間隔は原則として6.25 mとし、評価対象地点の位置や地形を考慮して、最小3.125 m間隔とした詳細計算領域を設けた。また、移動床モデルにおける初期砂層厚の設定に当たっては、発電所近傍の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無限厚とした。さらに、砂の粒径および密度については、関西電力（2014）に基づき、高浜発電所建設時の海底土質調査を基に設定した。粒径については、代表して中央粒径（D50）を用いることとし、砂移動に寄与が大きい範囲として、海底面より1 mの深さまでの調査結果を対象とした。採取した各試料の粒径および密度のデータは、平均した値を計算条件として用いた。

2.2 飽和浮遊砂濃度について

高橋モデルの浮遊層の流砂連続式に現れる浮遊砂体積濃度の上限値（飽和浮遊砂濃度）については、後述の通りその設定によって砂移動特性が異なり、地形変化の再現性に大きな影響を与え得ることから、本モデルを用いるに当たっては、飽和浮遊砂濃度を適切に設定する必要がある。

高橋モデルの飽和浮遊砂濃度の設定に関する検証事例を表4に整理した。これによると、玉田ほか（2009）では、1960年チリ津波による気仙沼港における地形変化の再現計算の中で、空間格子間隔と飽和浮遊砂濃度を変化させたパラメータスタディを実施しており、空間格子間隔25 mで飽和浮遊砂濃度を5%とした場合に実測値とよく一致するが、空間格子間隔5 mで飽和浮遊砂濃度を5%とした場合には実績値より侵食深が過大評価されるとしている。藤田ほか（2010）は、同様にチリ津波による八戸港における地形変化の再現計算を実施しており、空間格子間隔10.3 mで飽和浮遊砂濃度を5%とした場合は堆積を過大評価するのに対して、1~2%とすると良好な再現性が

得られるとしている。近藤ほか (2012) では、東北地方太平洋沖地震津波による宮古港における検証結果より、空間格子間隔10 m で飽和浮遊砂濃度を1%とした場合に、最大洗掘深や断面地形が定量的によく一致するとしている。一方、東北電力 (2017) では、東北地方太平洋沖地震津波による女川湾における検証結果より、空間格子間隔5 m で飽和浮遊砂濃度を1%とした場合に、全体的な地形変化の分布が過大な傾向を示している。

以上より、本研究のように空間格子間隔を6.25 m ~3.125 m とした場合の高橋モデルにおける飽和浮遊砂濃度の設定は1%程度が概ね妥当であると考えられる。一方、これらの検証結果は、港内などの比較的狭い範囲の地形変化を対象としており、広域で検証された事例はないため、計算領域を広域に設定した場合の、飽和浮遊砂濃度の適正な設定値について考察を行うこととした。本研究において、高橋モデルに適用する飽和浮遊砂濃度の設定は、近藤ほか (2012) および東北電力 (2017) を参考に、1%とした。一方、藤井モデルについては、東北電力 (2017) より、飽和浮遊砂濃度を1%および5%とした設定で地形変化量に顕著な差が見られず、高橋モデルの1%の設定と比較して地形変化量が小さいとされていることから、5%を適用した。

3. 砂移動計算結果

3.1 計算手法による地形変化量の違い

図4に、若狭湾に位置する高浜発電所周辺海域において、同発電所の基準津波を対象に、藤井モデルおよび高橋モデルを適用した砂移動計算の結果を示す。

図4によると、藤井モデルでは、砂移動による地形変化は海岸近傍に限られ、水深が30 m を超える比較的深いところでは地形変化がほとんど見られないことがわかる。一方、高橋モデルでは、飽和浮遊砂濃度を1%とした設定であっても、せいぜい津波高さが2, 3 m ほどの水深が30 m を超えるような沖合でも、広範囲かつ大規模な侵食が認められる。また、藤井モデルでは堆積が見られた海岸近傍においても、侵食のみとなる結果が得られた。

