

# 尻別川河口域における水理特性に関する研究

## A STUDY ON THE NUMERICAL CALCULATION OF FLOW AND SEDIMENT AT THE ESTUARY OF THE SHIRIBETSU RIVER

伊東祐一郎<sup>1</sup>・清水康行<sup>2</sup>・古路一哉<sup>3</sup>

Yuichiro ITO, Yasuyuki SHIMIZU and Kazuya HURUMICHI

<sup>1</sup> 学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒 060-0813 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

<sup>2</sup> 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒 060-0813 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

<sup>3</sup> 正会員 国土交通省北海道開発局小樽開発建設部 (〒 047-8555 北海道小樽市潮見台 1 丁目)

The Shiribetsu River, which has its source on Mt.Fure-dake, is located in southwestern part of Hokkaido. Nowadays, estuary closing is the serious problem at the rivermouth of the Shiribetsu River. The complexity of hydraulic characteristics of estuary, we cannot know predominance of all parameters. Building of the unified model of the sea stage and the river stage is being asked to grasp the movement of sediment of estuary. It is very important to estimate the amount of sediment which flows out from the river mouth quantitatively because it becomes the boundary conditions of the unified model. Therefore, the purposes of this study are the prediction of a long-term change in river bed at the estuary of the Shiribetsu River and the estimation that sediment which flows out from the rivermouth of the Shiribetsu River.

**Key words:** *sediment runoff, dredging, reappearance calculation.*

### 1. はじめに

尻別川は北海道南西部に位置し、その源を支笏湖と分水界をなすフレ岳に発し、羊蹄山麓を流れ、日本海に注ぐ流路延長 126km、流域面積 1,640km<sup>2</sup> の一級河川である。この尻別川の河口部では、冬季に北西の季節風による波浪とそれによる沿岸漂砂、さらには渇水により、河口閉塞が発生している。このことにより以下のように様々な問題が生じている。

- ・砂州の発達により水位のせき上げがおこり、内水被害が発生する。
- ・せき上げ現象により、堤防堤体の弱体化をまねく。
- ・河川幅や水深の不足と開口位置の不安定により、舟運に支障となる。
- ・舟着き場への土砂堆積が起きている。
- ・遡河性魚類の遡上に関する影響がある。

平成 11 年にこれらの問題の対策として、河口右岸側に試験的に導流堤 (87m) が設置された。またそれ以外にも河道掘削や離岸堤設置などの措置もとられている。導流堤設置によりそれまで問題となっていた砂州の発達はある程度抑制されるようになったが、舟着き場である対岸への土砂堆積が顕著になるなど新たな問題も生じ、根本的な問題解決には至っていない。

浚渫や河道拡幅などの人為的な操作が河道縦断形など河床変動に与える影響、ひいては河口部の河床変動や河口からの流出土砂量へ与える影響などいまだ不明な部分は多く、あまり把握できていないのが現状である。さらに、河口部の土砂の挙動のメカニズムを解明するためにも河川域と海域とを別々に扱わずに統一的

に取り扱うような一体モデルの構築が求められているが、河口からの流出土砂量は一体モデルの境界条件となるため、それを定量的にかつ正確に把握することは重要である。本研究はそのために尻別川の河口域における長期的な河床変動の予測と、河口からの年間流出土砂量のより正確な推定を目的としている。現在までに河川流域で生産・輸送される土砂に関する研究は数多く行われている。本研究ではその中でも浮遊砂・掃流砂を含む混合粒径の 1 次元河床変動モデルを用いて、河床の縦断形状についての再現計算をすることにより、河口からの流出土砂量の推定を行っており、実測の横断データ・浚渫量の情報を用いてその結果の評価も試みている。そして、それをふまえた上での将来予測計算を行っている。

### 2. 1 次元河床変動計算

#### (1) 概要

河口からどの程度の土砂の流出があるのか、年間あたりの流出量や粒径別の流出量といった情報を得るために 1 次元の河床変動計算を行った。本研究では基本的に、清水<sup>1)</sup>による石狩川の河床変動計算モデルを尻別川の実測の断面形状、流量、河床材料の粒度分布、河口水位などを用いて適用し、河床および河床材料の変動計算を行った。その概略は以下のとおりである。

