

取水港湾における現地泥の沈降特性

金山 進*・清水 琢三*・沼野 祐二*
山田 富朗**・植木 一浩***

1. ま え が き

取水港湾におけるシルテーションは、高波浪時に港外で巻き上げられたシルト・粘土が、取水流によって港口より流入し、港内の静穏域に沈降・堆積するという形で進行する。したがって、その予測解析に際してはシミュレーションモデル中の沈降項を適切に評価することが重要な課題となるが、対象となる粒径レンジが広いため、沈降速度の違いによる分級と凝集による沈降速度の変化が並行して起こる点に特徴がある。既往のシルテーションモデルでは、沈降速度を濃度のみの関数として扱い、凝集の効果だけを評価していることが多いが、実際には、外力に応じて粗粒成分の含有率が変化することの効果も無視できず、ここで対象とする取水港湾の場合、こういった粒度分級の効果が凝集の効果よりも著しい。

本研究においては、シルテーションによる港内堆積が生じている東京電力(株)福島第二原子力発電所専用港湾をモデル地点として、濃度に応じた沈降速度の変化と鉛直方向濃度分布を粒径別に評価した混合粒径モデルを導入し、シルテーションの詳細な予測解析手法について、特に沈降項の評価に主眼をおいた検討を行った。

2. シルテーションモデルにおける沈降項の取り扱いについて

本研究においては、①濃度による沈降速度の変化、②鉛直濃度分布、③着底率という3つの要因に分けて沈降特性の検討を行う。

2.1 沈 降 速 度

シルト・粘度といった微細土粒子は、濃度によってフロックの大きさ、したがって沈降速度が変化することが知られており、シルテーション問題を複雑なものとする要因の一つとなっている。今回は、こういった凝集の効果と粒度分級の効果を分離して評価するため、沈降筒とレーザー回折式粒度分析装置を用いた実験結果より粒径

別に定式化した濃度と沈降速度の関係をを用いる。

2.2 鉛直濃度分布

3次元あるいは鉛直2次元のモデルの場合、濃度の鉛直分布は計算によって求められるが、最も広く用いられている単層モデルにおいてはなんらかの仮定が必要である。多くの場合、鉛直平均濃度と底面濃度の比率(一定値)を設定するといったことが行われるが、沈降速度と鉛直方向拡散係数を用いて濃度の鉛直分布を設定しているものもある(例えば大坪・村岡, 1987)。

本研究においては単層モデルを用いた検討を行うが、濃度鉛直分布は沈降速度と鉛直拡散係数による方法を採用する。

2.3 着 底 率

底面での沈降フラックス D の与え方としては、一般的に、底面における濃度 C_b と沈降速度 w_b の積で与えられるフラックス $w_b \cdot C_b$ に着底率 $1 - \tau/\tau_d$ を乗じて、

$$D = w_b \cdot C_b \cdot (1 - \tau/\tau_d) \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表示する考え方と、沈降フラックス自体は $w_b \cdot C_b$ とし、着底阻止の効果は巻き上げ項に受け持たせる考え方があり、細川ら(1986)は、前者をOwen型モデル、後者をSheng型モデルと称して分類している。(1)式において τ は底面剪断応力であり、 τ_d は底面直上の浮遊粒子が着底できなくなる沈降限界剪断応力である。

今回モデル地点とした福島第二原子力発電所港湾の場合、堆積シルトの巻き上げは極めて少ないことが推測されるため(清水ら, 1991)、本検討においては、前者のOwen型モデルの立場を採り、現地データに基づいて沈降限界剪断応力の検討を行う。

3. 粒径別に凝集性を考慮した沈降速度の定式化

3.1 試料泥の特性および実験方法

試料泥は福島第二地点の現地泥を105 μm のフルイで精製したもので、中央粒径23 μm 、CECは27 (meq/100g)であり、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の比率が高い。