次に、図5に高浜発電所の基準津波による津波シミュレーションの最大流速を用いて、高橋モデルにおける最大シールズ数 (無次元掃流力) の空間分布を整理した結果を示す。これによると、取水口から海岸線付近においてはシールズ数が顕著に大きくなっており、また、沖合部についてもシールズ数が5を超える領域が広範囲に広がっていることが分かる。高橋モデルでは、シールズ数が概ね0.2~1.0程度の実験から得られた結果に基づき、掃流砂量式および巻き上げ砂量式が設定されており、上述の結果はこの適用範囲を大きく超えている。高橋 (2012) によると、高橋モデルの課題と

表4 高橋モデルにおける飽和浮遊砂濃度の設定に関する検証事例

文献	実規模検証	砂粒径	計算格子間隔	飽和浮遊砂濃度	飽和浮遊砂濃度に関する知見
玉田ほか (2009)	気仙沼湾 (チリ津波)	0.001 mm ~ 1 mm	・ 25 m ・ 5 m	・ 1 % ・ 5 %	・ 5 m 格子での計算の結果、浮遊砂濃度上限5%では実績値より浸食深を過大評価
藤田ほか (2010)	八戸港 (チリ津波)	0.26 mm	・ 10.3 m	・ 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
近藤ほか (2012)	宮古港 (東北地方太平洋沖地震津波)	0.08 mm	・ 10 m	・ 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
東北電力 (2017)	女川湾 (東北地方太平洋沖地震津波)	0.215 mm	・ 5 m	・ 1 %	・ 全体的な地形変化の分布は過大な傾向を示す ・ シールズ数が顕著に大きな防波堤港口部付近で過大な侵食傾向が見られる

して、「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」「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」とされていることから、藤井モデルとの地形変化傾向の違いと併せて、本海域においては、高橋モデルによる飽和浮遊砂濃度の設定が1%であっても、浮遊砂の巻き上がりが過大に評価されている可能性が否定できない。

3.2 高橋モデルによる計算結果の特徴

高橋モデルによる砂移動計算で見られた、比較的水深の深い沖合部における広範囲の砂の侵食を考察するため、当該海域付近に津波第一波が到着した前後の時間における流況を確認した。図6の上段左図は、津波第一波(押し波)が高浜発電所の東方沖合海域に到達した時刻(地震発生後44分後)の浮遊砂濃度の平面分布を、右図は同時刻における流向・流速を示すベクトル図である。左図では、海域部の背景色が青から黄色になるにつれて浮遊砂濃度が高いことを示しており、黄色は浮遊砂濃度が1%、すなわち飽和に達していることを表している。また、右図は矢印の向きと大きさを表している。

が各点における津波の流向と流速を表しており、背景色が青色の部分海面が初期水位から低下していることを、赤色の部分は上昇していることを表している。同様に、図6の中段は地震発生後46分後、下段は同48分後をそれぞれ示している。