**計算区間** 尻別川の河口から 24km の区間

**基礎式** 1 次元不等流、粒径別掃流砂・浮遊砂量式、粒径別濃度連続式、粒径別流砂連続式および全流砂の連続式

**境界条件** 上流端で流砂の動的平衡状態（その場の掃流力から計算される流砂量を与える）、下流端水位は河口水位の実測値、下流端では自由に河床変動するものとした。また本研究で用いたモデルは横からの流入も考慮できるものであるが、尻別川の対象としている区間が24kmと比較的短いため支川からの流入は考慮せず、流量は全断面において一定として計算している。

## (2) 基礎式

河床および粒度分布の変化速度に対して流れの変化速度は非常に速いため、一般的にこの種の問題は河川流を擬似定常流として扱う場合が多い。本研究においてもこの立場から流れを擬似定常流として扱い、また、対象とする現象が流下方向の変化を扱っているため、流れの基本式は以下に示す1次元定常流の運動方程式とする。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) + i_e = \frac{q_x Q}{gA^2} \quad (1)$$

ただし、 $x$ は流下方向距離、 $Q$ は流量、 $g$ は重力加速度、 $H$ は水位、 $A$ は流積、 $\alpha$ はエネルギー補正係数、 $q_x$ は単位流路延長当たりの横流入流量、 $i_e$ はエネルギー勾配である。横流入流量とは支川からの合流流量、残流域からの表面流、地下水流などを含む全ての流入量である。抵抗則としては岸・黒木<sup>3)</sup>による平坦河床および砂州の抵抗則である次式を用いる。

$$\frac{u}{u_*} = 6.8 \left( \frac{h}{d_m} \right)^{1/6} \quad (2)$$

ここで、 $u$ は平均流速、 $u_*$ は摩擦速度（ $=\sqrt{gh i_e}$ ）、 $h$ は水深、 $d_m$ は平均粒径である。

式(3.2)および流れの連続式 $Q = Bhu$ を用いることにより式(3.1)中のエネルギー勾配 $i_e$ は次式で表される。

$$i_e = \frac{Q^2 d_m^{1/3}}{46.24 h^{10/3} g B^2} \quad (3)$$

ただし、 $B$ は河幅である。掃流砂量式は次式の芦田・道上の式<sup>4)</sup>を用いる。

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = p_i 17 \tau_{*i}'^{2/3} \left( 1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left( 1 - \frac{u_{*ci}}{u_{*i}} \right) \quad (4)$$

ただし、 $d_i$ は砂粒子の粒径。下付き添え字 $i$ は混合粒径における粒径 $d_i$ の粒子に対する物理量であることを示す（以下に現れる記号全てに共通）。さらに、 $q_{Bi}$ は単位幅掃流砂量、 $s$ は砂の水中比重、 $p_i$ は粒径 $d_i$ の粒子が河床（交換層）に存在する割合、 $\tau_{*i}$ は粒径別無次元掃流力（河床せん断力）（ $=u_*^2/sgd_i$ ）、 $\tau_{*i}'$ は粒径別無次元有効掃流力（有効河床せん断力）（ $=u_*'^2/sgd_i$ ）、 $u_*'$ は有効摩擦速度、 $\tau_{*ci}$ は粒径別無次元限界掃流力（ $=u_{*ci}^2/sgd_i$ ）、 $u_{*ci}$ は粒径別限界摩擦速度であり以下の Egiazaroff・浅田の式<sup>5)</sup>で求める。

$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left[ \frac{\log 23}{\log \left( 21 \frac{d_i}{d_m} + 2 \right)} \right]^2 \frac{d_i}{d_m} \quad (5)$$

ただし、 $d_m$ は河床材料の平均粒径（ $=\sum_i d_i p_i$ ）、 $u_{*cm}$ は $d_m$ に対する限界摩擦速度であり、岩垣の式<sup>6)</sup>で求める。

浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式<sup>7)</sup>で求める。

$$q_{sui} = p_i K \left( \alpha_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd_i}{u_*'} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (6)$$

$$\Omega_i = \frac{\tau_{*i}' \int_{a'}^{\infty} \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{B_{*i} \int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}'}{B_{*i} \eta_0} - 1 \quad (7)$$

ただし、 $q_{sui}$ は粒径別浮遊砂の単位面積当たりの河床からの浮上量、 $w_{fi}$ は粒径別浮遊砂の沈降速度であり Rubey の式で求める。また、 $a' = B_{*i}/\tau_{*i}' - 1/\eta_0$ 、 $\eta_0 = 0.5$ 、 $\alpha_* = 0.14$ 、 $K = 0.008$ 、 $\rho_s$ は浮遊粒子の密度、 $\rho$ は水の密度である。 $B_{*i}$ は揚力算定の際の速度に摩擦速度 $u_*$ を適用するための換算係数であり、均一粒径の場合は $B_{*i} = 0.143$ の一定値が用いられるが、ここでは遮断効果を考慮して沖・黒木<sup>8)</sup>による次式で与える。

$$B_{*i} = \xi_i B_{*0} \quad (8)$$

$$\xi_i = \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ci0}} \quad (9)$$

