河口土砂流検討に平面2次元移動床解析モデル-NKhydro2Dの適用

APPLICATION OF DEPTH-INTEGRATED MODEL-NKhydro2D TO THE EVALUATION OF BED DEFORMATION IN RIVER ESTUARY

金 海生* · 千田健一** · 佐々木成人** · 山田裕康*** Haisheng JIN, Kenichi CHIDA, Shigeto SASAKI and Hiroyasu YAMADA

A method using the NKhydro2D model for predicting flow and sediment transport in river estuaries is reported in the paper. The model solves the depth-integrated 2D Reynolds' equations which are based on orthogonal curvilinear coordinate system. Both bed load and suspended load transport are taken into account in bed deformation. The method was applied to simulate the flow and sediment transport in a river estuary. The computational results of water surface level, flow velocity, bed deformation, and sediment transport volume are compared with the measured data during a flood. It shows that the method predicted very well the flow and sediment transport in the river estuary. It is anticipated that the method can be applied to issues such as sediment control and training works in river estuaries.

Key Words : Bed deformation, bed load, suspended sediment, sediment transport volume, velocity, river estuary, NKhydro2D model, boundary-fitted coordinates

1. はじめに

国土資産の大半が河川下流の沖積平野に集中している日本では、河口部における洪水疎通能力の確保が治水上極めて重要である。一般的に、浚渫などを行っても、時間の経 過とともに土砂堆積が生じ、洪水流下能力を確保できない 場合が多い。安全性の高い河口計画を行うためには河口部 地形変化の予測技術の確立が強く求められている。

河川流が卓越する河口部の河床変動に関しては、近年、 理論的・実験的な研究により、浮遊砂が支配的な場合、流 軸では侵食、両側に自然堤防のような堆積が生じ、鳥趾状 デルタに近い堆積形状が発達することが示されている。浮 遊砂の濃度と、流速の流下方向への逓減の仕方によって河 口から遠い領域での流軸上の堆積形状が決定される。浮遊 砂の移流拡散の影響が小さく浮遊砂濃度の逓減が流速より 速いとき、河口から遠い領域でも侵食傾向となるが、流速 の逓減が浮遊砂濃度より速いとき、河口から遠い領域では 流軸上に浮遊砂の堆積が生じることになる。一方、掃流砂 が優勢のとき、流軸上に堆積そしてその両側に侵食が生じ、 円弧状のデルタが形成される¹⁾。

したがって、河口付近の河床高・河道断面形は、河口砂 州の延伸、漂砂、河川上流から運ばれた土砂の堆積を含む 堆積過程と、常時の流れによる侵食、洪水時河口フラッシ ユを含む侵食過程、のバランスの上に成り立っている。河 口工事、例えば、導流堤の建設などによりこのバランスが 崩れ、堆積が優勢となった場合、河床上昇により洪水流下 断面が不足し、計画高水以下の流量を安全に流下できず、 出水時に河川水位が計画高水位を超える可能性がある。逆 に、洪水時河床低下により導流堤付近の河床が異常に侵食 された場合は、導流堤の構造物としての安定性が失われる 可能性がある。

留萌川は、留萌港内に流入しており、河口から流出した 土砂が港内に堆積するため、留萌港内の泊地で航路の水深 確保を目的として維持浚渫が行われているが、導流堤の建 設(移設)により、港内への留萌川河口流出土砂の量・堆 積分布が変化すると予想される。この変化を把握する必要 がある。

本研究では、境界適合直交曲線座標系に基づいた水深積 分の平面2次元移動床水理解析モデル-NKhydro2Dモデル²⁾ により留萌川河口部のフラッシュシミュレーションを実施 し、洪水期河口の流れ、掃流・浮遊土砂輸送および河床変 動の評価を行った。ここに、実績洪水データを用いたモデ ルの検証結果を報告する。