これによると、地震発生後44分後においては、

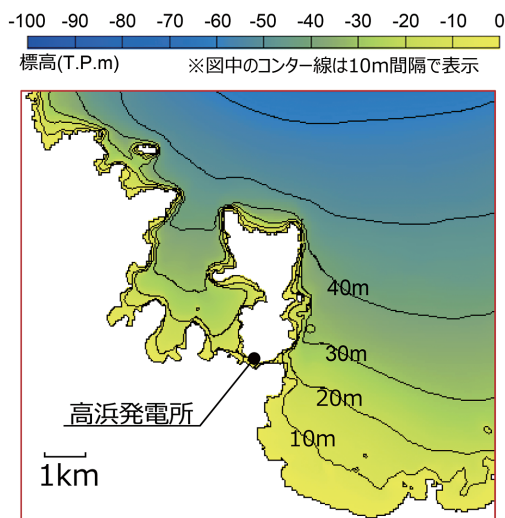


図4 (1) 発電所周辺の海底地形

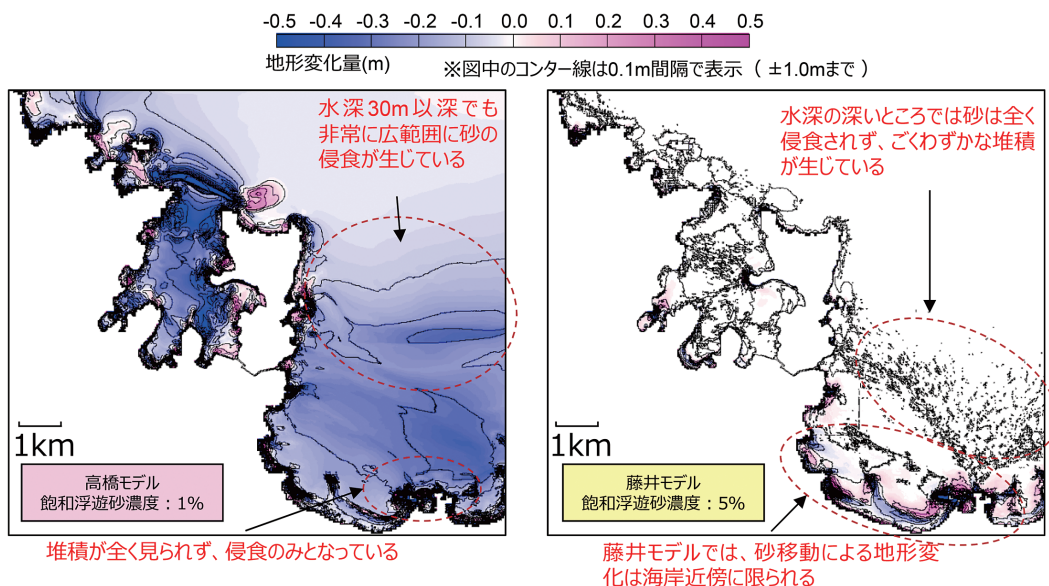


図4 (2) 各モデルによる海底地形変化

津波の第一波が高浜発電所取水口の東方海域に達しており、南方の三松海岸に向かって進行していることがわかる。このとき、高浜発電所取水口の南方沿岸部の比較的流速が速い領域では、顕著な砂の巻き上がりが生じ、浮遊砂濃度が飽和濃度に達している。また、発電所の東方海域においても、1 m/s 程度と比較的流速の遅い押し波第一波が通過した時点で、水深が比較的深い沖合部の砂が広範囲に巻き上がり始めていることがわかる。

次に、地震発生後46分後においては、津波がさらに南方に進行し、三松海岸に到達していることがわかる。押し波第一波の海岸付近の浅海域への到達に伴い、広範囲で大規模かつ高濃度の砂の巻き上がりが生じている。

さらに2分後の地震発生後48分後においては、三松海岸で反射した津波第一波の引き波が発電所東方海域に生じていることがわかる。このとき、発電所取水口の北東側海域で引き波による顕著な砂の巻き上がりが生じるとともに、押し波第一波で巻き上がった三松海岸付近の高濃度の砂が広い範囲で飽和濃度に達し、比較的流速の速い引き波によって北方へ拡散した巻き上がり領域と合体して、非常に広範囲で浮遊砂濃度が飽和に達する状況が生じていることが分かる。この浮遊砂濃度が飽和に達している領域は、図5の広域図に示すシールズ数が、高橋モデルの適用範囲を大きく超

える5以上となる領域(赤色)と概ね一致している。

4. 可変型手法による飽和浮遊砂濃度設定

近年の研究成果である菅原ほか(2014)および今井ほか(2015)によると、砂粒子浮遊による乱流エネルギーの散逸を考慮し、飽和浮遊砂濃度は時空間的に流速と水深に応じて変化するとした以下の関係式により設定することで、地形変化を良好に再現できるとしている。

$$C = \frac{C_s}{\rho_s} \times 100, \quad C_s = \frac{\rho_s \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \left(\frac{h^{4/3} w}{e_s n^2 u^3} - 1 \right)^{-1}$$

$$\frac{w}{\sqrt{sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}}$$

ここで、C：飽和浮遊砂濃度(％；体積濃度)， C_s ：飽和浮遊砂濃度(kg/m^3 ；質量濃度)， ρ_s ：砂の密度(kg/m^3)， ρ_w ：水の密度(kg/m^3)，h：水深(m)，u：土砂を含む断面平均流速(m/s)，s：砂の水中比重， ν ：水の動粘性係数(m^2/s)，n：マニング粗度，d：砂の粒径(m)， e_s ：巻き上げ効率，g：重力加速度(m/s^2)，w：沈降速度(m/s)である。2.2節以降の議論と同様に、浮遊砂濃度は体積濃度で表示する。