ただし、 $B_{*0} = 0.143$ 、 $\tau_{*ci} = u_{*ci}^2/sgd_i$ 、 $\tau_{*ci0} = u_{*ci0}^2/sgd_i$ である。 $u_{*ci0}$ は粒径 $d_i$ の均一粒径の場合の限界摩擦速度で岩垣の式より求める。

粒径別浮遊砂濃度の連続式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (< c_i > h) + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q < c_i >)}{\partial x} \\ = q_{sui} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_x < c_{xi} >}{B} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $c_{bi}$ は河床付近の粒径別浮遊砂濃度、 $< c_{xi} >$ は支川等からの横流入浮遊砂量の粒径別水深平均濃度、 $t$ は時間である。

上式中の $< c_i >$ と $c_{bi}$ の関係は水深方向の濃度分布より求められるが、ここでは以下に示す指数型の分布式を採用するものとする。

$$c_i = c_{bi} \exp(-\beta \xi) \quad (11)$$

ただし、 $\beta = w_{fi} h / \epsilon$ 、 $\xi = z / h$ 、 $z$ は河床からの距離、 $\epsilon$ は水深平均の拡散係数（ $=\kappa u_* h / 6$ ）、 $\kappa$ はカルマン定数（ $=0.4$ ）、 $c_i$ は河床から $z$ の距離における粒径 $d_i$ の粒子の濃度である。

$\langle c_i \rangle$  は式 (11) を河床から水面まで積分することにより次式となる。

$$\langle c_i \rangle = \frac{1}{h} \int_0^1 c_i d\xi = \frac{c_{bi}}{\beta} (1 - \exp(-\beta)) \quad (12)$$

式 (12) が式 (10) 中の  $\langle c_i \rangle$  と  $c_{bi}$  の関係である。

混合粒径における粒径別流砂の連続式は交換層における粒径別の流砂の交換、河床の変動および河床変動に伴って新たに交換層に加わる粒径分布を考慮し次式で表される。

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i^* \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi} B)}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} - \frac{q_x c_{Bxi}}{B} \right] = 0 \quad (13)$$

ここで、

$$\begin{aligned} p_i^* &= p_i; \partial \eta / \partial t \geq 0 \\ p_i^* &= p_{i0}; \partial \eta / \partial t < 0, \eta_0 \leq 0 \\ p_i^* &= p_{im}; \partial \eta / \partial t < 0, \eta_0 > 0 \end{aligned}$$

ただし、 $\eta$  は河床高、 $\delta$  は交換層（河床材料と流砂の交換が行われる層）の厚さ（ここでは  $d_{90}$  の値を用いることとした）、 $\lambda$  は河床材料の空隙率、 $c_{Bxi}$  は粒径別横流入流掃流砂濃度である。河床低下 ( $\partial \eta / \partial t < 0$ ) の場合には交換層内の粒子と原河床（交換層のより下の河床）の粒子が交換されるため原河床の粒度分布を考慮する必要がある。そこで、式 (13) 中の  $p_i^*$  に関しては、河床上昇の場合には流砂中における粒度構成  $p_i$  を、河床低下の場合で過去にこの地点で一旦堆積したことのある場合には堆積した時点における河床の粒度構成  $p_{im}$  を、また河床低下の場合で計算初期河床よりもさらに低下した場合には計算の初期河床と同じ粒度構成  $p_{i0}$  を与えるものとした。

全流砂の連続式は全ての粒径の流砂の交換を考慮し次式で表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{1}{B} \frac{\partial \sum_i (q_{Bi} B)}{\partial x} - \sum_i (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) - \frac{\sum_i (q_x c_{Bxi})}{B} \right] = 0 \quad (14)$$