2. 水深平均の2次元移動床水理解析モデル

水理解析においてはできるだけ実河川に近い河道条件(平 面形状、抵抗など)を与えるのがベストである。そこで、境 界適合型の直交曲線メッシュをベースにした移動床水理解析 モデル-NKhydro2Dを適用し、流れおよび流送土砂の量・侵 食/堆積分布がどのように変化するかを解明することとした。

^{*} 中央研究所総合技術開発部

^{**} 札幌支店 技術部

^{***} 福岡支店 技術部

(1) 直交曲線座標系における流れの基礎式

水深平均のReynolds方程式を直交曲線座標系(ξ , η)に変 換すると(1)~(3)式になる。流れの支配方程式には植 生などの影響を考慮する。高木などによる抗力の影響につ いては運動量保存式 $(2) \sim (3)$ の C_{Dm} 項を参照されたい。 その他の植生の影響は植生の種類、密生度などの特性に応 じてマニング粗度係数に考慮する。

<水の質量連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial (u^*hg_{22})}{\partial \xi} + \frac{\partial (v^*hg_{11})}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

<流れの運動量方程式>

$$\frac{\partial(hu^{*})}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^{*2})}{\partial\xi} + \frac{\partial(g_{11}hu^{*}v^{*})}{\partial\eta} + h(u^{*}v^{*}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta} - v^{*2}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi}) \right] = -\frac{hg}{g_{11}}\frac{\partial\zeta}{\partial\xi} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(hg_{22}\sigma_{1}^{*})}{\partial\xi} + \frac{\partial(hg_{11}\tau_{21}^{*})}{\partial\eta} + h(\tau_{12}^{*}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta} - \sigma_{2}^{*}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi}) \right] - \frac{\tau_{b\xi}}{\rho} - \frac{1}{2}C_{Dm}a_{v}hu^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}}$$

$$(2)$$

$$\frac{\partial(hv^{*})}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(g_{22}hu^{*}v^{*})}{\partial\xi} + \frac{\partial(g_{11}hv^{*2})}{\partial\eta} + h(u^{*}v^{*}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi} - u^{*2}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta})\right] = -\frac{hg}{g_{22}}\frac{\partial\zeta}{\partial\eta} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial(hg_{22}\tau_{12}^{*})}{\partial\xi} + \frac{\partial(hg_{11}\sigma_{2}^{*})}{\partial\eta} + h(\tau_{21}^{*}\frac{\partial g_{22}}{\partial\xi} - \sigma_{1}^{*}\frac{\partial g_{11}}{\partial\eta})\right] - \frac{\tau_{b\eta}}{\rho} - \frac{1}{2}C_{Dm}a_{v}hv^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}}$$
(3)

ここに、
$$u^*$$
 : ξ 方向の流速 $\left(=\frac{ux_{\xi}+vy_{\xi}}{g_{11}}\right)$
 v^* : η 方向の流速 $\left(=\frac{ux_{\eta}+vy_{\eta}}{g_{22}}\right)$
 u : デカルト座標系における x 方向の流速
 v : デカルト座標系における y 方向の流速
 h : 水深 $(=\zeta-Z_b)$

ζ, Z_b:水位および河床高(解析格子点におけ る河床高は、対象区間の横断測量成果 を内挿して与える) * * *

$$\sigma_1^{,}, \sigma_2^{,}, \tau_{12}^{,}, \tau_{21}^{,}$$
:水深平均Reynolds応力⁴⁾

$$\sigma_{1}^{*} = 2\nu_{t} \left[\frac{1}{g_{11}} \frac{\partial u^{*}}{\partial \xi} + \frac{v^{*}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} \right]$$

$$\sigma_{2}^{*} = 2\nu_{t} \left[\frac{1}{g_{22}} \frac{\partial v^{*}}{\partial \eta} + \frac{u^{*}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \right]$$

$$\tau_{12}^{*} = \tau_{21}^{*} = \nu_{t} \left[\frac{1}{g_{11}} \frac{\partial v^{*}}{\partial \xi} + \frac{1}{g_{22}} \frac{\partial u^{*}}{\partial \eta} - \frac{u^{*}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{v^{*}}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} \right]$$

