

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

福本 幸成*・内山 一郎**・京谷 修***

1. はじめに

港口より常時冷却水を取水している発電所港湾においては、波高減衰が著しい港口付近の砂の堆積域に加え、港内中央から港奥にかけての静穏域にシルトの堆積域が生じる場合が多い。したがって、効率的かつ計画的な維持浚渫を実施するためには、その土砂堆積機構を解明し、実用的な予測モデルを構築することが不可欠である。取水港湾におけるシルテーションは、主として高波浪時に港外で巻き上がったシルト・粘土が取水流により港口より流入し、港内静穏域に沈降・堆積するという形態で進行する。そのため、その予測解析に際しては、シルテーションモデル中の沈降項の評価が特に重要となる。金山ら(1991)は、対象現地泥の粒径レンジが広範囲であることを考慮し、混合粒径のモデル化を行っているが、浮遊シルトの沈降限界せん断応力は粒径によらず一定という仮定を設けている。

本研究では、まず現地泥と海水を用いた水理実験を実施し、沈降限界せん断応力を粒径別に評価する方法を検討した。さらに、水理実験より得られた成果を踏まえ、平面 2 次元シルテーションモデルを構築し、東京電力(株)福島第二原子力発電所専用港湾をモデル地点として、港内地形変化の再現を試みた。

2. 限界沈降せん断応力 τ_d の評価

浮遊シルトの限界沈降せん断応力 τ_d を評価することは、シルテーションの予測を精度良く行う上で重要な課題である。しかし、対象とする現地の泥と海水の性質により浮遊シルトの凝集性の効果が異なり、シルテーションの問題を複雑化している。そこで本研究では、まず対象とする現地の泥と海水を用い、浮遊シルトの濃度を数通りに変化させ、水路内に着底するシルトの粒度分級を把握する実験を行った。

2.1 水理実験の概要

水理実験は、図-1 に示すように、長さ 12 m、幅 1 m、

高さ 0.3 m の水槽に 6 m の漸拡区間を設け、上流より数通りの濃度の濁水を流下させ、水路内の各断面の平均流速および粗度板(砂の粒径 100 μm 程度)上でのシルトの堆積量・粒度組成等を計測した。なお、通水流量は 0.015 m^3/s であり、実験に用いた現地泥の中央粒径は 30 μm 程度である。

実験条件を表-1 に示す。濁水の供給時間については、供給する土粒子の総重量が同等となるように留意した。

2.2 実験結果

(1) 堆積泥の粒度組成変化

水理実験にて、実験ケース毎に粗度板上の堆積粒度と断面平均流速が明らかとなり、着底したシルトの粒度組

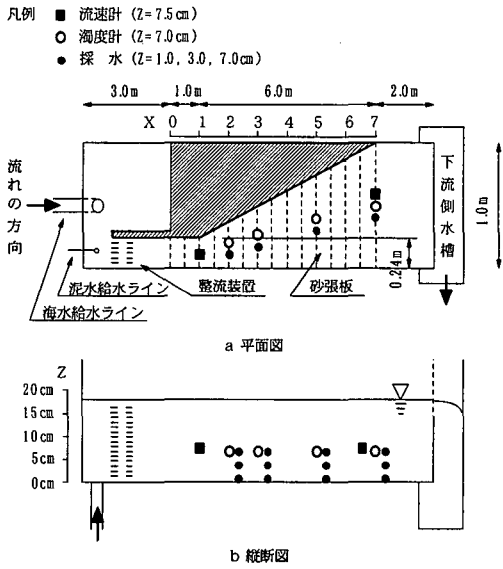


図-1 実験水路の概要

表-1 実験条件

Case 名	通水流量 (m^3/s)	供給濃度 (mg/l)	供給時間 (min)
Case-1	0.015	100	7.0
Case-2		200	3.5
Case-3		500	1.5
Case-4		1000	0.75

