

シルテーションを考慮した混合砂海浜変形 モデルと現地浚渫計画への適用について

IMPROVEMENT OF BEACH DEFORMATION NUMERICAL MODEL FOR
MIXED-SIZED SAND FIELD SITE INCLUDING SILTY SAND AND ITS
APPLICATION TO DREDGING PLAN

斉藤知秀¹・羽鳥明満¹・大宮宏之¹・大内一男²・池野正明³・吉井匠⁴
Tomohide SAITO, Akemichi HATORI, Hiroyuki OOMIYA, Kazuo OOUCHI,
Masaaki IKENO, Takumi YOSHII

¹正会員 工修 東北電力(株) 土木建築部 (〒980-8550 仙台市青葉区本町一丁目7番1号)

²正会員 東北電力(株) 土木建築部 (同上)

³正会員 工博 (財) 電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

⁴正会員 工修 (財) 電力中央研究所 環境科学研究所 (同上)

3-D beach deformation numerical models for ordinary fine and coarse sands beach have been developed. However, their numerical model cannot be applied to several field sites including silty sand. So, it is necessary to develop 3-D beach deformation numerical model capable of properly considering siltation mechanism in order to correctly predict sedimentation and beach deformation around a harbor at the above sites.

In order to apply a beach deformation numerical model to the mixed-sized sand field site including silty sand and perform the reasonable dredging plan, the following topics were investigated in this study.

Firstly, the field observation was executed and the unknown parameters in the above siltation model were identified. Secondly, the beach deformation numerical model was improved to consider siltation mechanism. And the improved numerical model was verified at the field site of mixed-sized sand beach including silty sand around a harbor (the Haramachi-thermal power plant site). Finally, when the dredging depth had been shallowed, the accretion amount inside the harbor during a year is predicted by using the above numerical model in order to make the reasonable dredging plan.

Key Words : Siltation, mixed-sized sand, 3-D beach deformation numerical model, dredging plan

1. はじめに

東北電力(株)原町火力発電所専用港湾は太平洋に面し、シルトなどの粒径の細かい土砂が多く存在する海域に立地しており、常時大量の冷却水を取水することから、港湾内へシルト成分を多く含む土砂が流入し、航路確保のため浚渫工事を実施している。合理的な浚渫計画を策定するためには、数値予測モデルにより港湾近傍の海浜変形予測を行うことが一般的であるが、当該海域は、砂だけでなくシルト成分を多く含む土砂が存在することから、従来の砂移動を主体とした3次元海浜変形モデル¹⁾は適用できない。

これまで、シルテーションを考慮した海浜変形モデル^{2) 3)}が提案されているが、シルトの移動特性は底質の巻上機構や移流沈降過程が現地底泥の

特性によって異なるため、当該地点の底泥特性に対応した巻上・沈降モデルのパラメータ同定が必要である。また、従来の研究では、港内での堆砂検討に絞られ、港内では波高が小さいため底質は巻き上がらず、シルト沈降項の評価を主眼としたモデル再現性の検証は行われているものの、港湾周辺を含めたシルトの挙動を考慮できる海浜変形予測モデルは十分検討されていない。

そこで本研究では、合理的な浚渫計画を立案するために必要となる、港湾周辺を含めた砂とシルトの挙動を同時に考慮できる混合砂海浜変形モデルの構築を目指し、当該海域で波高、濁度等の現地観測を実施し、現地底泥の巻上・沈降モデルのパラメータ同定を行った。

次いで、シルテーションを考慮して混合砂海浜変形モデルへ改良し、現地海域でのモデル再現性

を検証するとともに、浚渫計画を意識し、浚渫深さを変化させた年間堆砂予測を実施した。

2. シルテーションを考慮した混合砂海浜変形モデルの概要

(1) モデルの全体構造

シルテーションを考慮した混合砂海浜変形モデルの構築にあたり、基本となる海浜変形モデルは、修正ブシネスク方程式を基礎方程式として波浪・海浜流場を計算し、漂砂量計算については、掃流砂量式と浮遊砂量式を別々に用いる池野ほか¹⁾のモデルを用いた。

本研究では、これにシルテーションモデル²⁾を組み込み、シルトの浮遊濃度の平面2次元移流拡散方程式を解くことにより、掃流砂量、浮遊砂量、シルトの巻上・沈降を考慮した流砂の連続式を計算して海底地形変化量を求めた。モデルの全体フローを図-1に示す。