$$v_{t} = \alpha u_{*}h : 渦 (有効) 粘性係数$$

$$u_{*} = \sqrt{\frac{\tau_{b}}{\rho}} : 摩擦速度$$

$$\tau_{b} : 底面せん断力$$

$$\tau_{b\xi} : \xi 方向の底面せん断力$$

$$\left(= \frac{n^{2}\rho g}{h^{1/3}}u^{*}\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \right)$$

$$\tau_{b\eta} : \eta f concent concen$$

 C_{Dm} : 植生(高木などによる)の抗力係数

ン

- a_{v} :植生による単位体積あたりの遮蔽面積
- ξ,η :直交曲線座標
- x, y :デカルト座標
- 811,822 : 座標変換における係数⁵⁾

$$(g_{11} = \sqrt{x_{\xi}^{2} + y_{\xi}^{2}}, g_{22} = \sqrt{x_{\eta}^{2} + y_{\eta}^{2}})$$
$$(x_{\xi} = \frac{\partial x}{\partial \xi}, x_{\eta} = \frac{\partial x}{\partial \eta}, y_{\xi} = \frac{\partial y}{\partial \xi}, y_{\eta} = \frac{\partial y}{\partial \eta})$$

(2) 河床変動に関する支配方程式

河床変動は流砂輸送によるものである。河床高の時間的 な変化は次の流砂の連続式を用いて表される。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda} \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (g_{22}q_{s\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (g_{11}q_{s\eta}) \right] = 0 \quad (4)$$

ここに、 Z_b は河床高、 λ は河床材料の空隙率(砂の粒 径、形状などに依存する)、 $q_{s\xi}, q_{s\eta}$ はそれぞれ ξ, η 方向の 単位幅、単位時間あたりの体積流砂量である。本検討では、 砂の浮遊輸送も考慮し、流砂量を掃流砂輸送量 qb と浮遊砂 輸送量 q_{ss} からなることとする。混合砂の場合、それぞれの 粒径階の流砂量を求め、その合計を流砂量とする。

掃流砂輸送量 qb およびその輸送方向は、局所的な河床勾 配および流線湾曲による二次流の影響を考慮し、芦田・道 上式に準じて求める⁶⁾。この流砂量式は有効掃流力を考慮 して掃流砂量を推算することとしている。

浮遊砂輸送量 q_{ss} は浮遊砂濃度と流速の水深積分からな る。図-1は、流速および浮遊砂濃度の鉛直方向分布の概 念図である。浮遊砂の場合、河床変動は沈降量と巻き上げ 量の差によって発生する。流れが速く巻き上げが優勢のと き、河床侵食が生じ、逆に沈降が支配的なとき、堆積が生 じる。巻き上げられた浮遊砂は移流と拡散によって横断方 向に広がる。水深平均の浮遊砂濃度は式(5)の浮遊砂質量 保存式(移流拡散式)で解析することができる。



$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial (g_{22}hu^*C)}{\partial \xi} + \frac{\partial (g_{11}hv^*C)}{\partial \eta} \right]$$
$$= \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{g_{22}}{g_{11}} hD_C \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{g_{11}}{g_{22}} hD_C \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \right]$$
$$+ \left(\not\cong \bot q_{su} - \dot{\chi} \not\bowtie \omega_k C_b \right) \Big|_{herd}$$
(5)

ここに、Cは水深平均、 C_b は河床近傍の浮遊砂体積濃 度、 q_{su} は河床面から砂粒子の巻き上げによる浮上量、 ω_k は粒径 d_k の砂の沈降速度、 D_C は拡散係数($D_C = v_t/\sigma_t$)、 σ_t (≈ 0.9)は乱流拡散Schmidt/Prandtl数である。混合砂の場 合、それぞれの粒径階に対して、式(5)を用いて、浮遊砂 濃度を解析する。 ω_k はvan Rijnの式⁷⁾を用いる。

$$\omega_{k} = \begin{cases} \frac{1}{18} \frac{(s-1)gd_{k}^{2}}{v}, & d_{k} < 0.1mm \\ 10 \frac{v}{d_{k}} \left\{ \left[1 + \frac{0.01(s-1)gd_{k}^{3}}{v^{2}} \right]^{0.5} - 1 \right\}, 0.1 \le d_{k} < 1.0mm & (6) \\ 1.1[(s-1)gd_{k}]^{0.5}, & d_{k} \ge 1.0mm \end{cases}$$