沈降速度の測定には、内径30cm、有効深さ95cmの透明アクリル性沈降筒を用い、所定の濃度の泥水を筒内

* 正会員 工修 五洋建設(株)土木設計部
** 正会員 東電設計(株)原子力土木部
*** 正会員 工修 東京電力(株)原子力建設部

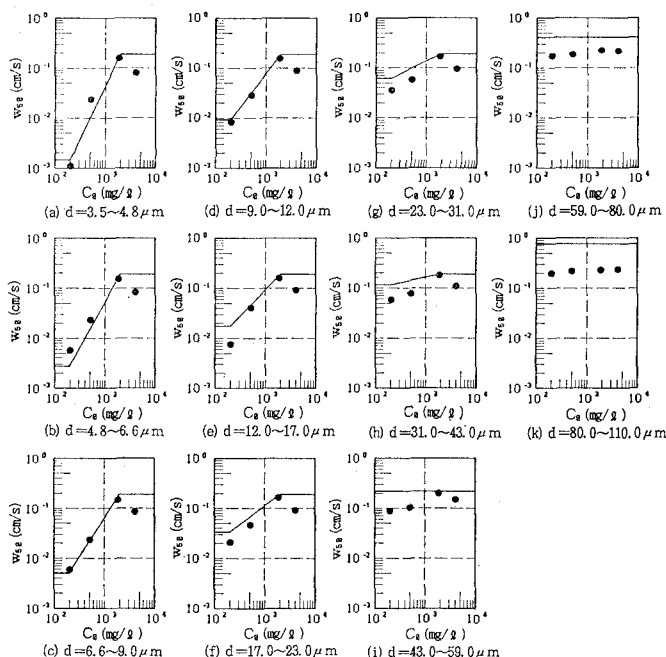


図-1 粒径段階別の沈降速度

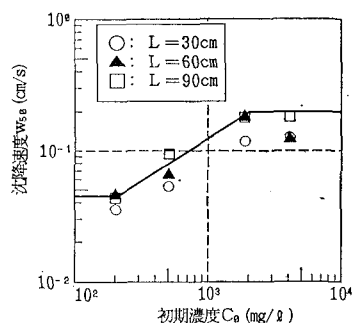


図-2 測定深度による沈降速度の比較

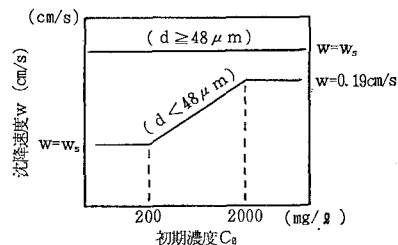


図-3 沈降速度の定式化

に一樣に分散させた後、所定の深度、時刻において採水を行い濃度を測定する“増分型”（例えば、細川ら、1982）の方法によった。

採水時刻は分散後 3, 8, 25, 90, 180, 420 分の 7 回である。採水深度 L は、初期水面から 30, 60, 90 cm の 3 箇所であり、このうち $L=60$ cm における採水試料については、粒径別に沈降速度を評価するため、レーザー回折式粒度分析装置（島津製作所製）によって粒度組成を測定した。

3.2 沈降速度の定式化

$L=60$ cm のデータに対して粒径別に沈降速度 w_{50} を求めて初期濃度（全粒径成分のもの）の関数として整理したものを図-1 に示す。粗粒成分を除けば、図-3 に示す関係が概ね成立する。すなわち、各粒径とも 200 mg/l 以下の濃度では Stokes 式に従い（単粒子沈降）、200~2,000 mg/l の範囲では、濃度のべき関数として増加し（凝集沈降）、2,000 mg/l において粒径によらず一定値 0.19 cm/s となる。静水中においては、これ以上の濃度になると沈降速度が減少する干渉沈降領域に移るものと予想されるが、外力場での適用を考慮して鶴谷（1989）と同様、平衡値（今回の場合 0.19 cm/s）が維持されるものとする。また、単粒子沈降速度 w_s が 0.19 cm/s よりも大きい粗粒成分については濃度によらず常に w_s で沈降するものとする。

この実験条件の下で測定できる最大の沈降速度（60 cm/3 分=0.33 cm/s）は、約 60 μ m の土粒子の単粒子

沈降速度に相当し、これ以上の粗粒成分については十分な精度を有していない。図-1 の（j）および（k）の結果については、むしろ図-3 のように濃度とは無関係に単粒子速度で沈降しているものと解釈するのが適切であると考えられる。