(2) 波浪場の計算モデル

本研究では、波浪外力の多方向不規則性・有限振幅性が考慮できる修正ブシネスク方程式⁴⁾に波別砕波による運動量拡散項⁵⁾を付加した式を用いて波浪場を計算した。入射波の周波数スペクトルはBretschneider-光易型スペクトルをその方向分布は光易型分布関数を仮定した。水平流速の鉛直分布については、水深断面平均流速を任意の鉛直座標における水平流速に変換し、さらに渦粘性モデルに基づき、砕波による戻り流れの鉛直分布を付加した¹⁾。

(3) 浮遊漂砂量・掃流漂砂量の計算モデル

浮遊漂砂量の算出にあたり、まず浮遊砂濃度の鉛直分布は、底質の巻き上げ時の鉛直移流効果を考慮した一次元拡散方程式から導かれる式(1a)を用いた。さらに式(1b)のとおり、濃度と水平流速を水深方向にフラックス積分することにより浮遊漂砂量を算出した。

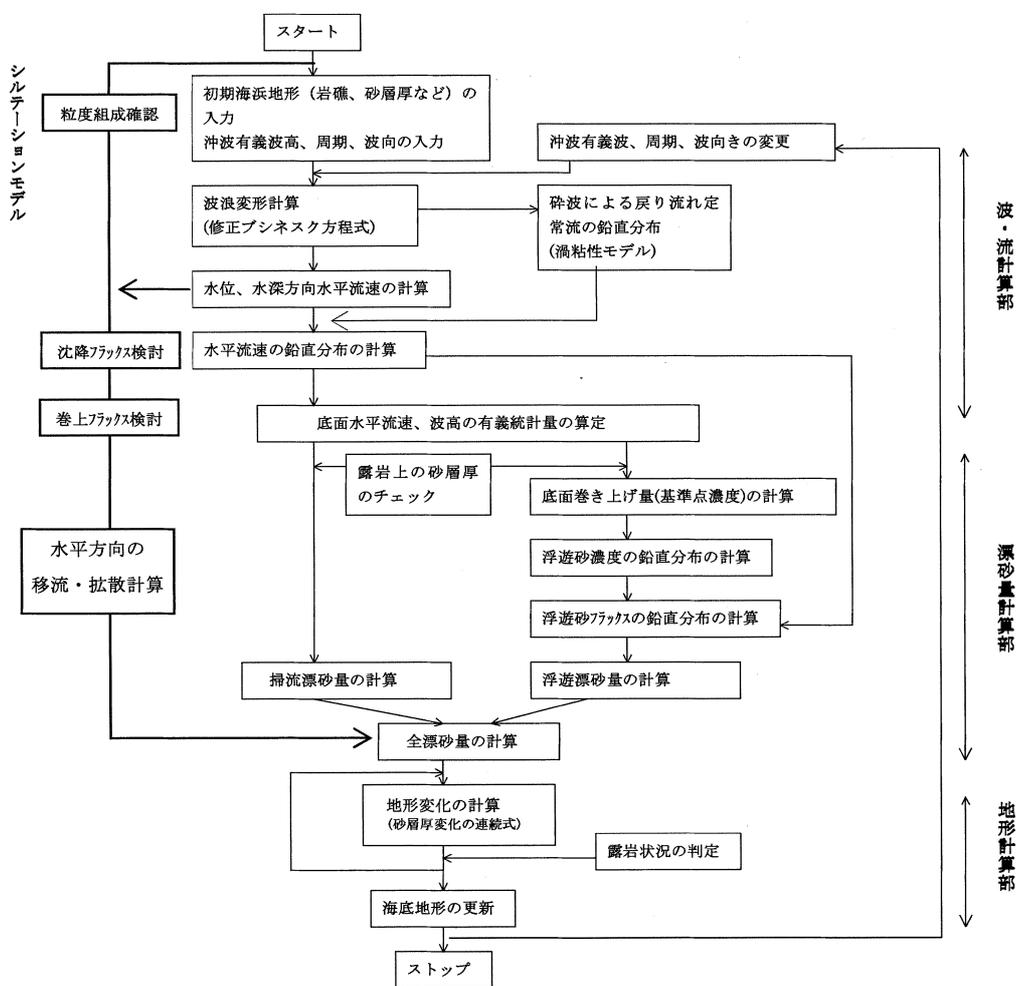


図-1 シルテーションを考慮した混合砂海浜変形モデルの全体フロー

$$C(z) = c_0 \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{\varepsilon_s}{w_s L_s}} \right) \exp\left\{-\frac{(z+h)}{L_{st}}\right\} + \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon_s}{w_s L_s}} \right) \exp\left\{-\frac{w_s(z+h)}{\varepsilon_s}\right\} \right] \quad (1a)$$

