

取水港湾におけるシルテーションの数値モデル

清水 琢三*・ 金山 進*・ 井上 茂*
山田 富朗**・ 植木 一浩***・ 榊山 勉****

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浮遊シルト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。移流・沈降過程については、流入浮遊シルトを混合粒径として取り扱い、凝集性や沈降限界剪断応力など沈降項を適切に評価することにより堆積シルトの粒度組成までも再現できることが明らかになっている（金山ら、1991）。また、堆積したシルトは、港内の波浪条件に対しては、波動運動は生じるものの、泥層表面のひび割れが発生せず、巻き上げが生じないことがわかっている（清水ら、1991）。しかしながら、精度の高い予測モデルを構築するためには、港口から港内中央にかけての砂・シルト堆積域での移動特性の解明、堆積泥の強度分布の把握などの課題を解決しなければならない。

本研究では、東京電力福島第二原子発電所専用港湾をモデル地点として、現地調査ならびに室内実験を行ってこれらの課題に取り組むとともに、移流・沈降モデルに加えて、堆積シルトの質量輸送を同時に考慮した数値モデルの構築を試みた。

2. 底泥強度の鉛直分布の定式化

堆積泥の強度を把握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。ここでは、福島第二原子力発電所専用港湾内のシルト堆積域において不攪乱採取された柱状データに基づいて底泥降伏値の定式化を試みた。試料採取には、内径 2.6 cm、肉厚 2 mm のアクリルパイプを用い、5 cm 間隔に分割して粒度および含水比を測定した。なお、以下の検討では粒径として中央粒径 d_{50} を用いた。

2.1 含水比の鉛直分布

含水比の鉛直分布は自重による圧密圧力に支配されていると考えられる。体積比 f と圧密圧力 p の間には、界

面沈降過程を含めた幅広い応力範囲で、 $\log f$ と $\log p$ の直線関係が成立することが知られている（例えば、小林ら、1990）。

$$\log f = -\alpha \log p + \log f_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 f_0 および α は土の圧密特性を表すパラメタである。体積比 f および圧密圧力 p は、底泥の含水比 w 、土粒子の密度 ρ_s 、堆積深度 z ならびに海水の密度 ρ_w を用いて、それぞれ式 (2)、(3) で表される。ただし、底泥の飽和度は 100% とする。

$$f = 1 + \rho_s \cdot w / (100 \cdot \rho_w) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$p = \left(\frac{1 + w/100}{1/\rho_s + w/(100 \cdot \rho_w)} - \rho_w \right) \cdot g z \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-1 は、柱状採取データを式 (2)、(3) を用いて式 (1) の形で整理した結果である。図中の回帰式は式 (4) で表されるように f_0 および α を d_{50} (μm) の関数として全データを系統的に扱ったもので、適合性は良好である。

$$f_0 = 62.1 d_{50}^{-0.832}, \quad \alpha = 0.281 e^{-0.0641 d_{50}} \quad \dots (4)$$

また、図中の圧密圧力の比較的大きな領域には、Yamauchi et al. (1990) によるモデル地点の浚渫泥（中央粒

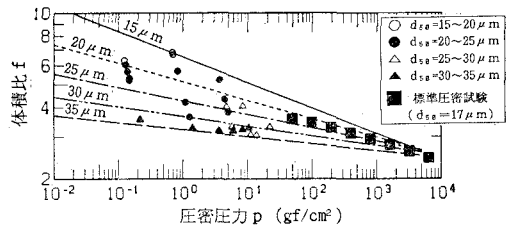


図-1 現地泥の体積比と圧密圧力の関係

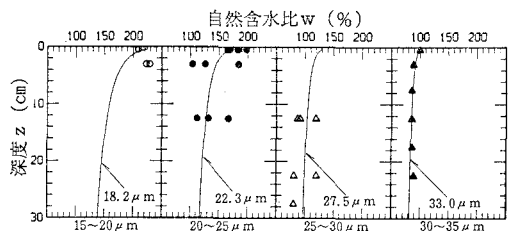


図-2 現地泥の含水比の鉛直分布

* 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
**** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部