* 正会員 工修 東京電力(株)建設部土木・建築技術センター
** 正会員 五洋建設(株)土木設計部
*** 正会員 東電設計(株)第二土木本部港湾・海岸部

成率 (=粗度板に堆積した対象粒径重量/全堆積重量) の変化と底面せん断応力の関係もわかる。したがって、図-2 に示すように、着底シルトの粒度組成率の変化と底面せん断応力の関係から、粒径段階毎に粒度組成率が 0 となる外力条件を推定できれば、粒径別の沈降限界せん断応力 τ_{di} も算定可能と考えられる。

図-3 には、この方法により粒径別の沈降限界せん断応力 τ_{di} を推定した結果の一例を示す。同図中の太線は、底面せん断応力と粒度組成率の変化を直線近似した結果である。

(2) 粒径別の沈降限界せん断応力の定式化

図-4 は、上記の方法に基づき、粒径別の沈降限界せん断応力を無次元化し、整理した結果である。図-2 および

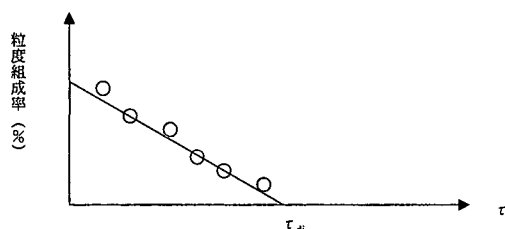
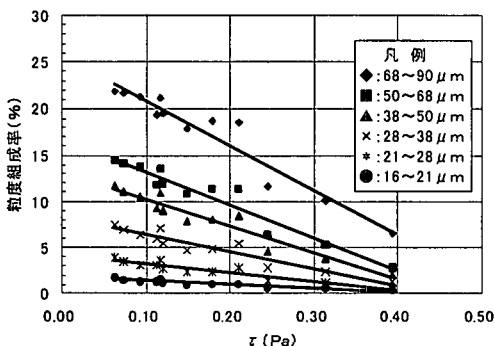
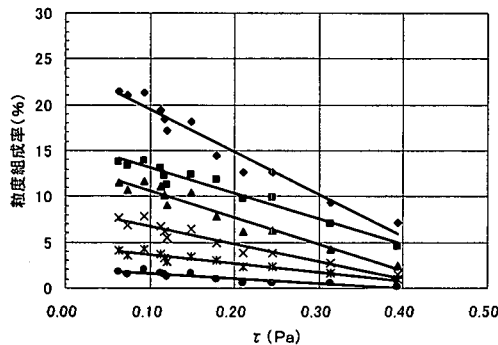


図-2 沈降限界せん断応力 τ_{di} を推定する方法の模式図



(1) 供給濃度 200 mg/l



(2) 供給濃度 500 mg/l

図-3 底面せん断応力と堆積泥の粒度組成率の変化

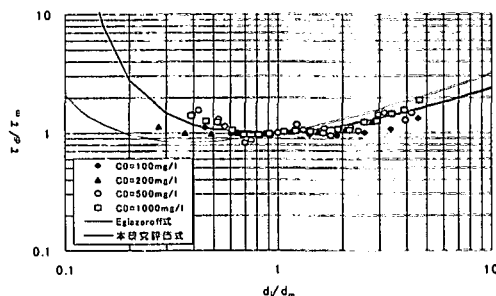


図-4 粒径別の沈降限界せん断応力

図-3 より得られる浮遊シルトの粒径別沈降限界せん断応力 τ_{di} は、シルトが着底・停止する外力条件を意味するが、混合砂の初期移動限界を表す Egiazaroff (1965) の式と同様の特性を示し、式 (1) で表現できることがわかった。

$$\frac{\tau_{di}}{\tau_m} = \frac{d_i}{d_m} \left[\frac{\log_{10} \alpha}{\log_{10} (\alpha \cdot d_i/d_m)} \right]^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 d は粒径、 τ は底面せん断応力、添字 d は沈降限界、添字 m は平均粒径、添字 i は粒径段階を意味する。Egiazaroff (1965) の評価式は $\alpha=19$ であるが、本研究では $\alpha=9$ を得た。