$$q_{sx} = \frac{1}{\rho_s} \int_h^0 C(z) u(z) dz \quad (1b)$$

$$q_{sy} = \frac{1}{\rho_s} \int_h^0 C(z) v(z) dz$$

ここで、 $C(z)$ は浮遊砂濃度（時間平均値）、 w_s は砂の沈降速度である。 ε_s 、 L_s はそれぞれ、砂の拡散係数と鉛直移流スケール長であり、Nielsenの提案式⁶⁾を用いている。また、 c_0 は基準点濃度であり、大型海浜変形実験結果に基づく池野ほか⁷⁾の式を用いた。また q_{sx} 、 q_{sy} は浮遊漂砂量、 $u(z)$ 、 $v(z)$ は戻り流れを付加した定常流の鉛直分布、 ρ_s は砂密度である。

掃流漂砂量の計算は、池野ほかの式¹⁾を用いた。

(4) シルテーションモデル

浮遊シルトは、巻上げ・沈降・堆積過程を繰り返しながら移流・拡散していくものと考えられることから基本方程式は式(2a)を用いた。沈降フラックス D は沈降速度 w_s と底面における濃度 C_b の積で与えられる算定式(2b)を用いた。

また、本モデルでは、砂成分とシルト成分が混合した場と捉えるため、砂とシルトの割合に応じて、巻上げ量をそれぞれ算定できるように、巻上げフラックス E の算定は、現地泥(福島泥)を用いた巻上げ実験をまとめている清水ほか(1991)³⁾の式に底面のシルト混合率 P を乗じた式(2c)を用いた。初期条件におけるシルト成分の割合については、後述する現地観測結果から設定し、計算過程においては、砂とシルトの堆積量変化に応じ、シルト混合率 P を変化させることとした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{E-D}{(h+\eta)} \quad (2a)$$

$$D = w_s C_b (1 - \tau / \tau_d) \quad (2b)$$

$$E = P \alpha (\tau / \tau_{fc} - 1)^{n1} \quad (2c)$$

ここで C はシルトの鉛直平均濃度、 u 、 v は流速、 E は巻上げフラックス、 D は沈降フラックス、 K は拡散係数、 h は水深、 η は水位、 w_s は沈降速度

(m/s)、 C_b は底面シルト濃度(kg/m³)、 τ は底面せん断応力、 τ_d は沈降限界せん断応力、 P は底面のシルト混合率、 α は定数、 $n1$ は指数、 τ_{fc} は巻上げ限界せん断応力である。

(5) 地形変化計算

地形変化量は、掃流砂量、浮遊砂量、浮遊シルトが海底に沈降・堆積する正味の量の合算値とした。基本方程式を式(3a)、式(3b)に示す。なお、当該海域は露岩域であることから、砂層厚が少なく巻き上がりにくい場合は、露岩上を通過する浮遊漂砂量が遮断される効果を取り入れた¹⁾。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left\{ q_x - \varepsilon_b \left| q_x \right| \frac{\partial(z_b)}{\partial x} \right\} + \frac{1}{1-\lambda} \left[-\frac{\partial}{\partial y} \left\{ q_y - \varepsilon_b \left| q_y \right| \frac{\partial(z_b)}{\partial y} \right\} \right] + \frac{D-E}{\rho_s(1-\lambda)} \right] \quad (3a)$$

$$q_x = q_{sx} + q_{bx} \quad , \quad q_y = q_{sy} + q_{by} \quad (3b)$$

ここで Z_b は海底面の鉛直高さ、 λ は空隙率、 ε_b は局所的な海底勾配の影響を表す係数、 q_{sx} 、 q_{sy} は浮遊漂砂量、 q_{bx} 、 q_{by} は掃流漂砂量である。