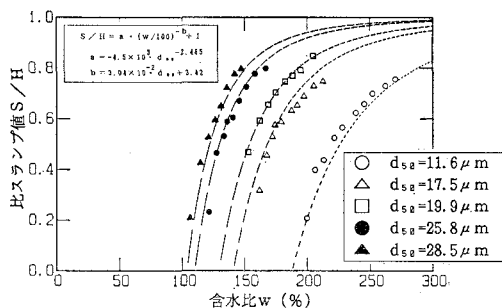


図-3 含水比と比スランプ値の関係

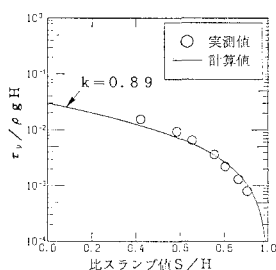


図-4 比スランプ値と降伏値

径 $17 \mu\text{m}$) に対する標準圧密試験の結果も併せて示されている。標準圧密試験の結果と柱状採取データは共通の関係に従っており、仮に現地における柱状採取データが得られなくても、沈降試験から圧密試験に至る幅広い応力範囲の室内試験を粒径別に行えば、式(1)の関係を求めることができる。図-2は、図-1の関係から粒径別に含水比の鉛直分布を求めた結果であり、粒径、深度と含水比の関係を系統的に表現している。

2.2 降伏値の鉛直分布

含水比 w から降伏値 τ_y への換算は、比スランプ値 S/H を介して行う。図-3は、比スランプ値 S/H を中央粒径 d_{50} と含水比 w の関係として整理したものであるが、粒径の小さい試料ほど高い含水比で大きな強度を示す傾向が認められる。この関係と図-2の結果を用いることにより粒径別に S/H の鉛直分布を求めることができる。さらに、比スランプ値 S/H から降伏値 τ_y への換算には、図-4に示す回転粘度計による底泥降伏値の実測値 τ_y と比スランプ値 S/H の関係を用いる。図中の回帰式は、スランプコーン (JIS A 1109) の形状を考慮して鶴谷ら (1988) の提案式を補正したものである (清水ら, 1991)。

図-5は、以上の手順により粒径別に降伏値 τ_y の鉛直分布を算定した結果であり、深度の増加とともに、また粒径が粗くなるほど増加する傾向を示す。式(1)に立脚した今回のモデル化では、堆積層表面での降伏値はゼロになるが、今回の検討では便宜的に表層から5mm以浅の強度を5mmの深さの強度で一定と仮定した。

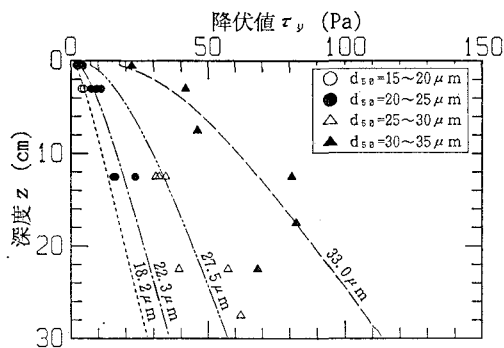


図-5 現地底泥の降伏値の鉛直分布

3. 砂・シルト堆積域での移動特性

取水港湾では、粒径段階別の堆積特性を示すため、港口から港内中央にかけて砂とシルトが混在する領域が生じる。したがって、シルテーションモデルの構築には、砂・シルト共存域での砂およびシルトの移動特性の取り扱いが重要な課題となる。そこで本研究では、砂・シルト堆積域を模擬した2通りの室内実験を行って、そのメカニズムの把握を試みた。