ここで、 $s = \rho_s / \rho = 2.65$ 、 ρ_s は砂の密度、vは水の動粘 性係数である。

単位幅、単位時間あたりの浮遊砂輸送量 q_{ss} は浮遊砂濃度 流速の水深積分からなる。

$$q_{ss\xi} = \int_{Z_{Cb}}^{\zeta} u^*(z)C(z)dz \quad \forall \quad q_{ss\eta} = \int_{Z_{Cb}}^{\zeta} v^*(z)C(z)dz$$

ここに、 Z_{Cb} は浮遊砂濃度の基準点とされる河床面からの 高さであり、 Z_{Cb} の取り方により濃度分布が若干異なってく る。その結果、浮遊砂量の算定は、濃度基準点 Z_{Cb} の値とそ の点の濃度 C_b の算定問題に帰着する。一般的に、 Z_{Cb} の値 は水深hの5%(Z_{Cb} =0.05h)が採用されている。

河床面から砂の浮上量 *q*_{su}の計算としては、いくつかの経 験式が提案されている。河床が平衡状態にあるとき、河床の 単位面積から単位時間に巻き上げる粒子群の体積 q_{su} (単位:m³/m²·s)は、単位面積当たり単位時間に河床へ沈降する粒子群の体積 $\omega_k C_{beq}$ に等しいため、 $q_{su} = \omega_k C_{beq}$ が成り立つ。 C_{beq} は基準点 Z_{Cb} での理論的な平衡濃度であり、経験式によって計算することとなる。例えば、本研究では、板倉・岸の式により計算する⁸⁾。なお、係数Kを0.0018とした。河床近傍の実際の浮遊砂濃度 C_b は下記式で求める。

$$C_b = f(C) \cong \frac{\beta_C}{1 - e^{-\beta_C}} C \ , \ \beta_C = \frac{\omega_k h}{\varepsilon}$$

ここで、 ε は水深平均の拡散係数であり、Prandtl理論によ れば $\varepsilon = \frac{\kappa}{6} hu_*$ である。 u_* :摩擦速度、 κ :von Karman定数 単位面積あたり単位時間の砂の浮遊運動による河床変動 計算においては以下の式が成り立つ。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} \Big|_{\phi o \not = \# a \equiv b} |_{b = b} = (沈降による河床上昇) - (浮上に)$$

よる河床低下) =
$$\frac{1}{1-\lambda}(\omega_k C_b - q_{su})$$
 (7)

したがって、掃流砂とともに浮遊輸送が存在する場合の河 床変動に関する支配方程式は式(8)に変更することができる。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda} \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (g_{22}q_{b\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (g_{11}q_{b\eta}) \right]$$
(8)
$$= -\frac{1}{1 - \lambda} (q_{su} - \omega_k C_b)$$

上記は均一砂をベースに導いた式ではあるが、混合砂の 場合も似たような方法をとることが一般的である。

混合砂礫を対象とする場合は、交換層における粒径階*d*_kの含有率 *p*_{bk}を当粒径階の砂礫の質量保存則により求める。

(3) 初期条件および境界条件

解析開始時、各計算点における水位(水深)、流速および 浮遊砂濃度(通常、初期0とすることが可能)を仮定し、下 流端において計算開始時の水位、上流端において計算開始 時の流量、浮遊砂濃度を与えて解析を実施し、各計算点の 水位、流速および浮遊砂濃度が一定値に収束した状態を初 期条件とする。また、各計算点において、初期河床高およ び粒度分布を初期条件として与える。