3. 現地観測の概要

本研究では、原町火力発電所専用港湾および周辺海域を対象に、現地海域でのシルトの巻上り特性等を把握するため、現地観測を実施した。

シルテーションモデルでは、計算領域境界において、入射波のエネルギーとシルト濃度データとの相関式を与える必要がある²⁾。このため、はじめに波高データが観測されている図-2のP1地点において、約60日間の濁度連続観測(平成19年1月19日～平成19年3月22日)を行った。次に、図-2に示すst.1からst.5において濁度鉛直分布測定および採水を同時に実施し、濁度とシルト濃

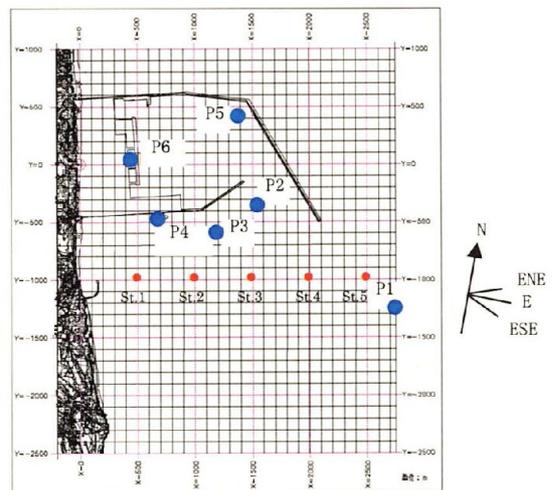


図-2 観測位置図

度の相関を求め、濁度連続データをシルト濃度連続データに変換し、図-3、式(4)のとおり入射波のエネルギーとシルト濃度の相関式を導いた。

$$C = 10.31H_{1/3}^2 + 7.21 \quad (4)$$

ここで、 C は推定シルト濃度であり、 $H_{1/3}$ は有義波高である。

計算の際、式(4)の相関式を、時化モデル中で変化する波高に連動させ、沖からの濃度流入境界条件として、移流拡散方程式(2a)に与えた。

濁度鉛直分布の測定は、1点あたり鉛直方向0.5m間隔で濁度計(Compact-CTD)を用いた。採水については、バンドーン採水器を用いて1点あたり2層の採水を実施し、浮遊物質量(SS)を測定した。また、濁度連続測定は、海底面上0.8mに濁度計(Compact-CLW)設置した。

さらに、現地観測結果を用いてシルテーションモデルのパラメタを設定することを視野に、P1地点からP6地点において、約30日間(平成14年4月10日～平成14年5月15日)の濁度連続観測を行った。

また、港湾近傍におけるシルトの分布状況を把

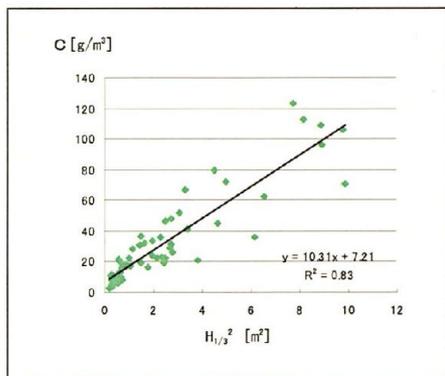


図-3 入射波エネルギーとシルト濃度の関係

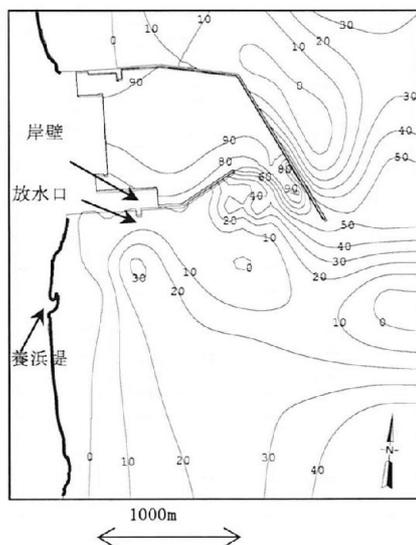


図-4 シルト成分の割合(%)

握し、式(2c)における底面のシルト混合率 P を設定する必要があることから、港湾近傍の30箇所で採泥・粒度分析を実施し、港湾周辺の砂とシルトの成分構成比(初期条件)を設定した(図-4)。