一つは、表面乾燥飽水状態の砂 (中央粒径 $150 \mu\text{m}$) と自然含水比のシルト (中央粒径 $15 \mu\text{m}$, 含水比 140%) を所定の割合で混合した試料に対して造波水路実験 (水深 25 cm , 波高 $5 \sim 10 \text{ cm}$, 周期 1.5 sec , 流速 0.1 m/s , 試料厚 5 cm) を行った。目視観察によれば、砂含有率 100% のときは砂移動がみられたが、 90% のときは全く動かなかった。さらに砂含有率が 75% 以下の場合には堆積層の波動が認められ、シルトのみの場合と同様の挙動を示した。これは砂・シルト混合試料に対して行ったスランプ試験の結果からも説明できる。比スランプ値 S/H とシルト含水比 w_s の関係は、図-6に示すように、砂含有率 75% 以下の範囲ではシルトのみの場合と同一となるので、試料の流動特性は主としてシルトに支配され

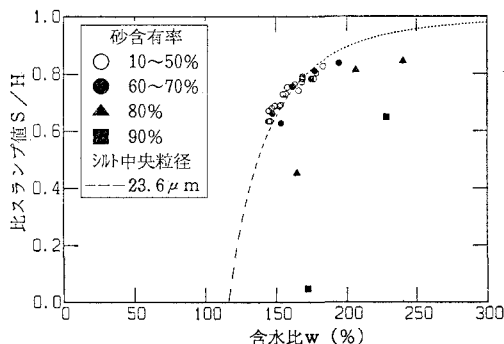


図-6 砂含有率によるスランプ特性の変化

ることがわかる。また、砂含有率 75% という値はシルト中の砂粒子が互いに接するようになる限界の値にほぼ一致する。以上より、砂が多少混入してもシルトの流動特性はあまり変化しないと考えることができる。

もう一つの実験は、厚さ 5 cm の砂堆積層の上に厚さ 1 cm のシルト堆積層（降伏値 7 Pa）を設けた場合の造波水路実験である。これは、砂層の上に粒径約 25 μm のシルトが 1 cm 堆積した状態を模擬している。砂粒子の移動が生じる外力条件（波高約 5 cm）の下でもシルトは動かず、砂はシルト層の上を移動した。この外力条件は厚さ 5 cm のシルト層に対しては底泥波動および質量輸送を励起することは既に確認されており（清水ら, 1991）、シルト層が移動しなかったのは、堆積層が薄いためである。したがって、港口部の砂堆積域の上に堆積したシルト層は、ある程度の堆積厚になって初めて移動可能となるが、実際には、港口付近のシルトはほとんど堆積していない。そこで本研究では、高波浪時に堆積するのとはほぼ同時に底泥波動に伴う質量輸送によって港内へと移動するものと考え、このような移動機構をモデルに取り込んだ。また、シルト堆積層が移動しなくとも、砂は移動したことから、砂の移動はシルトとは別個に取り扱い、両者の干渉は水深変化による外力の変化を介してのみ考慮した。

4. 取水港湾における 1 次元シルテーションモデル

取水流が卓越する当港湾においては、図-7 に示す 1 次元水路モデルの導入が可能である。各点の流速は取水量と水路断面積から求め、波高はあらかじめ計算した各点の波高比に入射波高を乗じて評価した。計算時間ステップは 12 時間とし、①移流シルトの沈降、堆積による地形変化、②底泥波動に伴う質量輸送による地形変化、③砂による地形変化を逐次計算した。

4.1 移流シルトの沈降・堆積による地形変化

移流シルトの沈降、堆積による地形変化の計算には、拡散項を無視して定常状態を仮定した浮遊シルトの物質

収支式 (5) と底質の連続式 (6) を用いる。

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{E-D}{h} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\rho_s'}{h} \cdot \frac{\partial \eta_b}{\partial t} + \frac{E-D}{h} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 A : 鉛直平均濃度、 u : 流速、 E : 巻き上げフラックス、 D : 沈降フラックス、 h : 水深、 η_b : 海底地盤高、 ρ_s' : 底泥単位体積あたりの土粒子重量である。