境界条件としては、上流端において流量時系列および浮 遊砂濃度、下流端において水位時系列を与える。境界での 混合粒径ごとの掃流砂量は掃流力の計算値より求めた平衡 掃流砂量を粒度分布にあわせて与える。

(4) 解析スキーム

流速と水位、河床高、浮遊砂濃度変数をスタッガード格 子上に配列し、有限体積法に基づいて解析を行う。空間微 分項の離散では、移流項、レイノルズ応力項にPower Law スキーム⁹⁾を、その他の項に中心差分を適用する。時間微 分項には、陰形式のスキームを用いる。

計算の手順としては以下のとおりである。

- 運動量式(2)、(3)と水の連続式(1)を結合することにより水位を求める。
- 水位の計算結果をもとに運動量式(2)、(3)により流 速の解析を実施する。
- ③上記水理量をベースに浮遊砂の巻上げ量を求める。
- ④ 浮遊砂の移流拡散式(5)により浮遊砂濃度を計算する。
- ⑤ 水理量をベースに掃流砂量を算出する。
- ⑥河床材料の連続式(4)または(8)により河床高変化 を求める。
- ⑦ 各粒径階 d_kの質量保存則によりその含有率 P_{bk}の変化 を計算する。
- 以上の手順を繰り返して解析を進める。

3. 留萌川河口への適用

前記平面2次元移動床解析モデル-NKhydro2Dを用いて、 留萌川の河道を含む河口域流れおよび河床変動のシミュレ ーションを実施した。ここに、近年最大洪水の実績データ に基いたモデル検証結果を報告する。

昭和63年8月、留萌川流域において大きな出水があった。 KP2.8に位置する留萌河口観測所におけるピーク流量は 880m³/s、ピーク水位は6.0mであった。この洪水のピーク後 4時間ごろ、航空撮影により流速観測が行われた¹⁰⁾。そこ で、この洪水の観測データおよび既往調査の流砂量結果に 基づき、解析モデルの再現性を検証する。

解析領域は、河道部KP5.0の大和田橋を上流端とし、下流 は海域の防波堤範囲とした。河岸境界および防波堤など構 造物に合った境界適合型直交曲線メッシュの一部を図-2 に示す。メッシュサイズは横断方向に最小約2m、縦断方向 に最小約5mで、総メッシュ数は約10,000である。

検証計算用の河床高および河床材料について、洪水前の 実測データが必要となるが、このようなデータは存在して いなかった。したがって、昭和63年洪水に最も近い時期に 調査したデータを用いることとした。すなわち、河床高は、 河道部に昭和63年12月横断測量データ(洪水後)、海域部に 昭和58年8月留萌港深浅測量図を用い、欠測部分を平成6年9 月深浅図と昭和61年3月留萌港港湾計画図で補完した。河床 材料は、河道部に平成8年度河床材料調査データ¹¹⁾、海域 部に平成6年度漂砂調査データ(図-3)を用い、11分級の 混合砂として扱った。河道の下流および河口部の河床材料 に細粒分が多いことが判る。

洪水当時の河口観測所断面の流量ハイドロと留萌港の潮 位観測データ(図-4)をそれぞれ上、下流の流れの境界条 件とした。流砂量条件については、上流端平衡給砂とした。 (1) 水位の検証

河口観測所断面における水位の計算結果(実線)と実測 値(三角)を図-5に示す。計算の流量(破線)も示して いる。

河口観測所断面において、洪水ピーク時の実測水位は 6.0m、最大水深は約7.33mであった。本再現計算では実際 に発生した下流市街地の氾濫が考慮されていないため、計 算のピーク水位は若干高くなっている。しかし、計算のピ ーク水位は6.09m、最大水深は7.42mで、最大水深の相対誤 差は1.2%(=水位差/水深×100%)である。

