

河口港埋没量分布予測手法の開発について

中田 邦夫* ・ 及 川 研**・ 難波 喬司***
長谷川賢一****・ 西田 寿夫****

1. 目 的

日本海沿岸の港湾は河口港が多く、港内の埋没量の把握が重要な課題となっており、とくに河川・港湾形状を変更（例えばポケット浚渫、背割堤の計画・撤去）する場合に変更後の埋没量を推定する手法の開発が要請されている。

本研究は、浮遊砂のみばかりでなく掃流砂による港内埋没が無視し得ないと考えられる河口港の埋没現象を解析し、河川・港湾形状を変更した場合の埋没量の分布を推定するため浮遊砂・掃流砂双方を考慮に入れたシミュレーション手法を開発し、そのプログラムを信濃川河口部（新潟西港）および小矢部川河口部（伏木港）に適用してその有効性を検討したものである。

2. 塩水楔の侵入と埋没機構の関係

流れによって土砂が流送される移動状態（運動形式）は掃流と浮遊に大別される。本研究では浮遊砂、掃流砂の埋没機構を塩水楔の侵入とからめて以下に示すように考えた。

塩水楔先端より上流側では、土砂は浮遊および掃流状態で流送される。浮遊砂は沈降により河床に達するが、流水の乱れが大きい場合は再浮遊し、下流に流送される。塩水楔の先端では河床に沿う流速がゼロとなるため掃流砂による輸送はここで停止し、掃流砂はこの付近に堆積する。塩水楔先端より下流では砂の運動形式は浮遊

のみとなる。上層（淡水層）を流送する土砂は、拡散および内部波の影響により混合し下層（塩水層）に取り込まれる。塩水層に取り込まれた土砂は内部波等の影響によりその一部が上層に戻ることも考えられるが、そのほとんどは沈降により河床に堆積する。この際塩水層ではフロキュレーションによりフロックが形成され沈降が助長されることも考えられる。後述する信濃川の観測結果を見ると浮遊砂の大半は塩水楔の先端より下流側で河床に堆積していると思われる。このことを考慮し塩水楔の先端より上流では浮遊砂による埋没は生じないものとした。図-1 に埋没機構を模式図にして示す。

ここに示した埋没機構を過去に観測されている信濃川の流軸に沿った河床材料の粒度分布より考察する。信濃川では水門操作により流量制御がなされており、旧信濃川（新潟西港）への流入量は、通常 $200 \sim 400 \text{ m}^3/\text{秒}$ であり、出水時でも $500 \sim 600 \text{ m}^3/\text{秒}$ である。観測によると $200 \sim 600 \text{ m}^3/\text{秒}$ の流量に応じて塩水楔の先端は河口部から約 2 km と 4 km の間を移動している。図-2 には河口より約 6 km までの河床材料の粒度を示す。この図より河口から 3 km までは粒径 0.1 mm 以下のものが多く、 4 km より上流では 0.1 mm 以上のものが大半を占めており、 3 km から 4 km の間で大きな変化があることがわかる。これは前述した塩水楔の先端位置の移動区間とほぼ一致するものである。この河床材料の流軸方向の変化からも塩水楔の先端付近で掃流による砂の移動がなくなり、それより河口側では粒径が小さいために

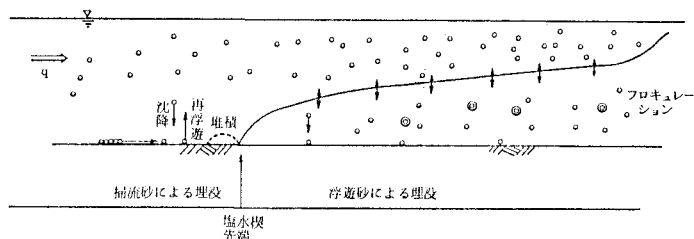


図-1

浮遊して流送された土砂による埋没が生じているものと推定され、上記の埋没機構の考え方の妥当性が証明される。

* 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所所長
** 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所調査課長
*** 正会員 運輸省港湾局計画課
**** 正会員 (株)ユニック 数値解析研究室