また、今井ほか(2015)で示されている浮遊砂

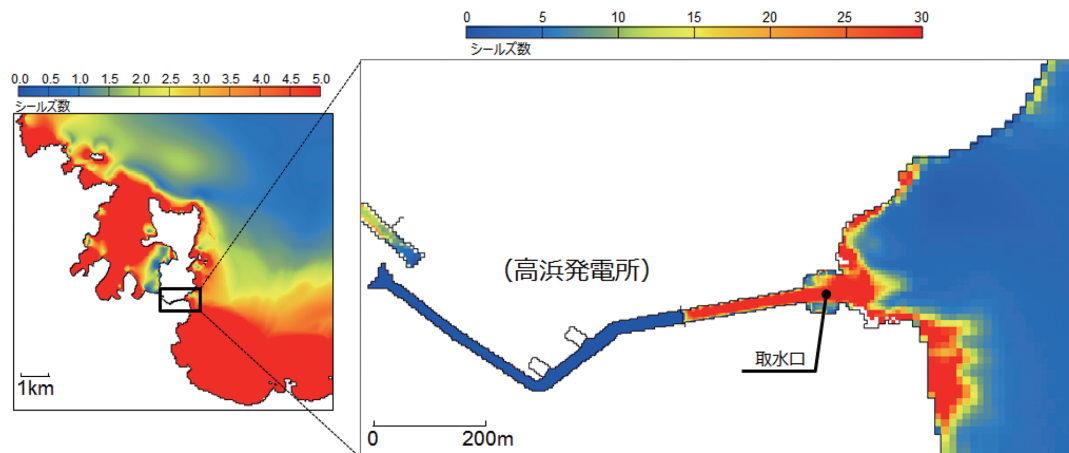


図5 発電所周辺海域のシールズ数の空間分布(高橋モデルによる)