一方、中低水流量時の計算水位は実測値より若干低くな っている。原因は以下のように推測される。

- a)用いた河道の河床地形データは昭和63年洪水後の測量 データに基づいたため、洪水期河床侵食の影響がまだ 残っており、その影響が中低水流量時のほうで大きか った。
- b)実際の河道では中低水流量時に河床波が発達していた 可能性があるため、河床波による付加抵抗が生じ、今 回の解析で見積もった抵抗(洪水中に一定とした)よ り大きくなり、水位が計算値より若干高くなった。
- c)計算では河口観測所流量を使用している。河口観測所 が河口から約3kmに位置するため、それより下流区間 の流入が河川の水位に影響していた。その影響は、堤 内地盤高より低い水位の中規模流量時に比較的に大き かった。一方、洪水ピーク前後では、河川水位が高く、 区間の流入が少なく、また、一部の地域では氾濫が起 こったため、計算水位が観測値より約0.1mほど高くな った。
- d) 減水時における河口観測所流量(急激に下がる)と水位 (緩やかに下がる)の変化特徴から、以下のことが考え られる。①洪水ピーク後、下流市街地に氾濫で溢れた水 の一部が河川へ還流したことにより、下流河川の水位が 上昇し、河口観測所断面の水位に影響したこと。②氾濫 を無視して、洪水が河川に集中して流れる条件で解析し たため、洪水ピーク前後の河床侵食が若干大きめに見積 もられ、洪水後の計算水位が低くなった。

以上の考察から、初期河床、河床波に伴う粗度評価、残 流域の氾濫を含む流出入などの条件をより正確に計算に反 映できたならば、計算水位は、中低水流量時も含めて実績 水位により良く整合させることができたと考える。すなわ ち、NKhydro2Dモデルは留萌川の実績洪水水位を十分に再 現し得たと判断する。



図-2 境界適合直交曲線メッシュの一部

(2) 流速の検証

図-6に航空写真撮影で測った洪水ピーク後4時間ごろの 平均流速ベクトルおよび流速コンターを示す。また、洪水 ピークから約4時間後の河口部航空写真を図-7に示す。 図-7の赤い矢印は洪水の主流部イメージであり、西と外 北防波堤間の主流が西寄りになっていたことを示している が、東寄りの分岐も無視できないようである。

航空写真調査により、河口から留萌港範囲の洪水流(流 速、流向)について下記のような特徴が判明した。

- a) 流向は、河口から西防波堤、外北防波堤の間に向う流 れが主流である。
- b) 導流堤を越流した流れは、古丹浜防波堤の開口部を経

て外港に至る。

- c) 南防波堤と北防波堤の間になる外港出口は複雑な流れ となっている。
- d)流速は、河道部で約5m/sだが導流堤部で約3m/sに減少している(横越流の影響)。河口部では、水面の急降下とともに流れが加速流となり、流速が約4m/sに加速し、流下とともに減速して沖合700~800mで1m/sとなる。
- e) 導流堤部で河道流の主流は導流堤寄りに流れている。
- f)港内の流向は、風向、波向により変化するが、大まか にみると右回りの環流を形成している。これは、南防 波堤と西防波堤の開口部からの流入と港内の地形の影





響によるものと考えられる。

図-8、9に洪水ピーク4時間後の流速ベクトルおよび流 速コンターの計算結果を示す。図-8、9に示す通り、導流 堤部で河道流の主流は導流堤寄りに流れ、洪水ピーク時導 流堤に発生した横越流は、古丹浜防波堤の開口部を経て外 港に至り、河口から流れる主流と合流する。河道部で約 5m/sあった流速は導流堤部で約3m/sに減少し(横越流の影 響)、一方、河口部で水面の急降下とともに流れが加速流と なり、出口直後に流速が約4m/sに達する。その後、主流は 減速しながら、河口から西防波堤、北外防波堤の間に向う。 港内の流向は、右回りの環流を呈している。これらの特徴 は図-6、7の洪水時航空写真撮影結果(上記a~fにまとめ ている)とよく一致している。