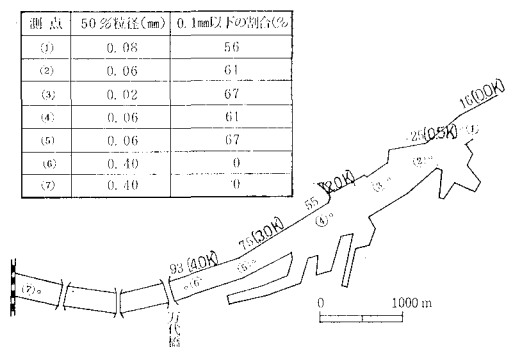


図-2 新潟県西港における河床材料の粒度

3. シミュレーションシステムの構成とシミュレーションモデル

埋没量分布予測システムの概要を図-3に示す。図中に示した1次元塩水楔解析結果は2次元塩水楔解析のための内部境界面の初期値として、また2次元定常流解析は1次元塩水楔解析の結果得られた内部境界面をあたかも河床とみなすことにより流況計算を行ない、2次元塩水楔解析のための上層流速の初期値として用いた。このようにすることによって2次元塩水楔解析の計算時間の短縮を図った。以下にシミュレーションモデルの基礎式を示す。ただしここでは初期値計算のための1次元塩水楔解析および2次元定常流解析モデルについては割愛した。なお数値計算手法には有限要素法を用いた。

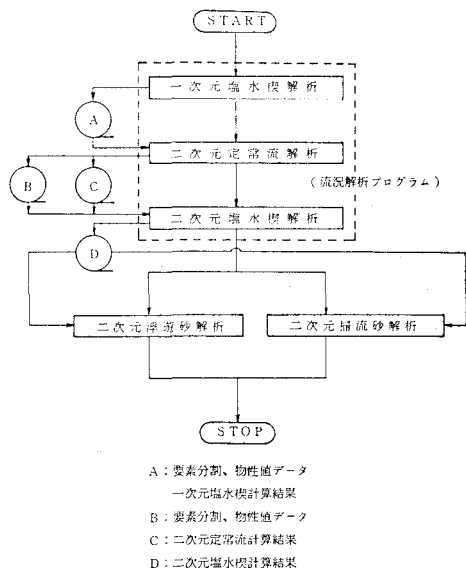


図-3

3.1 2次元塩水楔解析モデル

2次元塩水楔解析は塩水楔先端位置が収束するまで計算を行なっているため基礎式は以下に示す非定常二層流モデルとした。

$$\frac{\partial H_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(H_1 u_1) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 v_1) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{k}{H_1} |U_1 - U_2| (u_1 - u_2) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{k}{H_1} |U_1 - U_2| (v_1 - v_2) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(H_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial y}(H_2 v_2) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \\ = -\frac{1}{g} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \frac{\partial h_1}{\partial x} \\ + \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{k}{H_2} |U_1 - U_2| (u_1 - u_2) - \frac{g}{H_2 C_2^2} |U_2| u_2 \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \\ = -\frac{1}{g} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \frac{\partial h_1}{\partial y} \\ + \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{k}{H_2} |U_1 - U_2| (u_1 - u_2) - \frac{g}{H_2 C_2^2} |U_2| v_2 \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

式(1),(2),(3)は上層の連続および運動の式を示し、式(4),(5),(6)は下層の連続および運動の式を示す。式中に用いた記号は以下のとおりである。また下添字 1, 2 はそれぞれ上層, 下層を示す。

- u, v : 流速の x, y 成分
- η : 平均水面からの水位変動量
- h : 平均水面から境界面までの鉛直距離
- k : 抵抗係数
- H : 層厚
- U : 絶対流速 ($=\sqrt{u^2+v^2}$)

3.2 2次元浮遊砂解析モデル

2次元浮遊砂解析モデルは以下に示す二層定常モデルとした。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(u_1 H_1 C_1) + \frac{\partial}{\partial y}(v_1 H_1 C_1) \\ = k_x \frac{\partial}{\partial x} \left(H_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial}{\partial y} \left(H_1 \frac{\partial C_1}{\partial y} \right) \\ - A_x (C_1 - C_2) \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(u_2 H_2 C_2) + \frac{\partial}{\partial y}(v_2 H_2 C_2) - W C_2 \\ = k_x \frac{\partial}{\partial x} \left(H_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial}{\partial y} \left(H_2 \frac{\partial C_2}{\partial y} \right) \\ + A_x (C_1 - C_2) \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