今回の定式化における特性値のうち、沈降速度の最大値 0.19 cm/s は、当地点の底泥に固有の値、いわゆるローカルファクターであると考えられるが、凝集沈降の濃度範囲 200~2,000 mg/l は、Ross・Mehta（1989）による 400~2,000 mg/l と比較しても一般性のあるものと考えられる。

図-2 は全成分に対する結果である。図中の実線は試料中央粒径（23 μ m）に対して図-3 の関係を示したものである。採水深度の効果に注目すると $L=30$ cm による w_{50} が他の 2 深度のものより小さく、筒内を沈降する間に凝集が進行しているものと思われる。しかし、 $L=60$ cm と 90 cm で殆ど相違が認められないことから今回の実験条件では 60 cm 以深のデータは、凝集が十分進んだ状態のものであると考えられる。

4. 現地データによる濃度鉛直分布および沈降限界掃流力の検討

4.1 検討方法

ここで用いた方法は、現地における浮遊シルト濃度と外力の時系列データから計算される沈降フラックスの累積値が同一地点におけるシルトラップデータと整合す

るように鉛直濃度分布および沈降限界掃流力を定式化するというものである。

(1) 現地データの概要

現地調査は、平成元年7～9月に福島第二原子力発電所港湾内において実施されており、清水ら(1990)によって詳細に報告されている。今回の検討に直接関与する測点の位置関係を図-4に示す。

港口に近いA-2地点は底質中央粒径 d_{50} が約150 μm の砂堆積域、港内中央のA-6地点は d_{50} が100 μm を僅かに下回る砂・シルト共存域、港内奥のA-8地点は d_{50} が約50 μm のシルト堆積域である。

3地点とも超音波式波高計、水圧センサー付電磁流速計(底面+0.8m)および自記式濁度計(底面+1.5m)が設置され、波高、流速および濃度の経時変化データが得られている。このうちA-8地点においては底面から3mの位置にも濁度計が設置されており、鉛直濃度分布の検証データとなる。

シルトトラップは、A-6およびA-8の2地点に設置されており、底面と同じ高さに開口部を持つタイプと底面から30cmの高さに開口部を有するタイプを併用した。

(2) 鉛直拡散係数の仮定

鉛直拡散係数に対して図-5に示すような2層モデルの分布を仮定し、鉛直方向の拡散フラックスと沈降フラックスの釣合のみから濃度の鉛直分布を以下のように設定した。

$$\cdot z < z_m$$

$$C(z) = C_\delta \left(\frac{z}{\delta} \right)^{-\gamma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\cdot z > z_m$$

$$C(z) = C_\delta \left(\frac{z_m}{\delta} \right)^{-\gamma} \exp \left\{ -\gamma \left(\frac{z - z_m}{z_m} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 z_m ：鉛直拡散係数 K_z が一定値になる高さ、 δ ：底面濃度を与える基準高さ、 C_δ ： δ における濃度であり、 $\gamma (=w/(\kappa \cdot u_*))$ はカルマン定数 $\kappa (=0.4)$ と摩擦速度 u_* および沈降速度 w より求められる。

z_m を境に下層の濃度はべき乗分布、上層は指数分布となり、両者は $z = z_m$ において1階微分まで連続である。

この濃度分布形は、空間的な濃度勾配と底面における物質収支を無視して得られるものであるが、今回は計算の容易さを考えてこの仮定を採用した。

(3) 浮遊シルトの粒度分布推定法

今回の検討では、混合粒径の取り扱いを行う。すなわち、各粒径段階毎に(2)、(3)式によって濃度鉛直分布を設定し、濁度計センサー位置(底面から1.5m)の濃度から底面濃度 C_δ を求める。このためには、対象地点(A-6およびA-8)の浮遊シルトの粒度分布が必要となるが、現時点ではこれに用いるべき粒径の実測結果