なお、Egiazaroff 式と本研究評価式との α の差異は、底面流速 u_b の作用高さが異なることを示しており、砂とシルトの流動性・均一性の違いによるものと解釈される。

3. 取水港湾におけるシルテーションの混合粒径モデル

3.1 シルテーションモデルの概要

取水港湾において、港口より流入する浮遊シルトは、粗粒子成分から徐々に沈降・堆積し、取水口へと移流していくが、この過程については以下に示す移流拡散モデルの取り扱いが一般的に可能である。

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

$$\rho_s \frac{\partial \eta_b}{\partial t} = D - E \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 t : 時間、 (x, y) : 水平方向の座標、 (u, v) : (x, y) 方向の流速、 C : 鉛直平均濃度、 K : 拡散係数、 E : 巻上フラックス、 D : 沈降フラックス、 h : 水深、 η_b : 海底地盤高、 ρ_s : 底泥単位体積当たりの土粒子重量である。ただし、本研究では式 (2) および (3) において、巻上フラックスはゼロ ($E=0$) とした。底泥の巻き上げについては、清水ら (1991) が、底泥表面のひび割れの成長と底泥波動の關係に着目した波作用下における底泥の

巻き上げ限界の汎用的な表示を提案している。これは、底泥波動の流速場から算定される最大せん断応力 τ_s が表層において底泥のビンガム降伏値 τ_y の 1.25 倍を越えた時点で巻き上げが生じるというものであり、当該地点の底泥に対するものも含めて統一的に説明できる。この判定条件を当該地点の水深、周期および底泥強度に対して適用したところ、波形勾配が小さいために底泥応力が大きくならず、 τ_s/τ_y が 1.25 を越えることは現実問題としてありえないことがわかっていたため、今回のモデルでは巻き上げフラックスは常に 0 とした。

したがって、本研究では前述の粒径別沈降限界せん断応力の評価も含め、シルテーションモデルにおける沈降項中の各パラメータの評価に主眼をおいた検討を行った。

3.2 沈降項中の各パラメータの評価

沈降フラックス D の一般的な表示の一つとして Owen 型の表示が挙げられ、混合粒径性を考慮すると式 (4) のようになる。

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n [w_i \cdot C_{bi} \cdot (1 - \tau/\tau_{di})] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 w_b ：海底面における浮遊シルトの沈降速度、 C_b ：海底面における浮遊シルト濃度、 τ ：底面せん断応力、 τ_d ：沈降限界せん断応力、添字 i ：粒径段階である。 $(1 - \tau/\tau_{di})$ は、底面直上の粒子の着底率を意味し、底面せん断応力 τ により浮遊シルトの着底が阻害される効果を現している。なお、 τ が τ_{di} よりも大きい場合には、着底率は 0 となる。

ここでは、式 (4) の形に着目し、沈降フラックス D を、

- ① 沈降速度
- ② 底面濃度
- ③ 沈降限界せん断応力

という 3 つの要素に分けて検討した。なお、③の沈降限界せん断応力の評価については、水理実験にて得られた式 (1) の評価式を採用した。

(1) 沈降速度 w_b の評価

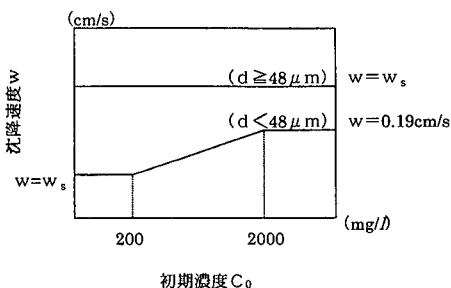


図-5 凝集性を考慮した粒径別の沈降速度 (金山ら, 1991)