4. パラメタの同定

本研究では、シルト濃度の再現性に着目し、パラメタスタディにより、シルテーションモデルのパラメタ同定を試みた。

はじめに、巻上げフラックスおよび沈降フラックスに関して、感度分析を実施した。対象期間は、平成14年4月10日から平成14年4月17日の176時間を対象とし、波浪データは、その期間に発生した波高を1.0m、1.5m、2.0mの3段階に分割し、継続時間・作用順序を考慮しモデル化した(波向は全期間E、周期は全期間で8.0s)。なお、計算効率の観点から、波浪場の作成においては、時々刻々変化する地形変化の影響は考慮しない。また、沖側境界のシルト濃度はP1地点の実測濃度を1時間毎に変化させ入力した。海底地形変化計算時の時間刻み間隔は2.5秒刻みとした。シルトおよび砂の粒径は調査データから、それぞれ0.015mm、0.263mmとし、また沈降速度はストークス則に基づき $1.8 \times 10^{-4} \text{m/s}$ および $5.7 \times 10^{-2} \text{m/s}$ とした。

パラメタ同定に際し、巻上げ限界せん断応力 τ_{fc} および指数 $n1$ は清水ほか³⁾から、 $\tau_{fc} = 0.20 \text{ (N/m}^2\text{)}$ 、 $n1 = 1.04$ とした。取水港湾においては、粗粒分から徐々に沈降し、細粒分が取水口へと移流していくため、港湾内の堆砂はシルト成分が大半を占める。このことから、パラメタの検討にあたっては、特にP5地点における浮遊シルト流入の再現性に着目した。その結果、 $\tau_d = 0.10 \text{ (N/m}^2\text{)}$ 、 $\alpha = 1.868 \times 10^{-5}$ において、再現性が概ね良好であることから、

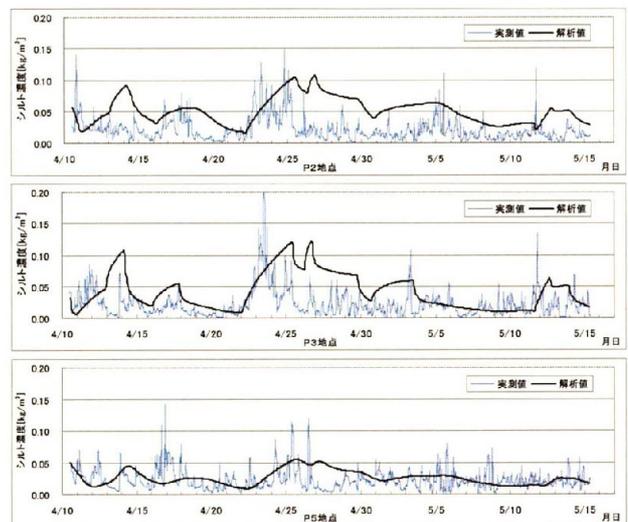


図-5 シルト濃度比較図

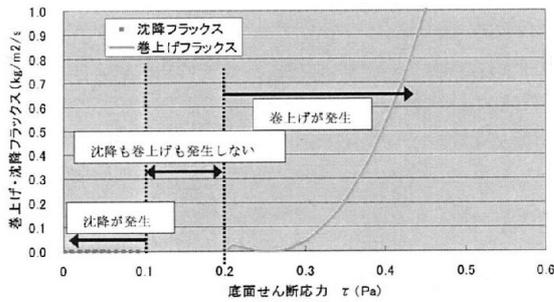


図-6 巻上げ限界と沈降限界関係図

これらを用いて約1ヶ月間(平成14年4月10日～平成14年5月15日)の再現性を確認することとした。計算条件は、感度分析の場合と同様に、その期間に発生した波高を1.0m, 1.5m, 2.0mに分割し、継続時間・作用順序を考慮しモデル化し計算を行い、図-5に示すとおり、概ね再現性を確認することができた(波向はEおよびESE, 周期は全期間で8.0s)。

また、シルトの巻上げ限界せん断応力と沈降限界せん断応力との関係を整理すれば、図-6のとおりとなり、巻上げ・沈降の発生条件が、周辺海域の底面せん断力の変化に対応できるよう合理的に設定されていることがわかる。

5. 堆砂状況の再現性の検証

堆砂状況の再現性を検証するため、平成18年5月を初期地形とした1年間の再現計算を実施した。入力波浪モデルは、波高1.0m以上を対象とし、波向は出現頻度からENE, E, ESEを対象とした。また波高3.0m以上の場合を時化とし、1時化を1.5m, 2.5m, 4.0mのステップ状にモデル化した。時化モデルの作用順序については、対象年における波高3m以上におけるピーク時の波向を抽出し、観測された時化の順番、波向および継続時間を考慮して設定した。また、波浪場の作成において、計算効率の観点から地形変化の影響は考慮していない。沖側境界のシルト濃度は式(4)に基づき、波高との関係から設定した。海底地形変化計算時の時間刻み間隔は2.5秒刻みとした。