が得られていない。そこで、今回の検討においては、港内の分級沈降を簡略的にシミュレートして対象地点における浮遊シルトの粒度分布を求めた。

浮遊シルトの粒度分布の計算には、港内を仮想水路に見立てた1次元水路モデルを用いる(図-4)。A-2地点すなわち格子3を上流端の境界とし、1時間間隔で得られている濃度データに図-6に示す粒度比率(A-2地点における高波浪時の自動採水データより設定)を乗じて各粒径段階別の境界濃度を与え、拡散を無視して定常状態を仮定した(4)式を流下方向に積分することによって港内における粒径別の濃度分布を計算する。この結果から対象地点の浮遊シルトの粒度分布を求めることができる。

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = -w_s C_\delta \left(1 - \frac{\tau}{\tau_b} \right) \frac{1}{h} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式において、 C は各粒径段階別の鉛直平均濃度、 w_s は底面濃度 C_δ (全粒径成分の合計)と粒径によって3.2の方法で求められる底面沈降速度、 h は水

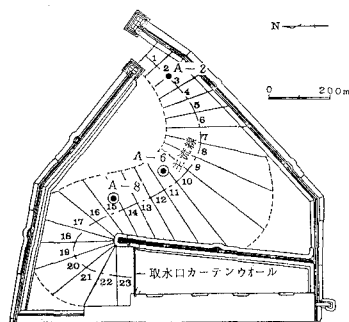


図-4 測点および1次元仮想水路モデル

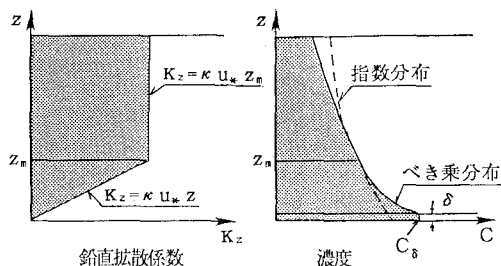


図-5 鉛直拡散係数の仮定

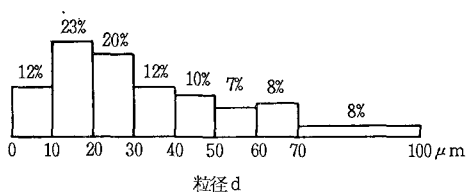


図-6 港口流入シルトの設定粒度

深である。濃度鉛直分布を決定する際の沈降速度は鉛直平均濃度 C (全粒径成分の合計) と粒径より求め、移流速度 u については、対象地点の値が実測値と一致するように流量を毎時調整した。なお、清水ら (1990) にも示されているように、波高が 4 m を越えた 8 月 6 日 18:00~24:00 には、流速測定を行った下層では戻り流れが発生していたので、この間は移流速度を 0 とした。

4.2 現地データの再現結果

上記方法で得られる粒径別の濃度とその鉛直分布によって A-6 および A-8 地点における濃度データ (底面+1.5 m における値) から 1 時間間隔の底面濃度時系列、したがって底面における沈降フラックス D の時系列を求めることができる。

基準高さ δ を拡散係数が一定値となる高さ z_m と等しく取ることとし、底面と同じ高さに開口部を有するタイプのトラップ捕捉重量 (粒径 100 μm 以下の土粒子換算重量) と沈降フラックスのトラップ設置期間中 (平成元年 7 月 26 日~8 月 19 日) の累積値が一致するような τ_d と δ の組合せをパラメータスタディーによって求めた。表-1 にその代表例を示す。0.7, 0.4, 0.2 Pa の 3 通りの τ_d に対して A-8 地点のトラップ捕捉量を再現できる δ が得られている。このうち τ_d が 0.7 および 0.4 Pa のものは、A-6 地点のトラップ捕捉量も概ね再現できているが、0.2 Pa のものは過大評価となっている。 τ_d を小さく設定することは、その場所での着底率を小さくして沈降量を減らす効果がある反面、沈降速度の大きい粗粒成分の流達率を大きくすることによって沈降量を増やす効果もある。 δ を小さくすることも同様の効果を有する。