シルト・粘土といった微細粒子は、凝集を生じるため濃度に応じて沈降速度が変化することが知られている。

本研究では、金山ら (1991) に倣い、図-5 に示すように設定した。すなわち、粒径 $48 \mu\text{m}$ 以下の細粒成分は 200 mg/l 以下の濃度ではストークス式に従い (単粒子沈降)、 $200 \sim 2000 \text{ mg/l}$ の範囲では濃度のべき関数として増加し (凝集沈降)、 2000 mg/l 以上の濃度では粒径によらず一定値 0.19 cm/s とした。また粒径 $48 \mu\text{m}$ 以上の粗粒成分については濃度によらず常にストーク式で表した。

(2) 底面濃度 C_b の評価

式 (2)、(3) は平面 2 次元モデルであり、各地点の濃度 C は全水深にわたる平均値を意味する。したがって、沈降フラックス D を算定するためには濃度の鉛直分布を設定し、平均濃度 C と底面濃度 C_b の関係を与える必要がある。本研究においては、以下の形の濃度分布を仮定した。

$$\left. \begin{aligned} & \cdot z < \delta \quad C(z) = C_b \\ & \cdot z > \delta \quad C(z) = C_b \cdot \exp\left[-\frac{w}{K_z}(z - \delta)\right] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 z ：海底面からの高さ、 δ ：基準高さ、 w ：沈降速度、 K_z ：鉛直方向の拡散係数 ($= \kappa \cdot u_* \cdot \delta$)、 κ ：カルマン定数 ($= 0.4$)、 u_* ：摩擦速度であり、基準高さ δ における濃度を底面濃度 C_b とみなす。

なお、基準高さ δ は fluid-mud 層厚に相当すると考えられるが、波動境界層厚 δ_w に比例すると仮定すると、以下の式 (6) のように表すことができる。

$$\delta = \alpha \cdot \delta_w = \sqrt{\alpha^2 \cdot \nu \cdot T / \pi} = \sqrt{\nu' T / \pi} \quad \dots\dots\dots (6)$$

喜岡ら (1998) は水理実験により fluid-mud 層内で動粘性係数が 1000 倍のオーダーで増加することを指摘しており、fluid-mud 層内で平均的に $\nu = 16.37 \text{ cm}^2/\text{s}$ という値を得ている。本研究では、喜岡ら (1998) を参考に、 $\alpha = 45$ ($\nu' = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$) と設定した。

4. 現地再現計算

4.1 検証期間と外力条件の設定

以上の方法によりシルテーションモデル中の各パラメータを評価し、モデルの現地適用性を試みた。検証の対象期間は 1992 年 2 月～10 月の約 9 ヶ月間を対象とした。再現計算は、波・流れ共存場で地形変化の履歴を考慮できる非定常計算法を用いた。対象期間内の来襲波浪のエネルギーや 1 step 当りの最大地形変化量を考慮し、図-6 に示す、波高 4 段階・3 時化のモデル時系列波浪を設定した。なお、取水流量の条件は、期間内の平均取水流量 ($240 \text{ m}^3/\text{s}$) を設定し、波浪条件によらず一定値とした。

実際の浚渫計画策定に当たっては、数ヶ月から 1、2

年にわたる長期的な地形変化の予測計算が要求されるため、波浪場・取水流況場・地形変化の計算を各ステップについて全て実施することは、計算時間の面からみて実用的ではない。したがって、今回のモデルでは波浪場に関しては予め4通りの平面分布をグリーン関数法により簡便的に求めておき、外力条件に応じてこれを使用し、取水流と地形変化の計算に関してのみ地形変化の履歴を反映する方法を採用した。

4.2 港口流入シルトの濃度と粒度の設定

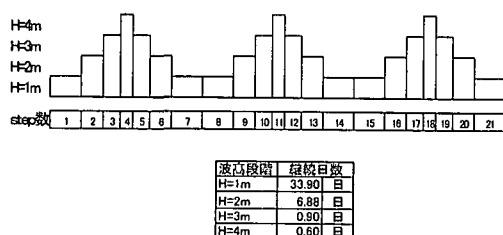
周辺海域で発生し、港口から流入する浮遊シルトと粒度は、港口での境界条件としてモデル時系列波浪のステップ毎に与えた。