(3) 河床変動および浮遊砂濃度の検証

図-10に、洪水期間中の河床高変動量計算結果を示す。 河床変動は河口幅の数倍程度の範囲に集中的に起こってい ることが判る。洪水期間中、河口部においては河床が約1m 程度、局所的に2mほど(河口KP-0.6~KP-0.4前後の左岸側 導流堤沿いに)侵食された。河口フロントでは、洪水流心 部に1mほどの侵食、その両側に0.5mほどの堆積が生じた。 上流から流送された土砂および河口から洗掘された土砂が 河口沖合に最大約4m堆積した。留萌港内その他領域には堆 積が小さかった。この結果は定性的に泉ら¹⁾の研究成果



(文献1の図-11、12) と一致している。

図ー11に、昭和58年と平成6年の深浅測量データを基に 作成した河床高変化のコンターを示す。その間、昭和63年8 月に大出水があった。図ー10、11からは、流軸での侵食、 流軸横での堆積および河口沖合での堆積の解析結果と実測 結果が定性的によく一致していることが判る。

図-12に洪水ピーク4時間後の浮遊砂SS濃度の計算結果 を示す。図-7に貯木場と河口フロントからの赤い矢印に沿 った明るい部分は濁り洪水流の主流部(すなわち土砂濃度 の高い領域)であったことが推測される。図-12は上記範 囲でSS濃度の高いことを示している。したがって、図-7と 比較すれば、SS濃度分布の計算結果からもNKhydro2Dモデ ルは昭和63年8月洪水を良好に再現していることが判る。



図-7 洪水ピーク4時間後の航空写真(赤い矢印は主流部)



図-8 洪水ピーク4時間後河口部流速ベクトルの計算結果



図-9 洪水ピーク4時間後河口部流速コンターの計算結果



図-10 洪水期間中の河床高変動量の計算結果(マイナス コンター=河床侵食、プラスコンター=河床堆積)



図ー11 昭和58年から平成6年までの河床高変化の測量結 果(平成6年河床高一昭和58年。マイナス=河床 侵食、プラス=堆積)

(4) 流砂量の検証

対象洪水期間中に河口観測所断面(KP2.8)と河口断面 (KP-0.2)を通過する土砂量の計算結果をそれぞれ図-13、 14に示す。表-1はその数値である。

一方、昭和50年代からの現地調査によれば、留萌川の流



図-12 洪水ピーク4時間後浮遊砂SS濃度の計算結果

砂輸送には以下の特徴がある。

- a) 全流砂量の内、浮遊砂量が掃流砂量より圧倒的に多い。
- b)河川整備前の年平均流砂量(河口から南防波堤の北側 末端に至る範囲の堆砂量ベース変換値)実績は約59千 m³であった。

図-13、14および表-1によれば、空隙率を仮に0.4とした場合、洪水期間中に河口観測所断面を通過する土砂総量の計算結果は約145.8千m³であり、そのうち浮遊砂が約98% 占めて圧倒的に多い。河口断面の通過土砂量は208千m³であるが、そのうち、約半分以上の106.8千m³が粒径0.04mm 以下の極端に細かい粘土質のもので、河口部に堆積の多い シルトより粗い砂分が約101.2千m³である。

粒径の細かいシルト質の土砂は一般に浮遊を続けながら 港外を目指して拡散する。図-12のSS濃度分布の計算結果 がそのような拡散を再現している。実測堆砂量調査領域内 の堆砂量の解析結果(堆砂量ベース)は109千m³である。

計算の港内堆砂量(一洪水に対する)109千m³を直接比 較する現地データはないが、実測の年平均堆砂量59千m³と 比較した時、計算対象の洪水規模からして計算値が約2倍の 量となったことは十分に納得できる。





図-13 洪水期間中河口観測所断面を通過する土砂量 (空隙率無視。縦軸:左側=掃流砂、浮遊砂の粗い分、右側= 細かい浮遊砂、シルト)



図-14 洪水期間中河口断面を通過する土砂量 (空隙率無視。縦軸:左側=掃流砂、浮遊砂の粗い分、右側= 細かい浮遊砂、シルト)