移流・沈降現象には粒度分級効果が重要となるので、0~100 μm の範囲を 5 μm 間隔で合計 20 成分に分割し、混合粒径の取り扱いを行った（金山ら, 1991）。

(1) 港口流入浮遊シルト濃度と粒度組成

周辺海域で発生し、港口から流入する浮遊シルト濃度と粒度は、港口での境界条件として 1 日毎に与えた。

当地点の北約 10 km に位置する福島第一原子力地点において、港口流入浮遊シルト濃度と波高の関係が約 1 年間の観測結果に基づき得られている（近藤ら, 1987）。福島第二原子力地点は、福島第一原子力地点よりも周辺海域の底質の細粒子成分含有率が高いことから、これに補正係数 A を乗じた次式を用いた。

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

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 : 前日の有義波高である。1990 年 2~4 月に港湾内外で行った当地点の濃度観測結果によれば、補正係数 A は 1.5~2.0 の値である。

流入浮遊シルトの粒度は、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試料（清水ら, 1990）ならびに 1991 年 7~9 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定した。浮遊シルトの中央粒径は、図-8 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 1.5 m 以下で 10 μm 、5 m 以上で 26 μm になるように図中の直線で近似した。なお、トラップによる捕捉試料は、瞬時に浮遊粒子を採取した自動採水データとは異なり、沈降速度の大きな粒子が選択的に集積することが予想されるので、測定された粒度分布に粒径の -2 乗の重み付けを行って修正したものを用いた。また、港外波高としては自動採

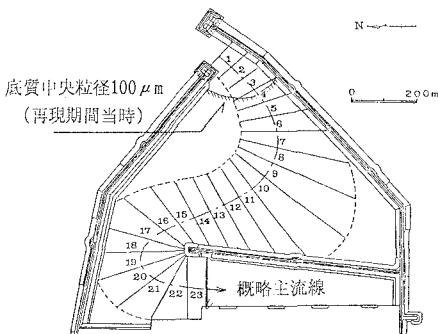


図-7 仮想水路による港内のモデル化

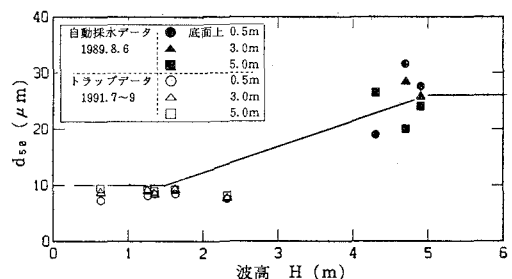


図-8 入射波高と流入シルト中央粒径の関係

水試料は採水時の有義波高を、トラップ試料はトラップ設置期間中のエネルギー平均有義波高を用いた。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わされることが確認されたので、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、20成分の各粒径範囲の含有率を設定した。

(2) 移流シルトの沈降・堆積

沈降項とそれに含まれるパラメータは、当地点を対象とした金山ら (1991) の研究成果に基づき設定した。

$$D = w_b \cdot C_b \cdot (1 - \tau/\tau_a) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 D : 沈降フラックス, C_b : 底面濃度, w_b : 沈降速度, τ : 底面剪断応力, τ_a : 浮遊粒子が着底できなくなる沈降限界掃流力である。

沈降速度は、粒径別に凝集性を考慮した評価法を用いた。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 で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。

底面濃度 C_b は、実際の海底面から δ の高さで定義するとともに、鉛直拡散係数 K_z を $\kappa u_* \delta$ で与えて濃度の鉛直分布を評価した。金山ら (1991) の現地検証結果に基づき、沈降限界掃流力 τ_a を 0.4 Pa 、基準高さ δ を 3 cm とした。