図-7 はトラップ捕捉泥の粒度分布に対する再現性を調べたものである。A-6 地点においては、 $\tau_d=0.4$ Pa とした場合に良好な再現性を示している。 $\tau_d=0.7$ Pa としたものは粗粒成分の比率がかなり過小評価となっている。 $\tau_d=0.2$ Pa の場合は若干粗めの分布となっている。A-8 地点では、いずれのケースも細粒成分が多すぎる結果となっているが、 $\tau_d=0.4$ および 0.2 Pa のケースのほうが $\tau_d=0.7$ Pa のケースに比べると実測データに近い。今回の検討では、両地点のトラップ捕捉量が再現でき、なおかつ A-8 地点での粒度分布も再現できるような τ_d と δ の組合せは見い出せなかった。

以上の結果より、今回の検討において用いた仮定の下では沈降限界剪断力 τ_d は 0.4 Pa、鉛直拡散係数が一定値に落ち着く高さ z_m および基準濃度高さ δ を底面から 3 cm とした場合に最も良好な再現性が得られた。

図-8 は、このケースについてトラップ設置期間中の諸量の経時変化を示したものである。8 月 6 日と 16 日に

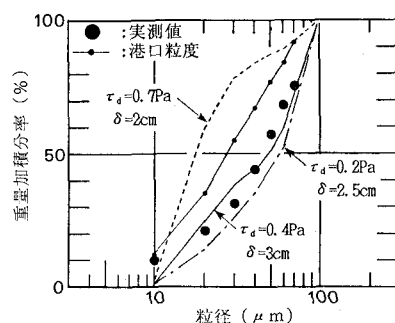
高波浪が来襲しているが、この時の沖波有義波高 (水深 12 m の地点) のピーク値は、それぞれ 5.02 および 3.99 m である。

トラップ捕捉量の図に示されている黒丸は底面に開口部を有するタイプの実測値 (粒径 100 μm 以下のみ) であり、白丸は底面から 30 cm の高さに開口部を有するタイプのものである。白丸に対する計算値は底面濃度 C_b に代えて $z=30$ cm の濃度を用いたものであるが、この場合も良好な再現性を示している。

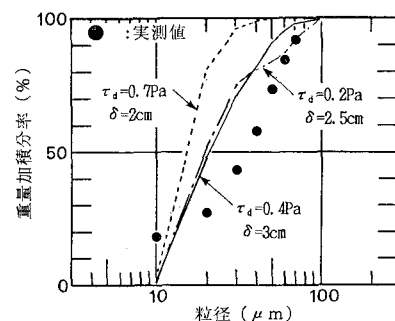
自記式濁度計を 2 深度 (1.5 m および 3 m) に設置した A-8 地点に対しては、2 深度の濃度比率 ($C(3\text{m})/C(1.5\text{m})$) について実測値と計算値の比較を行った。静穏時、低濃度時には計算値が小さめになっているが、高波浪来襲後の高濃度発生時にはほぼ一致している。したがって、顕著な堆積が生じる時期には濃度鉛直分布の再現性も良好であるといえる。

表-1 トラップ捕捉量の再現結果

着底限界 τ_d (Pa)	基準高 δ (cm)	トラップ捕捉量	
		A-6 (実測値 3.0 kg)	A-8 (実測値 4.2 kg)
0.7	2.0	2.6	4.0
0.4	3.0	3.5	4.3
0.2	2.5	5.4	4.0