式(7)は上層の拡散式を示し、式(8)は下層の拡散式

を示す。式中に新たに出てきた記号について以下に示す。また添字 1, 2 はそれぞれ上, 下層を示す。

- C : 浮遊砂濃度
 k_x, k_y : それぞれ x, y 方向拡散係数
 A_z : 上下層間の交換係数
 W : 浮遊砂の沈降速度

3.3 2次元掃流砂解析モデル

2次元掃流砂解析モデルは以下に示す掃流砂の連続の式とした。

$$(1-\varepsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに

- φ : 地形変動量
 ε : 空隙率
 q_x, q_y : それぞれ x, y 方向の掃流砂量

4. 2次元塩水遡上の検証

埋没計算を行なうにあたってはまえもって2次元塩水遡上計算を行なう。ここでは塩水楔の観測資料が整っている新潟西港(信濃川河口)を対象として2次元塩水遡上計算の検証について示す。

信濃川下流整備計画の一環として昭和50年, 51年に流況, 水質, 塩水遡上, 含泥量について調査¹⁾が行われた。これらの観測資料から昭和50年11月10日の資料を塩水楔の検証計算の対象とした。河川流量(上流端境界条件)は449.1 m³/秒, 西港潮位(下流端境界条件)はT.P.+0.47 mである。なお上層の密度はそれぞれ0.9978 g/cm³, 1.0102 g/cm³とした。下流端ではStommelが示した内部フルート数が1となる水理条件も用いている。抵抗係数の値は過去の観測²⁾を参考にして k

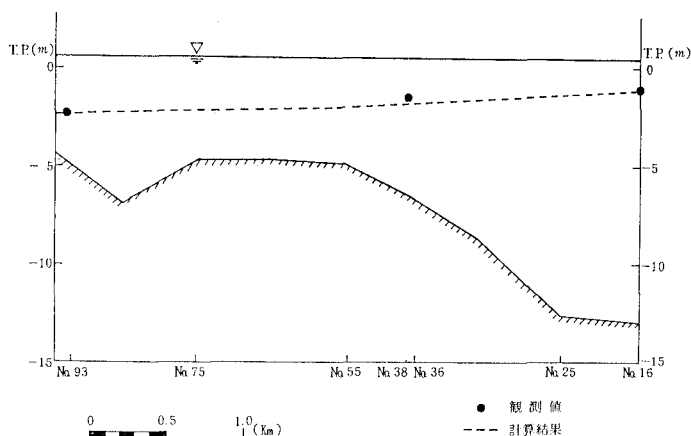


図-4 塩水境界の縦断変化(信濃川)

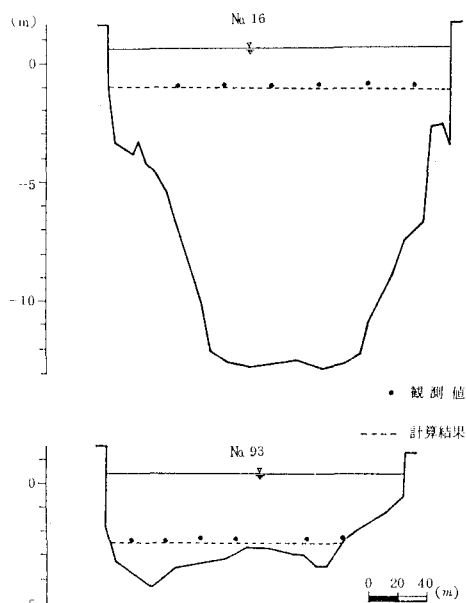


図-5 塩水境界の横断変化(信濃川)

$= 1.752 \times \theta^{0.699}$ (θ : クーリガン数)とした。図-4には流心部における塩水境界の縦断方向の変化を観測値と計算値を比較して示す。図-5には代表的な測点における塩水境界の横断分布について両者を比較して示す。なお、観測では電気伝導度が測点されておりその鉛直分布より20000 $\mu\text{V}/\text{cm}$ を塩水境界とした。これらの結果より本手法で用いた2次元塩水楔解析モデルは十分に現象を再現しえるモデルと言える。