再現計算結果と実測の侵食堆積図を図-7, 図-8に示す。図-7と図-8を比較すれば、港口および航路付近では概ね侵食堆積状況は再現され、泊地・航路エリアの堆砂量について、実測値と再現計算値を比較すれば、実測値に対する再現計算値の割合は82%程度となった(表-1)。

しかし汀線および放水口付近の堆砂状況が過大に評価された。これらの要因として、汀線については、養浜堤の影響、汀線付近における計算精度の影響などが考えられる。放水口付近では放水流

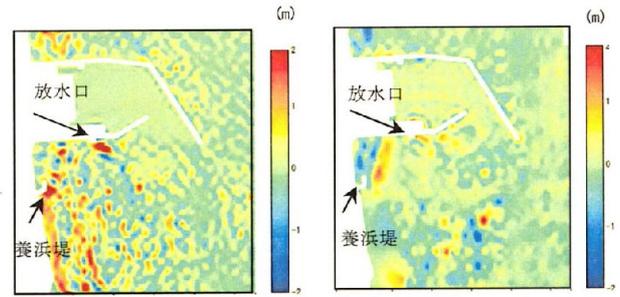


図-7 侵食堆積図(計算)

図-8 侵食堆積図(実測)

表-1 解析ケースと堆砂量

	堆砂量(シルト+砂)(千m³)			
	泊地	航路①	航路②	合計
計算値	37.4 (10)	13.1 (15)	1.7 (2)	52.2
実測値	52.1 (14)	11.8 (14)	-0.5 (-1)	63.4

※泊地, 航路①, 航路②のエリアは図-10を参照。

※括弧内は平均堆積深(cm)。

の影響が無視できず、本海浜変形モデル中に流れによる漂砂量の影響が十分反映されていないためであると推察される。

6. 年間堆砂予測

合理的な浚渫計画策定のため、浚渫深さを変化させた1年間の堆砂予測計算を実施した。

予測計算では平成9年度から平成19年度の10年間に観測された波高、波向の頻度分布から1年間のデータに平均化して、入力波浪モデル(時化モデ

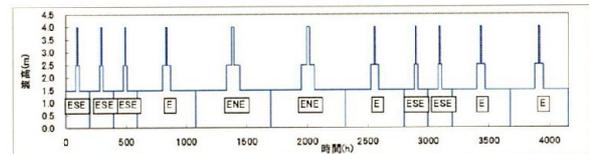


図-9 時化モデル図

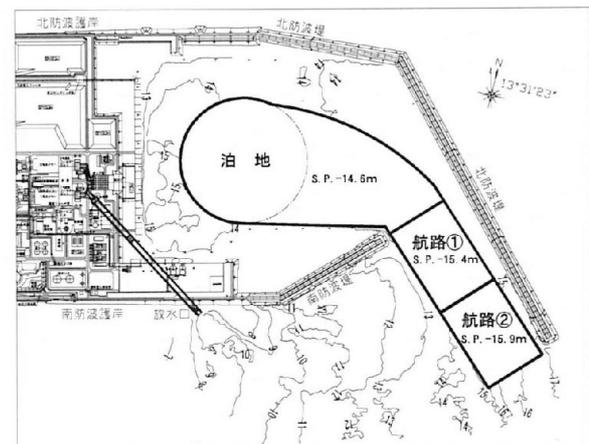


図-10 予測計算(標準ケース)

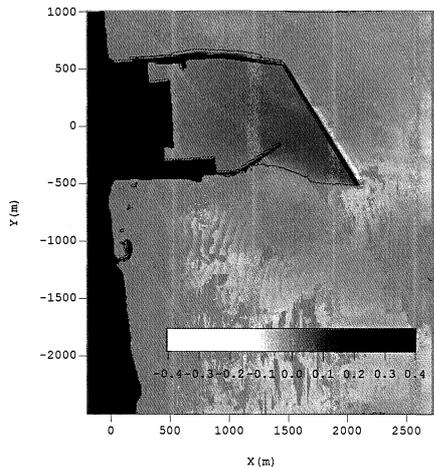


図-11 シルトの侵食堆積図

表-2 解析ケースと堆砂量

	堆砂量 (シルト+砂) (千 m^3)			
	泊地	航路①	航路②	合計
ケースA (浅掘)	37	15	8	60
ケースB (標準)	37	16	10	63
ケースC (深掘)	37	16	13	66