(3) 底泥の巻き上げ

清水ら (1991) は、底泥表面のひび割れの成長と底泥波動の関係に注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剪断応力 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、当地点の底泥に対するものも含めて既往の実験データを統一的に説明できる。この判定条件を当地点の水深、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の σ_x 成分が大きくなり、 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た。そこで今回のモデルでは巻き上げフラックス E は常に0とした。

4.2 底泥波動質量輸送による地形変化

底泥質量輸送量の計算は粘性流体多層モデル (中野ら, 1987) で求めた泥層内流速場から算定するが、ストークスドリフト成分に加えてオイラー成分も考慮した。図-9 は、Sakakiyama・Bijker (1989) の実験結果の再現計算結果であり、降伏値や粘性係数を適切に与えれば、質量輸送速度を精度よく算定できることを示している。

質量輸送に伴う地形変化は、便宜的ではあるが、漂砂

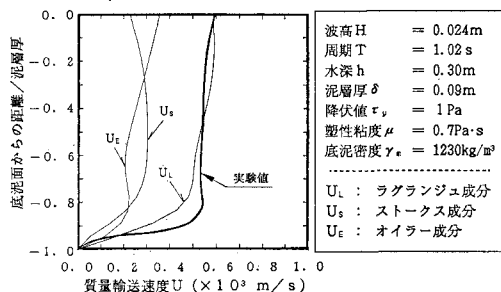


図-9 粘性流体多層モデルによる質量輸送の算定

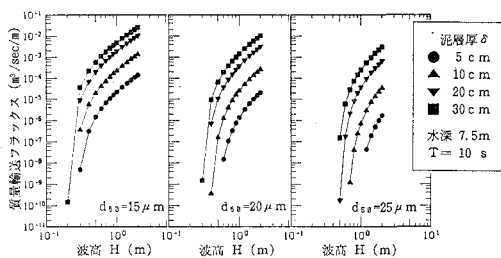


図-10 外力・底泥条件と質量輸送フラックス

の連続式と同様、質量輸送フラックスが局所的な外力ならびに堆積シルトの強度、層厚によって決まるものと考えて算定した。降伏値の鉛直分布は、移流・沈降計算の結果求める堆積シルトの中央粒径に対して、図-5 の関係から求めた。本研究では、計算時間の短縮を図るため、各ステップで粘性流体多層モデルによる計算を行うのではなく、図-10に示すように、あらかじめ種々の底泥の粒径、堆積厚、波高の条件に対して計算しておき、与えられた条件に対して内挿して用いた。質量輸送フラックスは、波高が大きく、粒径が小さいほど大きくなる傾向を示すが、堆積厚の影響が大きく、堆積厚 30 cm の場合は 5 cm の場合に比べて2~3オーダー大きくなる。

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) の漂砂量式によって算定する。ただし、波による漂砂量係数 A_w は渡辺 (1981) のモデルの係数 B_w から換算し、局所的な条件によって変化させた。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 $B_w = 4$ として現地との整合を得た。

5. モデルの現地適用性の検証

1982年2月から1983年10月にかけての長期間の地形変化を対象にモデルの現地適用性を検証した。これは取水が開始されてから最初の浚渫が行われるまでの期間に対応している。