(a) A-6 地点



(b) A-8 地点

図-7 トラップ泥粒度の再現性

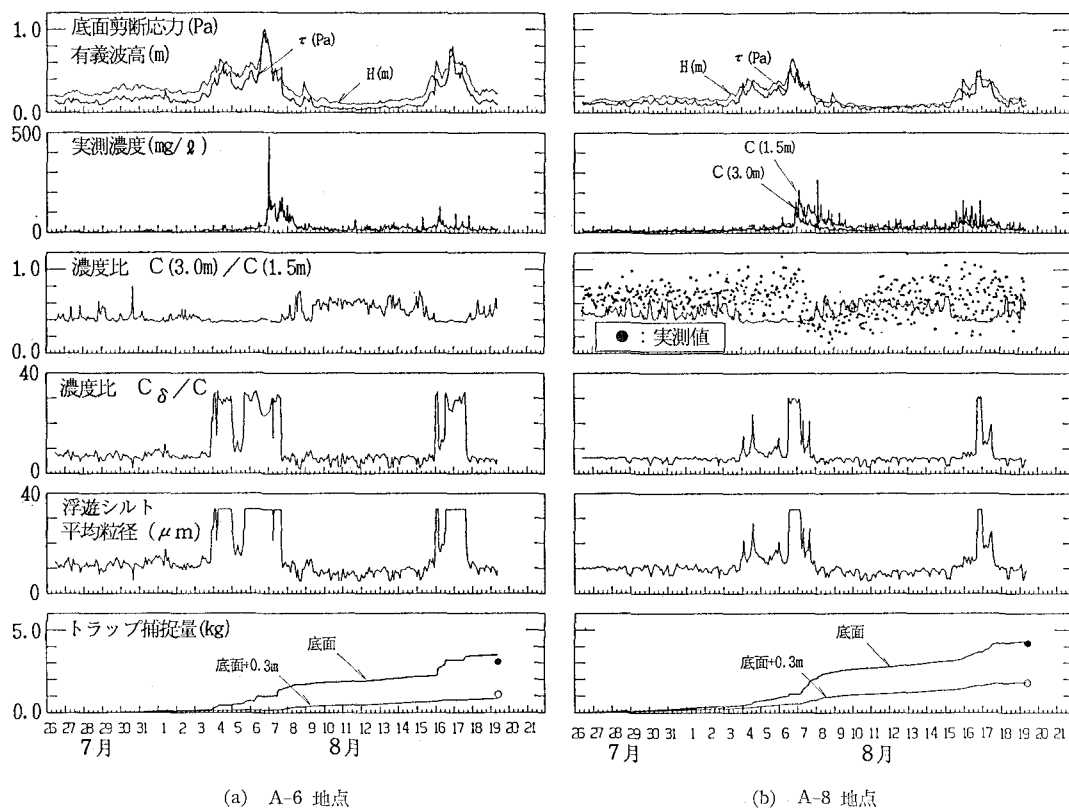


図-8 トラップ設置期間中の諸量の経時変化

鉛直平均の濃度に対する底面濃度の比 C_δ/C が浮遊シルトの平均粒径に応じた経時変化を示していることから、平均粒径の増大による沈降速度増加の効果が、外力の増大によって鉛直拡散係数が増加する効果に比べて大きいことがわかる。

5. あとがき

広範囲におよぶ粒径の取り扱いが要求される取水港湾のシルテーション問題に対して混合粒径モデルの導入に関する検討を行った。ここで得られた諸係数は今後のデータ蓄積によって修正、確定されていくものと考えている。さらに、粒径別の τ_d の評価などモデル自体の改良も試みる予定である。

最後に、本研究を進めるに当たり、数多くの貴重な御意見を賜った堀川清司東京大学名誉教授、渡辺 晃東京大学教授、三村信男茨城大学助教授ならびに磯部雅彦東京大学助教授をはじめとする「発電所専用港湾内堆積防止工に関する研究」検討会（主査：鹿島遼一電力中央研究所主席専門役）の委員の方々に深甚なる謝意を表します。また、本研究を進めるに当たり常に熱心に議論し

て戴いた電力中央研究所榊山勉氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 大坪国順・村岡浩爾 (1987): 底泥の再浮上現象の現地観測およびそのシミュレーション, 土木学会論文集, 第387号/II-8, pp. 189-198.
- 清水琢三・坂野雅人・金山 進・阪内茂記・植木一浩・榊山 勉 (1990): 取水港湾におけるシルテーションに関する現地調査, 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.
- 鶴谷広一 (1989): シルテーションによる港湾埋没の予測手法, 平成元年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 101-153.
- 細川恭史・堀江 毅・三好英一・加藤道康 (1982): 沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法について—数種の測定法の比較, 港湾技研資料, No. 433, 26 p.
- 細川恭史・田中則男・久高将信・佐藤勝弘 (1986): トレンチ内に堆積する浮泥量の予測手法と現地への適用例, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 312-316.
- Ross, M.A. and A.J. Mehta (1989): On the mechanics of lutoclines and fluid mud, Journal of Coastal Research, Special Issue, No. 5, pp. 51-62.