ただし、 $\sum_i$  は粒径別の量を合計した量であることを示す。横流入流量は、本川の流量を用いて次式で表される。

$$q_x = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (15)$$

支川からの供給流砂濃度を本川における流砂濃度と等しいと仮定する。これは、本川に合流する支川の河床

材料や河床勾配が合流点付近では本川にほぼ等しいと考えることに相当する。

$$\langle c_{xi} \rangle = \langle c_i \rangle \quad (16)$$

$$c_{Bxi} = \frac{q_{Bi} B}{Q} \quad (17)$$

なお、

本計算においては抵抗則として式 (2) の平坦河床または砂州の抵抗を仮定しているため河床波による形状抵抗は考慮せず、有効掃流力を全掃流力に等しいと仮定し次式で与える。

$$\tau'_{*i} = \tau_{*i} \quad (18)$$

$$u'_{*i} = u_{*i} \quad (19)$$

### (3) 境界条件、初期条件等

図-1 に示す 1974 年～1995 年の 22 年間の名駒観測所における実績日流量、図-2 に示す河口水位の実測データを用いて計算を行うこととした。

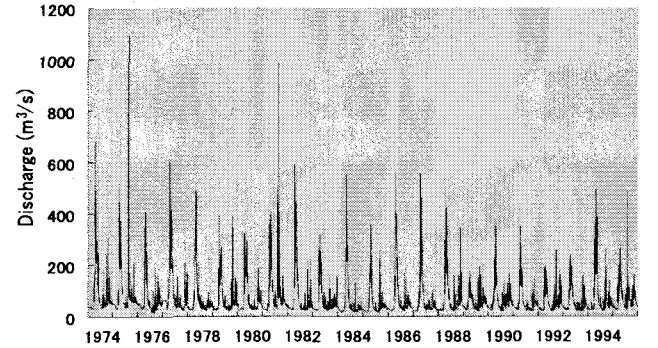


図 1: 尻別川の実績日流量 (1974～1995・名駒観測所)

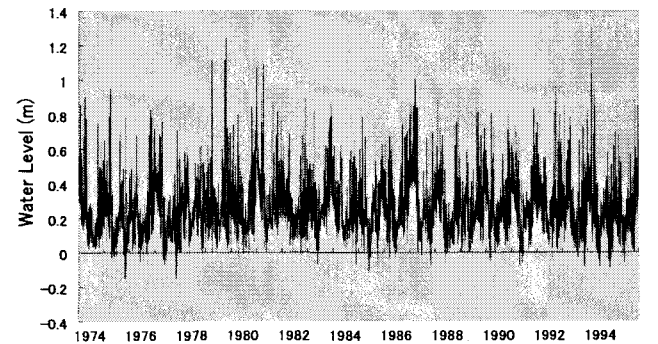


図 2: 尻別川河口における水位 (1974～1995)

初期河床の縦断形状は図-3 に示される近似曲線で与えた。図-3 左に示すように次式は平均河床高の近似式である。

$$\eta = 0.28614 \exp(0.15937 K p) - 1.5 \quad (20)$$

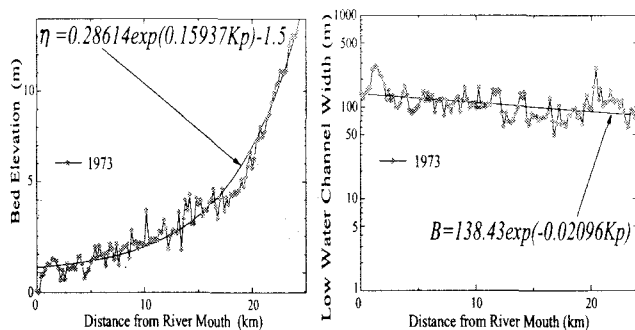


図 3: 計算の初期河床高、計算上の低水路幅

ここで、 $\eta$  は平均河床高の標高 (m)、 $Kp$  は河口から上流に向かった距離 (km) である。

同様に図-3 右は図-3 左に示した平均河床高と同じ年度 (1973 年) の横断面より読み取った低水路の川幅であり、これを近似する次式を計算上の川幅とする。

$$B = 138.43 \exp(-0.02096Kp) \quad (21)$$

ここで、 $B$  の単位は (m) である。

また河床材料の初期粒径分布は図-4 に示すように 1972 年の実測値を直接用いた。計算に用いた河床材料は図-4 の凡例に示すように 15 の範囲に分割し、それぞれの代表粒径を各粒径区分の中央値で与えた。ここでの計算は河床材料から流砂量を計算するものであり、流砂の扱いは bed material load となる。