※浚渫深さ

ケースA；航路 (基本水深 -0.3m)

泊地 (基本水深 -0.2m)

ケースB；航路 (基本水深 -0.6m)

泊地 (基本水深 -0.4m)

ケースC；航路 (基本水深 -0.9m)

泊地 (基本水深 -0.6m)

ル)を作成した(図-9)。波浪場の作成においては、計算効率の観点から地形変化の影響は考慮していない。時化モデルの作用順序については、波浪の出現率が年平均と類似した平成18年度の時化順と仮定した。沖側境界と地形変化計算時の時間刻み間隔は「5。」と同じに設定した。

港湾近傍の初期地形は実測地形とし、港湾内は浚渫完了時点を想定した。

予測は、浚渫深さを変化させた3ケースについて浚渫後1年間の堆砂量計算を実施し、航路・泊地の年間堆砂量の比較を行った(ケースA；1年に1回の浚渫を想定、ケースB；2年に1回の浚渫を想定、ケースC；3年に1回の浚渫を想定)。一例として、ケースBの航路・泊地の浚渫レベル(初期条件)を図-10に、1年後のシルトの侵食堆積図を図-11に示す。

表-2により各ケースの堆砂量を比較すれば、泊地および航路①では有意な差異は認められなかったが、航路②については、深掘するほど堆砂量が多くなる傾向が認められた。航路浚渫を実施した場合、自然地形との段差ができ、この段差は深掘するほど顕著になる。波浪が作用すると、海底地

形は平衡地形勾配に近づき浚渫法面が均される。深掘するほど、この均し効果が顕著となり、堆砂量は増大する傾向となる。特に航路②は、航路①・泊地に比べて波浪の影響を受けやすいことから、この傾向が顕著になったものと推察される。

深掘するほど堆砂量が多くなる傾向が認められたことから、浚渫間隔を確保するために深掘する場合、堆砂速度が速まることにより、想定した浚渫間隔を確保できなくなる可能性があることが示唆される。

7. おわりに

本研究により得られた成果は以下のとおりである。

- ・シルテーションを考慮した混合砂海浜変形モデルの構築を試み、シルトが多く存在する海域における広範囲の海浜変形予測を可能とし、港口、航路付近の堆砂状況については概ね再現できた。
- ・浚渫深さを変化させた堆砂予測を行った結果、深掘するほど堆砂量は増加する傾向が認められた。深掘の場合は浚渫間隔を長くすることが可能であり、浚渫船の回航費等に関してはコストメリットが期待できるものの、航路の一部については浚渫量が増大し、必ずしもコスト的に優位とはならない可能性がある。今後の浚渫計画については、深浅測量、浚渫工事等の工程面や、コストメリットの規模について更に検討を深め、本研究成果を今後の計画に活かしたい。

参考文献

- 1) 池野正明, 清水隆夫, 小林英次, 石井敏雅, 斉藤知秀: 露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の3次元海浜変形数値予測モデルの適用, 海岸工学論文集, pp. 561-565, 2001.
- 2) 福本幸成, 内山一郎, 京谷修: 取水港湾における現地泥の沈降特性とシルテーションの混合粒径モデル, 海岸工学論文集, pp. 511-515, 2001.
- 3) 清水琢三, 金山進, 沼野祐二, 山田富朗, 植木一浩: 波・流れ共存場における現地泥の巻き上げ特性, 海岸工学論文集, pp. 481-485, 1991
- 4) Madsen, P.A., R. Murray and O.R. Sorensen: A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 371-388, 1991.
- 5) 佐藤慎司・M. B. Kabiling: 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, pp. 401-405, 1994.
- 6) Nielsen, P.: Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 4, World Scientific, pp. 201-262, 1992.
- 7) 池野正明, 宇野善之, 後藤宏志, 田中正博, 森信人, 片山裕之, 岡安章夫: 混合粒径砂を用いた大型海浜実験による粒径別浮遊砂フラックスとモデル化, 海岸工学論文集, pp. 556-560, 2000.