5. 埋没量分布予測手法の伏木港への適用

伏木港に流入する小矢部川においては河川流量と浮遊物を関係づけると年間の浮遊物の総計は約4万m³となる。空隙率を0.6としこの浮遊物がすべて港内に埋没したとすると約10万m³となる。一方最近10か年の伏木港の埋没実績を見ると平均約25万m³程度であり、浮遊物のみではこの埋没は説明しきれない。そこで浮遊砂, 掃流砂双方を考慮に入れた本システムを以下の手順で適用した。

- ① 昭和 52～56 年の 5 か年の河川流量記録を用いて河川流量を表-1 のようにランクわけする。
- ② ランクわけされた各河川流量について 2 次元塩水楔計算を行なう。伏木港の水深および要素分割図を

表-1 小矢部川の流量ランク

ランク番号	河川流量 (m ³ /s)	代表流量 (m ³ /s)	出現頻度 (hour)
1	0～20	10	134.0
2	20～40	30	2 763.8
3	40～60	50	3 043.0
4	60～80	70	1 427.0
5	80～100	90	560.8
6	100～120	110	285.4
7	120～140	130	186.8
8	140～160	150	108.2
9	160～180	170	71.6
10	180～200	190	51.6
11	200～250	225	60.6
12	250～300	275	25.4
13	300～350	325	15.4
14	350～400	375	8.0
15	400～500	450	13.0
16	500～600	550	5.4
17	600～700	650	2.4
18	700～800	750	1.2
19	800～	1 000	1.2

表-2 計算条件

計算条件	諸 元
河口部水位	0.2 m (年平均)
抵抗係数	$0.1 \times \theta^{-0.5}$ (θ : クーリガン数)
粗度係数	0.03
上層密度	0.9987 g/cm ³
下層密度	1.0102 g/cm ³
土粒子の比重	2.582
拡散係数	5.0×10^5 cm ² /sec
交換係数	1.0×10^{-2}

図-6 に、計算条件を一括して表-2 に示す。なお抵抗係数は小矢部川の観測結果³⁾より決定した。塩水境界面の計算結果の一例を図-7 に示す。

- ③ 流量ランクごとに計算された塩水楔計算結果を用いて浮遊砂による埋没計算を行なう。代表粒径は表-3 のように 5 粒径とし、沈降速度は Rubey の式より求めた。