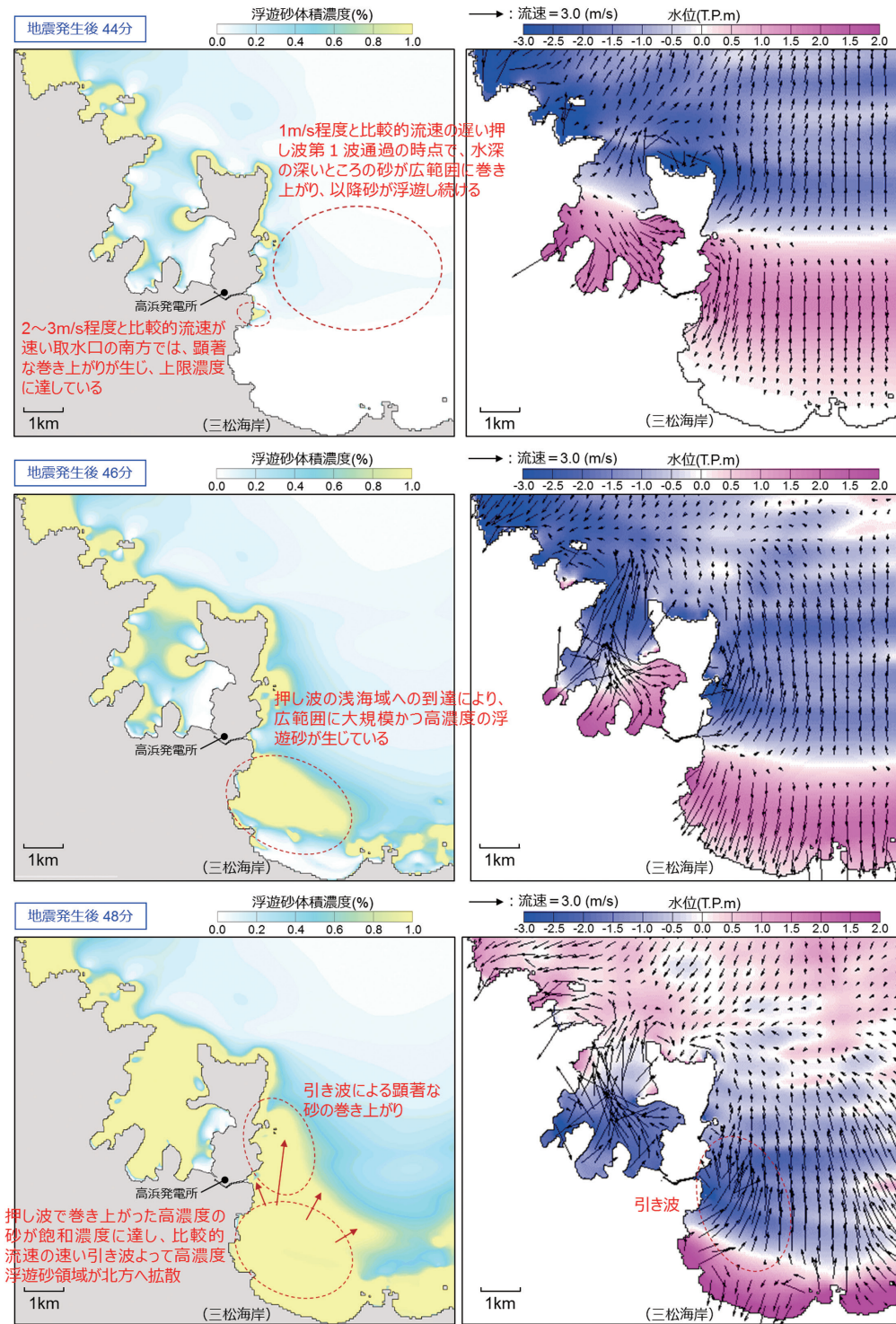
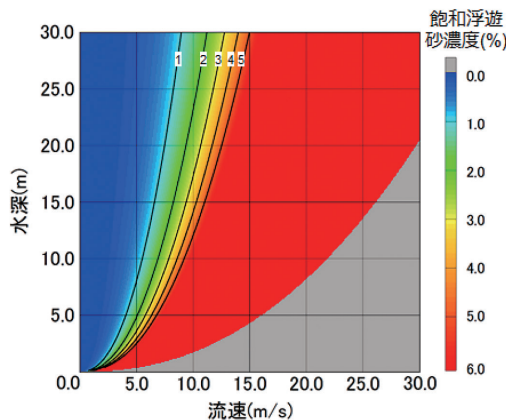


図6 砂移動計算における浮遊砂濃度および流向・流速の平面分布図

濃度の上限に関する変化特性は、砂の粒径 $d=0.25$ mm のものであるため、高浜発電所周辺の海底土質調査により得られた、 $d=0.117$ mm (関西電力, 2014) としたときの変化特性図を作成した(図7)。本図は、特定の水深(縦軸)および流速(横軸)の関係において算出される飽和浮遊砂濃度を色分けして示したものであり、たとえば水深10 m、流速5 m/sにおいては、飽和浮遊砂濃度は1%をやや下回る程度であるのに対し、流速が15 mを超えると水深30 m地点であっても飽和浮遊砂濃度は5%以上となることが読み取れる。上式の巻き上げ効率 e_s は、van Rijn (2007) による典型的な値0.025を用いた。なお、 e_s の値は、水理実験の条件下では0.013~0.017程度と推定され、底面の粗度や輸送土砂による影響を受ける可能性が指摘されている (Bagnold, 1966)。

次に、高浜発電所の基準津波による最大流速分布図をもとに、発電所周辺海域における水深約5 m~20 mのA~E計5地点(図8)について、今井ほか(2015)による流速と水深に応じた飽和浮遊砂濃度の変化特性図を用いて、飽和浮遊砂濃度の時間的な推移を確認した。