近藤ら (1987) や清水ら (1992) より、港口より流入する浮遊シルト濃度は、過去の現地観測結果に基づき、経験的に以下のような有義波高の関数で与えられることがわかっている。

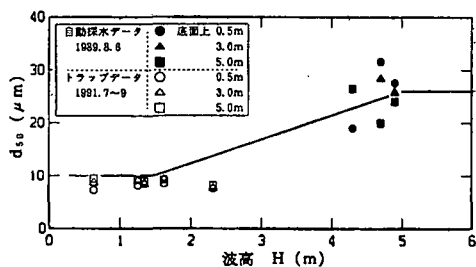
$$C_0 = A(5.04 + 3.47H_1^2 + 1.95H_2^2) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 C_0 ：港口流入浮遊シルト濃度、 H_1 ：当日の港外有義波高、 H_2 ：前日の港外有義波高、 A ：補正係数であり、過去の現地観測結果より $A=1.65$ 程度である。ただし、本研究においてはモデル時系列波浪の継続日数の設定により H_1 と H_2 をそれぞれ与えることはできないため、便宜的に $H_1=H_2$ と設定した。

流入浮遊シルトの粒度は、清水ら (1992) 同様、港口部における 1989 年 8 月の高波浪時の自動採水器による採水資料ならびに 1991 年 7 月～9 月に実施した浮遊シルトトラップによる捕捉試料の粒度分析結果に基づき設



図一六 再現計算に用いたモデル時系列波浪

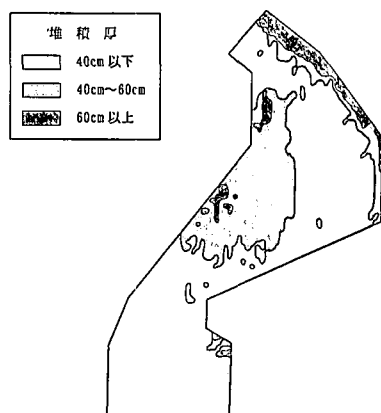


図一七 港口浮遊シルトの中央粒径と波高 (清水ら, 1992)

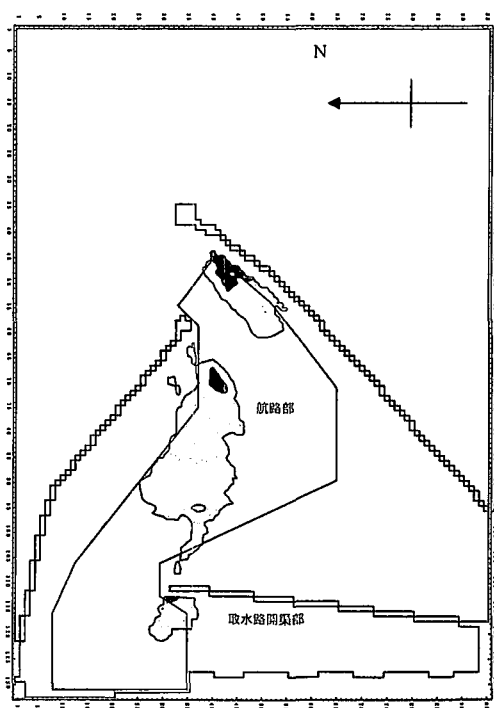
定した。浮遊シルトの中央粒径は、図一七に示すように、港外波高が大きくなると粗くなる傾向があるので、波高 1.5m 以下で $10 \mu m$ 、5m 以上で $26 \mu m$ となるように図中の直線で近似した。また、粒度分布は、高波浪時、通常波浪時ともに対数正規分布で表されることが確認されていたので、港外波高に応じて得られる中央粒径に対して対数正規分布するものと仮定し、10 成分の各粒径範囲の含有率を設定した。