流量に浮遊物の相関は、観測より以下のようにした。

$$100 \text{ m}^3/\text{秒 以下} \quad SS=0.09293Q^{1.24671}$$

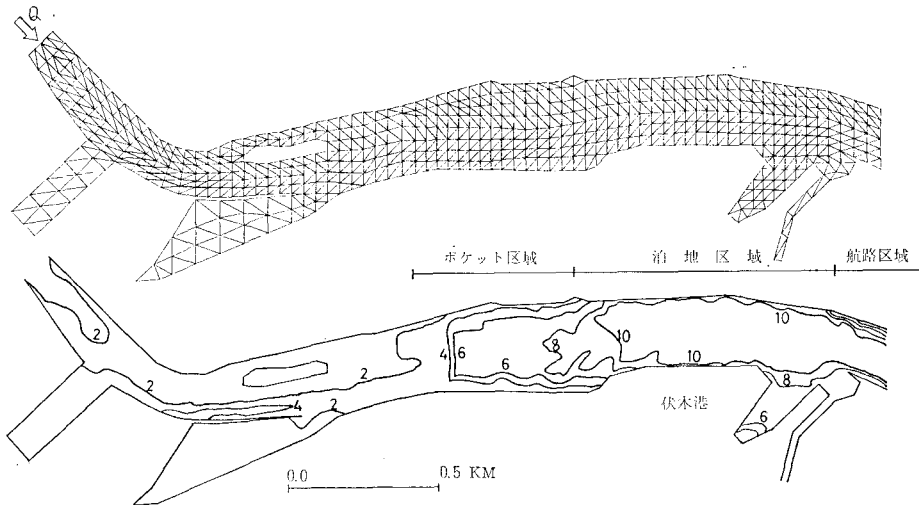


図-6 伏木港の水深および要素分割図

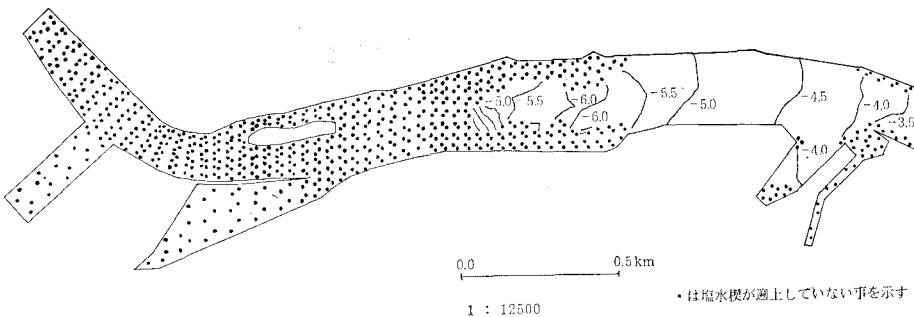


図-7 塩水境界面の計算結果 (河川流量 450 m³/秒)

表-3 代表粒径と沈降速度

代表値 (%)	重量百分率 (%)	粒 径 (mm)	沈降速度 (cm/sec)
10	20	0.015	0.02
30	20	0.120	0.95
50	20	0.270	3.24
70	20	0.520	6.07
90	20	1.300	11.06

100 m³/秒 以上 SS=0.00059Q^{2.35899}

- ④ 流量ランクごとに計算された塩水楔計算結果を用いて掃流砂による埋没計算を行なう。掃流砂公式にはブラウンの式を用いた。代表粒径は 50% 通過粒径 0.27 mm の単一粒径とした。
- ⑤ 流量ランクごとに計算された浮遊砂、掃流砂による埋没量とその河川流量の出現頻度を用いて年間の埋没土量の算定を行なう。

図-8 には上記の方法で得られた埋没量の計算結果と昭和 52 年から昭和 56 年の 5 か年の埋没実績とを比較して示す。この結果より浮遊砂あるいは掃流砂単独では部分的にしか実績を再現できず両者を合計することにより

総埋没量ばかりでなく、その分布状況もきわめてよく再現できた。とくに水深急変が見られるポケット区域では掃流砂による埋没が卓越し、泊地区域では浮遊砂による埋没が卓越していることがわかる。

6. 結 語

浮遊砂のみでは、港内埋没が説明しきれないと考えられる地点を対象として、浮遊砂、掃流砂双方を考慮に入れた港内埋没量分布予測手法を開発し、伏木港に適用し、埋没量ばかりでなく、その分布状況についてもきわめてよく再現することができた。以上より本シミュレーション手法は河口港埋没分布を予測する上で有効な手法と考えられる。

参 考 文 献

1) 運輸省第一港湾建設局：信濃川下流整備計画流況水質調査報告書，pp. 25～27，1976。

2) 建設省北陸地方建設局：信濃川下流塩水遡上解析報告書，p. 39，1973。

3) 金子安雄：2層境界面抵抗係数の一例，第 13 回海岸工学講演会講演集，pp. 283～287，1966。

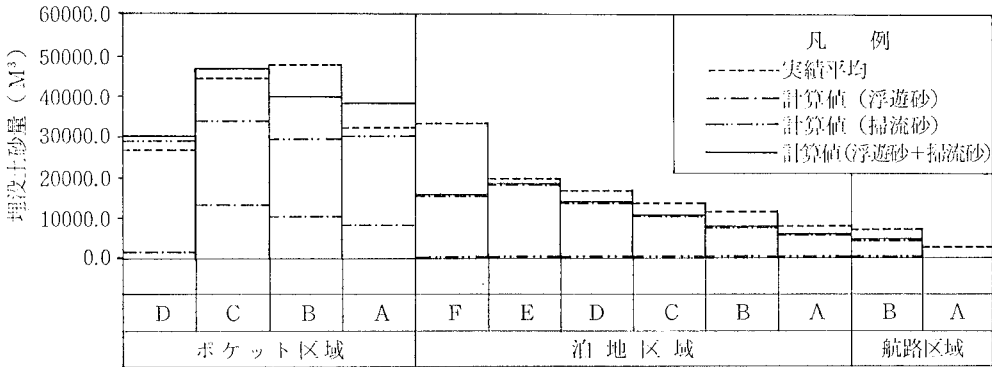


図-8 埋没土量計算結果の検証