パラメータ	今井ほか(2015)	本研究
砂の密度 ρ_s (kg/m ³)	2,650	2,686
水の密度 ρ_w (kg/m ³)	1,000	1,030
マンング粗度 n	0.03	0.03
砂の粒径 d (mm)	0.25	0.117
巻き上げ効率 e_s	0.025	0.025
重力加速度 g (m/s ²)	9.81	9.81
沈降速度 w (m/s)	0.03135	0.01085

図7 高浜発電所周辺海域における飽和浮遊砂濃度変化特性図

図9は、図5で示した飽和浮遊砂濃度変化特性図に、A~E各地点における、飽和浮遊砂濃度の計算ステップごとの瞬間値をプロットしたものの(図の左側に示された5色の線の塊)である。これによると、比較的水深が浅く最大流速の速いA地点およびE地点では、瞬間的に飽和浮遊砂濃度が1%を超える時間帯がある(A地点:計84秒間、E地点:42秒間)ものの、大部分の時間帯やその他の評価点では飽和浮遊砂濃度が1%を大きく下回る範囲に収まることが分かった。したがって、高浜発電所周辺海域では、高橋ほか(1999)の手法に用いる飽和浮遊砂濃度を一律1%とした設定では、浮遊砂巻き上げ量が全体的に大きめに評価されると考えられる。

さらに、このときの各地点における水深と流速

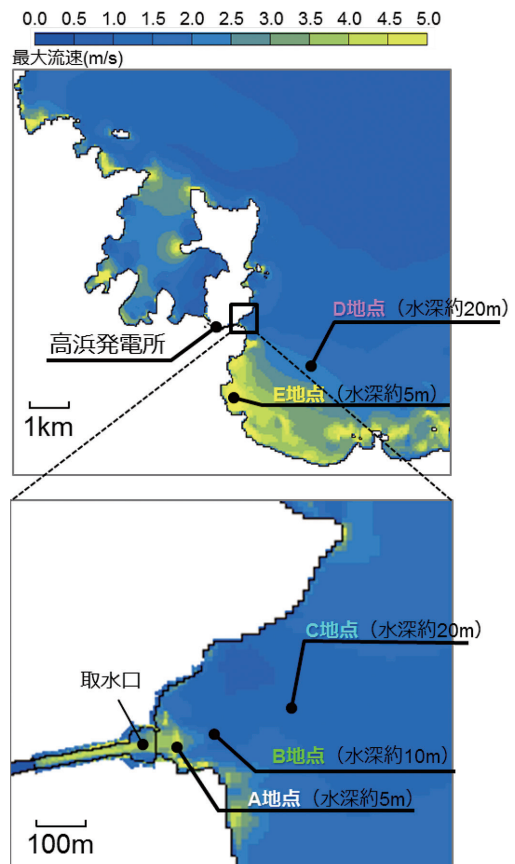


図8 高浜発電所周辺海域の津波最大流速分布

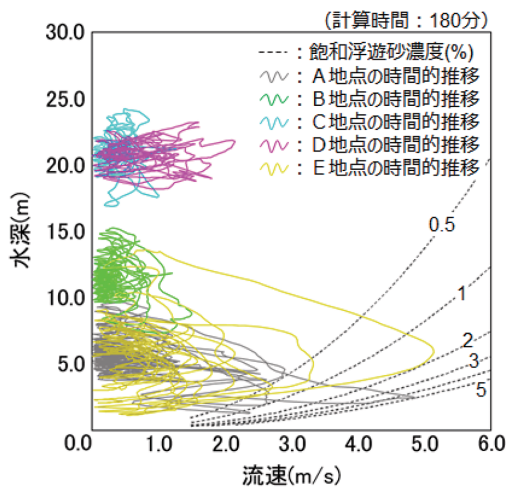


図9 飽和浮遊砂濃度の時間的推移

の時刻歴を図10に示す。これによると、水深の比較的浅いA地点およびE地点においては、最大流速が5 m/s程度と比較的速いが、これは最大振幅波前後の瞬間的な時間帯に限られ、大部分の時間帯は概ね3 m/s以下であることが分かった。