	_					
断面	掃流砂	粗い浮遊砂	細かい浮遊砂	シルト	極端に細かい浮	445-122
	(Bed	(Coarser SS)	(Final Sand)	(Silt)	遊砂(Clay,etc.)	砂量
	Load)	d>0.25mm	d=0.075-0.25mm	d=0.04-0.075mm	d<0.040mm	
河口観測	2.0	0.17	8.6	24.1	52.6	87.5
所 KP28	(3.3)	(0.28)	(14.3)	(40.2)	(87.7)	(145.8)
河口	0.85	0.4	23.0	36.5	64.1	124.8
KP-0.2	(1.4)	(0.67)	(38.3)	(60.8)	(106.8)	(208.0)

表-1 洪水期間中の通過土砂量(単位:1,000m³)

注:括弧内は空隙率を仮に 0.4 として算出した土砂量である

4. おわりに

境界適合直交曲線座標系に基づいた水深積分の平面2次元 移動床水理解析モデル-NKhydro2Dモデルを留萌川河道お よび河口部に適用した。近年最大洪水の実績データを対象 にしてモデルの検証を行った結果、NKhydro2Dモデルは留 萌川河口の流れおよび土砂移動を良好に再現することが判 り、以下の結論を得た。

- a) 洪水期間中の河口観測所断面で水位の時間変化および 洪水ピーク前後に導流堤部での急な水面勾配変化を高 精度に再現した。
- b)河道内導流堤部の減速流、河口部の加速流、導流堤の 横越流などを合理的に再現した。
- c) 洪水流の主流部位置およびその流向、留萌港内全域に 発生する右回りの環流などを良好に再現した。

- d) 浮遊砂濃度および河口部河床変動の現象が合理的に再 現され、深浅測量結果および他の研究成果と一致した。
- e)流送土砂の構成および流送土砂量の解析結果が留萌川
 河口部土砂堆積量の調査結果と一致した。

河口工学は、従来半経験的に構築されてきたが、今回適用 したNKhydro2Dモデルにより、河口地形の予測が可能となっ た。今後、当手法は以下の分野への応用が期待される。①河 道、河口から沿岸にかけての土砂管理、②河口洪水流下断面 の動的管理、③河口改修、導流堤レイアウト検討など。

謝辞: 本研究の一部は、北海道開発局留萌開発建設部から 受注した「留萌川導流堤施設調査検討業務」で実施された ものである。ここに、本成果とりまとめにあたり貴重な御 助言と御指導をいただいた留萌開発建設部治水課の関係の 方々に深謝する次第である。

参考文献

- 泉 典洋、田中 仁、坪井 宏介、伊達 政直:河川流が卓越 する河口テラスの初期堆積形状に関する実験、土木学会論文集、 No.740/II-64、2003.
- 2)金海生、佐々木 成人、山田 裕康:急流扇状地河川の河床変 動および河岸侵食のシミュレーション、こうえいフォーラム、 No.12、2004.
- Kalkwijk, J.P.Th., De Vriend, H.J.: Computation of the flow in shallow river bends, Journal of Hydraulic Research, Vol.18, No.4, 1980.
- Rodi, W.: Turbulence models and their application in hydraulics, IAHR Publication, DELFT, The Netherlands, 1980.
- 5) Thompson, Joe F., Warsi, Z.U.A., Mastin, C.W.:: Numerical Grid Generation — foundations and applications, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, 1985.
- 6) 芦田和男、道上正規:混合砂礫床の河床変動に関する研究、京 大防災研究所年報、No.14 (B)、1971.
- Van Rijn, L.C.: Mathematical modelling of suspended sediment in non-uniform flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110, No.11, 1984.
- 8) 土木学会:平成11年度版水理公式集、p.167、1999年11月
- Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 10) 留萌開発建設部:昭和63年度留萌川·洪水測定業務報告書、 1989.1
- 11) 留萌開発建設部、株式会社開発工営社:平成8年度留萌川改修 工事の内留萌川河床材料調査業務報告書、1996.10