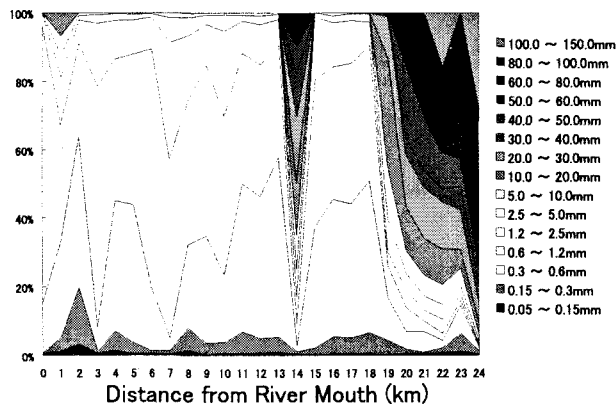


図 4: 河床材料の初期粒度分布

#### (4) 再現計算について

**Case-1** 以上に述べたように実測データを用いて通常の河床変動計算を行う。計算期間は日流量、水位データに対応した 22 年間である。

**Case-2-1** Case-1 の計算終了後に実績の浚渫土砂量分の河床高を 1 度下げるという作業を行う。

**Case-2-2** Case-1 で行う計算中において浚渫土砂量の効果を考慮した計算を行う。具体的には浚渫土砂量と浚渫の行われた時期、区間を与え、それに対応した河床高を人為的に下げるといったものである。実河川において浚渫は河床低下と低水路幅の拡幅と 2 通り行われているが、浚渫土砂量全体の中で低水路幅の拡幅によるものはさほど多くはないので、今回の計算では全て河床低下として扱っている。計算期間は Case-1 と同様である。

#### (5) 将来予測計算について

**Case-3** Case-1 と同様のモデル、初期条件、境界条件を用いて計算を行う。ただし流量、河口水位については Case-1,2-2 で用いた実測データを 5 回繰返し与えた。すなわち計算期間は 110 年間である。

**Case-4** Case-2 と同様のモデル、初期条件、境界条件を用いて計算を行う。ただし流量、河口水位については Case-1,2-2 で用いた実測データを 5 回繰返し与えた。すなわち計算期間は 110 年間である。浚渫土砂量については最初の 22 年間のみ与えた。

### 3. 計算結果

#### (1) 再現計算の結果について

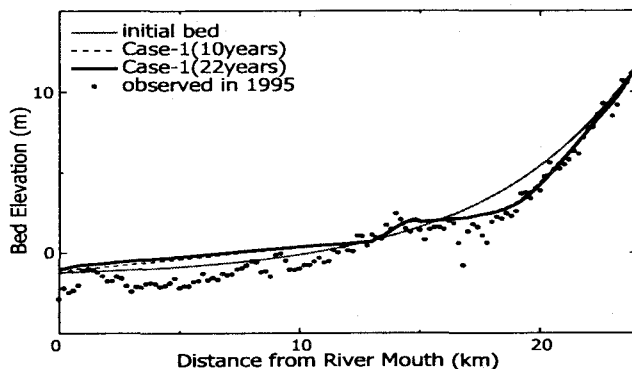


図 5: 計算結果と実測値との比較 (Case-1)

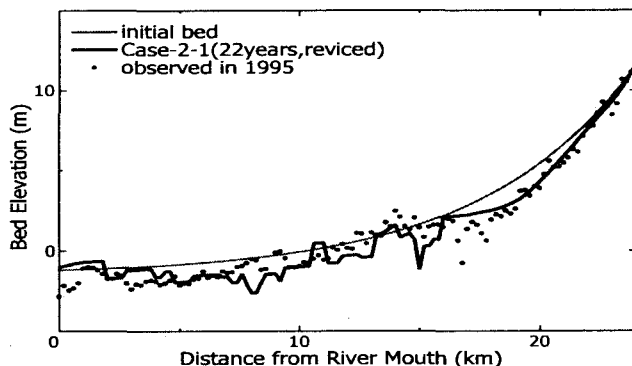


図 6: 計算結果に浚渫量を補正しそれと実測値との比較 (Case-2-1)

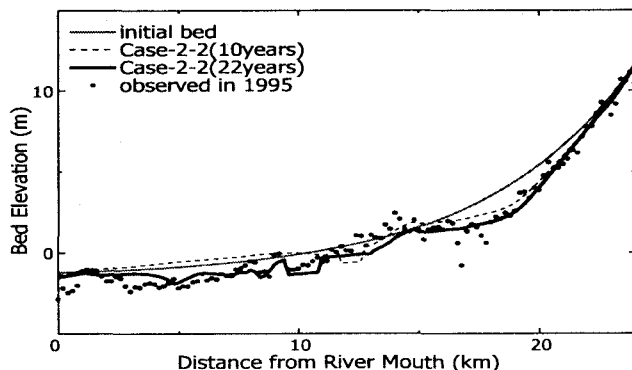


図 7: 計算結果と実測値の比較 (Case-2-2)