なお、前出の飽和浮遊砂濃度の推移において、取水口近傍のA地点で瞬間的に1%を超える結果となっているのは、地震発生後約53分後に到達した津波第2波(最大津波)が押しから引きに転じ、直後に最大の引き波となって急激に全水深が小さくなっていく際(55~58分後)に生じた高流速による局所的な現象であると考えられる。また、流況が時間的に急激に変化する条件下においては、算出される飽和浮遊砂濃度が急低下する状況が生じ得るが、既に水中に存在する浮遊中の砂の体積濃度がそれに追隨して急低下するとは限ら

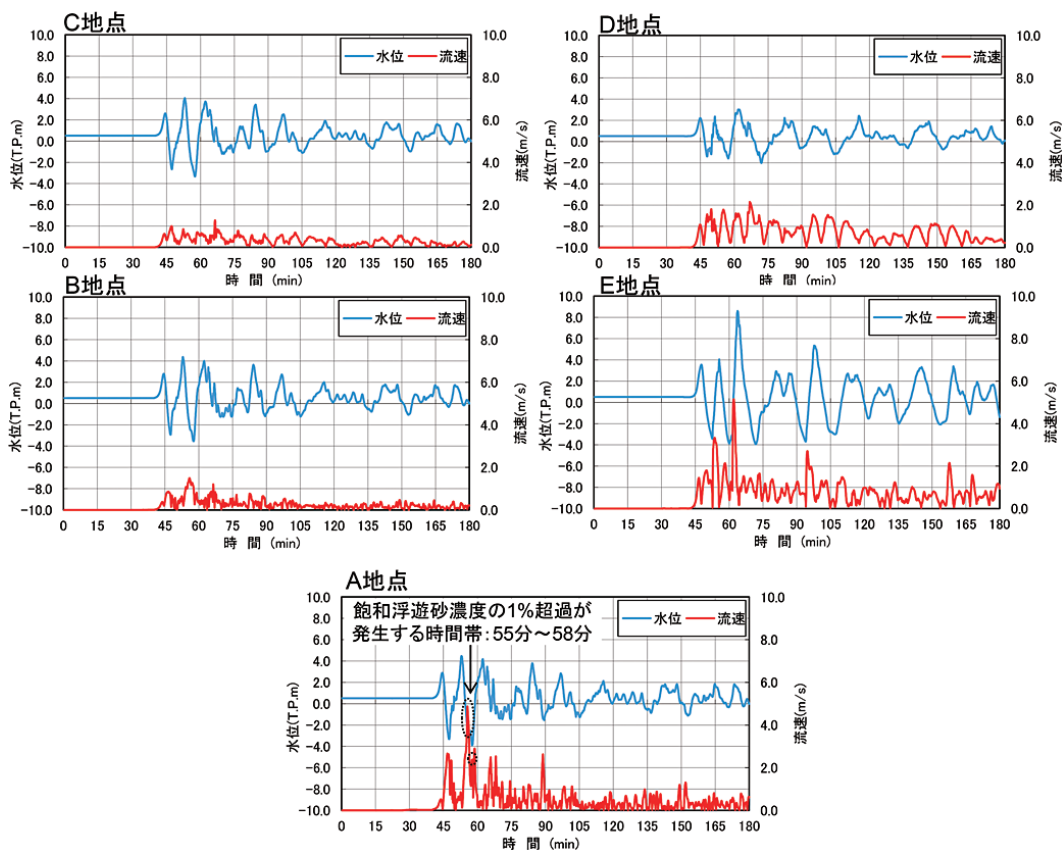


図10 A～E地点の水深・流速の時刻歴変化

ない（浮遊中の砂は沈降速度に従って堆積する）。したがって、上式による飽和浮遊砂濃度は、砂の新たな巻き上がりを制限する条件として適用されるべきものと考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 高浜発電所の基準津波を用いて、既往の研究事例よりも広域に取った高浜湾周辺の計算領域を対象に、空間格子間隔を6.25 m～3.125 mとした2つの異なる砂移動計算モデルにより、地形変化傾向の違いを比較した。
- 高橋モデルを適用した場合、飽和浮遊砂濃度を1%とした設定であっても、海岸近傍から比較的水深の深い沖合の海域まで、非常に広範囲かつ大規模な地形変化（侵食）が生じた。
- 一方、藤井モデルを適用した場合、飽和浮遊砂濃度を5%としても地形変化は海岸近傍に限られ、比較的水深の深い沖合では砂が全く侵食されずごくわずかな堆積が生じるなど、地形変化の傾向が高橋モデルと大きく異なった。
- 菅原ほか(2014)等による、飽和浮遊砂濃度を流速と水深の関数として設定する手法を用いて高浜発電所の基準津波による流速・水深の関係を整理したところ、大部分の時間帯で1%を大きく下回る範囲に収まっている。すなわち、高橋モデルに飽和浮遊砂濃度を1%の固定値とした設定では、浮遊砂の巻き上がり量が全体的に大きめに評価されると考えられる。
- 計算領域を広域に取る場合、同じ計算領域内でも場所によって流況が著しく異なることで、飽和浮遊砂濃度の適正值が時空間的に大きく変化すると考えられることから、汎用的に適用可能な固定値を定めることは困難である可能性がある。よって、菅原ほか(2014)等で提案されている流速と水深の関数として時空間的に変化させる設定手法については、今後の課題としてその適用性を確認する価値があると考えられる。

参考文献

- Bagnold, R.A.: An approach to the sediment transport problem from general physics. Geological Survey Professional Paper 422-I, U.S. Geological Survey, Reston, Va., 1966.
- 土木学会：原子力発電所の津波評価技術2016（本編），平成28年9月，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，127p., 2016.
- 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷英夫：津波による海底地形変化に関する研究，海岸工学論文集，vol.45, pp.376-380, 1998.
- 藤田尚毅・稲垣和男・藤井直樹・高尾 誠・金戸俊道：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，vol.26, pp.213-218, 2010.
- 後藤智明・小川由信：Leap-Frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科，52p., 1982.