4.3 砂移動による地形変化

漂砂量フラックスは、渡辺ら (1984) の漂砂量式によ



(1) 実測値 (航路部)



(2) 計算結果

図一八 現地再現計算結果

表-2 港内各領域での堆積土量の実測値と計算値の比較

	航路部	取水路開渠部
実測値	61,519	6,586 ^{a)}
計算値	64,752	6,961

^{a)} 取水路開渠部の実測堆積土量は、前後の測量データより日数換算して算出

り算定した。ただし、波による漂砂量 A_w は、渡辺ら (1981) のモデルの係数 B_w から換算し、局所的な外力条件に応じて変化させた。清水ら (1990) によれば、 B_w は 3～5 といわれているが、本研究では $B_w=3$ と設定した。

4.4 現地再現計算結果

以上の諸条件の設定に基づき、現地再現計算を行った結果を図-8 に示す。港口から航路南側境界にかけての堆積域を除けば、堆積傾向は実測値と計算値で概ね一致している。また、表-2 には、港内各領域での堆積土量の実測と計算値の比較を示すが、両者はほぼ一致しており、実用上十分な精度を有していると考えられる。

5. おわりに

広範囲に及ぶ粒径の取り扱いが要求される取水港湾におけるシルテーション問題に対して、混合粒径モデルを導入し、シルテーションモデルの沈降項中の各パラメータを適切に評価することにより、実用上十分な精度で実測地形変化を再現できることが確認された。

本研究では、特にシルテーションモデルにおける沈降項の各パラメータの評価に主眼をおいていたため、モデル時系列波浪等の外力条件は極力簡略化した。さらなる精度向上のためには、港口から航路南側境界にかけての堆積域も評価する必要がある。この課題については、現地データの蓄積を行いつつ、モデル時系波浪の見直し等

も含め、今後検討する予定である。さらに、堆積土量の定量的評価のみならず、堆積泥の粒度の評価についても行う予定である。

参 考 文 献

- 植木一浩・山田富朗・榊山 勉 (1992): 発電所専用港湾内のシルテーション機構に関する研究, 電力土木, No. 239, pp. 25-34.
- 金山 進・清水琢三・沼野祐二・山田富朗・植木一浩 (1991): 取水港湾における現地泥の沈降特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 486-490.
- 喜岡 渉・Md. Akter Hossain・柏原謙爾 (1998): 界面の粘性を考慮した Boussinesq 方程式によるトレンチ内の底泥の挙動解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 516-520.
- 近藤浩右・清水琢三・金山 進・鈴木義和・丸山康樹・鹿島遼一 (1987): 取水港湾におけるシルテーションについて, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 332-336.
- 近藤浩右・清水琢三・金山 進・村山恒雄 (1988): 取水港湾における砂およびシルトの港内堆積予測, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 367-371.
- 清水琢三・坂野雅人・金山 進・坂内茂記・植木一浩・榊山 勉 (1990): 取水港湾におけるシルテーションの現地調査, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 424-428.
- 清水琢三・金山 進・沼野祐二・山田富朗・植木一浩 (1991): 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, 第 38 巻, pp. 481-485.
- 清水琢三・金山 進・井上 茂・山田富朗・植木一浩・榊山 勉 (1992): 取水港湾におけるシルテーションの数値モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 421-425.
- 福本幸成・京谷 修・香川智哉 (2000): シルトの沈降に関する実験的研究, 電力土木, No. 290, pp. 96-99.
- 山西博幸・楠田哲也 (1992): 振動流下における高濃度層の形成・保持機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 286-290.
- 山西博幸・楠田哲也 (1994): 振動流下における高濃度浮泥層の流動特性とその保持機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 426-430.
- Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentration, J. of Hyd. Div., ASCE, Vol. 91, HY4, pp. 25-247.