地形変化の再現計算結果を図-11に示す。一点鎖線が

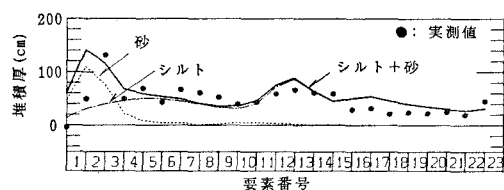


図-11 地形変化の追算結果

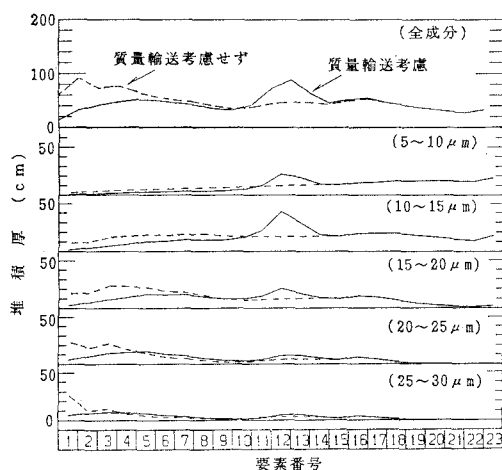


図-12 粒径別のシルト堆積厚の計算結果

外の成分の堆積厚は殆ど無視できる。港口付近に堆積したシルトが質量輸送によって港内奥へ移動しているのがわかる。また、実測値にもみられる港内中央の要素12~13の顕著な堆積は質量輸送によるものであることがわかる。このように質量輸送は、シルトの港内堆積量には関係しないが、港内の堆積分布には重要な役割を果たすことがわかる。

6. あとがき

取水港湾におけるシルテーションに関するこれまでの知見を集約して、移流、沈降、巻き上げ、質量輸送といった素過程を現地調査ならびに室内実験によって詳細に検討した結果に基づき数値モデルを構築し、その現地適用性を検討した。シルテーションは底泥の粒度や強度などローカルファクターを多く含むため、他地点に適用するには現地データに基づく適切なパラメタの設定が必要であるが、多くの地点への適用を通じて修正、確立されていくものと考えている。

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埼玉大学学長（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。

参考文献

- 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.
- 小林正樹・山川 匠・小川富美子(1990): 沈降過程を考慮した超軟弱粘土の自重圧密解析, 港湾技研資料, No. 680, 21 p.
- 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. 392-396.
- 清水琢三・坂野雅人・金山 進・阪内茂記・植木一浩・梶山勉(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・近藤浩右・渡辺 晃(1990): 局所漂砂量算定式の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 274-278.
- 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・江口秀二・鷹濱 潤(1989): ベーン試験とスランプ試験による軟らかい粘土の流動限界の検討-回転粘度計との比較, 港湾技研資料, No. 655, 21p.
- 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤(1987): 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について, 港研報告, 第26巻, 第2号, pp. 171-212.
- Sakakiyama, T. and E. W. Bijker(1989): Mass transport velocity in mud layer due to progressive waves, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 115, No. 5, pp. 614-633.
- Yamauchi, H., G. Imai, K. Watanabe and K. Ogata(1991): Sedimentation-consolidation analyses of pump-dredged cohesive soils, Proc. of GEO-COAST '91, pp. 129-134.

シルト、点線が砂の堆積厚を示しており、実線は両者の和である。横軸は図-7 に示した水路モデルの要素番号であり、●で示された実測値は深浅測量データから得られた水深変化量を各要素の境界線上で平均したものである。港口付近に砂が、港内中央から奥にかけてシルトが堆積する様子が再現されており、堆積厚の分布形状も実測値と概ね一致している。

港口流入濃度は、堆積量の総量が実測値と合うように式(7)の係数Aを1.65とした。また、堆積分布形状を合わせるため、質量輸送による地形変化の計算において、図-10 から求めた質量輸送フラックスに係数0.03を乗じて補正した。質量輸送の計算に用いた底泥の降伏値は、回転粘度計により繰り返した状態で得られた強度であり、巻き上げが生じないような小さい外力条件に対しては底泥強度が計算に用いたものよりも大きいことは十分想定される。また、質量輸送フラックスは、海底勾配の影響や外力の場所的变化を無視して、局所的な外力条件で、しかも同じ強度の底泥が同じ高さに敷かれた状態を想定して評価されていることも質量輸送フラックスが計算値よりも小さい原因の一つと考えられる。

図-12は、シルト堆積厚について、底泥質量輸送を考慮しなかった場合との比較を示している。堆積厚の大きい4成分について粒径別の表示を行っているが、これ以