- 今井健太郎・菅原大助・高橋智幸・岩間俊二・田中仁：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, 2015.
- 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21, 1956.
- 関西電力株式会社：高浜発電所／大飯発電所 津波による砂移動評価 平成26年2月5日，資料2-5，第78回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，p.9, 2014.
- 原子力規制委員会：基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド，平成25年6月，38p., 2013.
- 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，vol.43, pp.691-695.
- 近藤武司・森本 徹・藤本典子・殿最浩司・志方建仁：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, 2012.
- 菅原大助・成瀬 元・後藤和久：堆積粒子の巻き上げに伴うエネルギー散逸を考慮した津波土砂移動の計算と検証，日本堆積学会講演要旨，O27, 2014.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫：土砂移動に伴う津波計算法の開発，海岸工学論文集，vol.39, pp.231-235, 1992.
- 高橋智幸：津波による土砂移動に関する研究，東北大学博士論文，1998.

高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔：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，vol.46，pp.606-610，1999.

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，第2号，pp.149-155，2012.

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.301-305，2009.

東北電力株式会社：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），資料1-1，第439回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合，pp.16-18，2017.

Van Rijn: Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport. Journal of Hydraulic Engineering, vol.133, no.6, pp.668-689, 2007.

（投稿受理：平成29年10月30日

訂正稿受理：平成30年3月5日）

要 旨

掃流砂層と浮遊砂層の交換砂量を考慮した津波移動床モデルのうち，高橋ほか（1999）の手法においては，飽和浮遊砂濃度が計算結果に与える影響が大きく，その設定方法の高度化が課題となっている。本研究では，関西電力高浜発電所の基準津波を用いて，既往の研究事例よりも広域の計算領域を対象に，藤井ほか（1998）および高橋ほか（1999）の手法により，飽和浮遊砂濃度を時空間的に一定の定数として与えた場合の地形変化を比較し，両モデルで地形変化の傾向が大きく異なることを示した。さらに，高橋（1999）の手法について，菅原ほか（2014）の提案式に基づく飽和浮遊砂濃度の時間的な推移に関する考察を行い，当該海域については，飽和浮遊砂濃度を1%の固定値とした設定では，浮遊砂の巻き上がり量が全体的に大きめに評価されると考えられること，および汎用的に適用可能な固定値を定めることは困難であることを示した。