過去 22 年間の流量を用いた河床変動計算のうち Case-1 の計算結果を図-5 に示す。これによれば KP15 より

上流は河床低下、下流は堆積の傾向が見られた。上流の侵食の度合いは実測データに近い結果が得られたが、下流部は実測の結果と大きく異なっている。これは実際の尻別川ではこの期間において約 200 万  $\text{m}^3$  の浚渫が行われているためと見られる。この浚渫土砂量分を計算終了後の河床高に補正した Case-2-1 の河床縦断面図を図-6 に示す。Case-1 の計算結果と比較すると下流域の河床高は実測値にやや近い結果が得られた。さらに河床変動計算の過程で年別に浚渫土砂量を考慮した Case-2-2 の計算結果を図-7 に示す。これによると計算終了後に一括して浚渫土砂量を考慮した Case-2-1 よりもさらに実測値に近い結果となった。より現実に近い条件であるということを考えると当然の結果ではある。

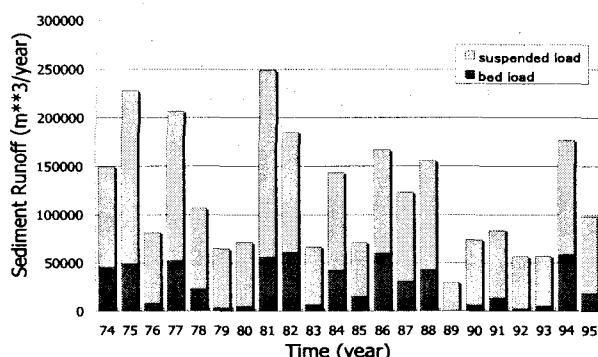


図 8: 計算上で、尻別川河口から 1 年間あたりに流出する土砂量 (Case-1)

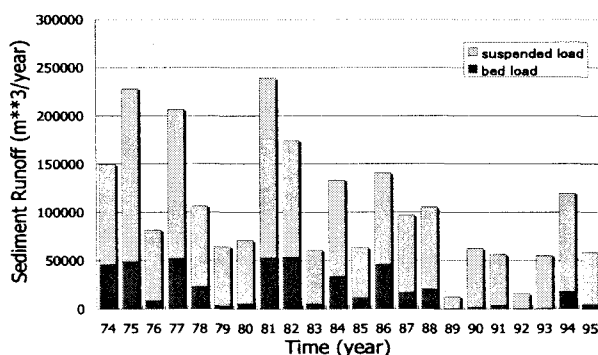


図 9: 計算上で、尻別川河口から 1 年間あたりに流出する土砂量 (Case-2-2)

また Case-1 の計算過程で河口、すなわち下流端断面において算出される流砂量を 1 年ごとに総和した、年間あたりの河口からの総流出土砂量を図-8 に示す。棒グラフの濃い部分が掃流砂として、そして薄い部分が浮遊砂として計算される成分である。これによれば尻別川の河口から海域に流出する土砂量は年平均で 10 万  $\text{m}^3$  程度、出水のあった年では 20 ～ 25 万  $\text{m}^3$  程度と推定される。同様に Case-2-2 における年間あたりの河口からの総流出土砂量を図-9 に示した。これによると浚渫の開始される 1978 年以降は浚渫土砂量を考慮していない Case-1 と比較し、河口から流出している土砂量が少なく計算されていることが分かる。つまり浚渫することにより河口からの流出土砂量が抑制される傾向にあることが示された。また、Case-1、Case-2-2 の双方とも、流出土砂量の内訳を見てみると掃流砂は無視できない程度に存在するが、大部分が浮遊砂として計算されている。次に、河口から流出する成分の粒径に注

目し、流出土砂の主要な成分として計算される浮遊砂中における粒径別の存在割合を図-10 に示す。これを見てみると、石狩川<sup>2)</sup>の計算と同様、0.2mm 以下の細粒成分が流出土砂の大部分を構成していることがわかる。また河床高の計算結果において、浚渫土砂量を年別に考慮し計算を行った Case-2-2 の方は全く考慮していない Case-1 と比較してより高い整合性がみられたことから、河口からの流出土砂量は浚渫土砂量を年別に考慮した Case-2-2 の計算結果の方がより信頼性が高いものであると言える。このように再現計算においては人為的な要因(浚渫、拡幅など)も十分に考慮すべきであるといえる。

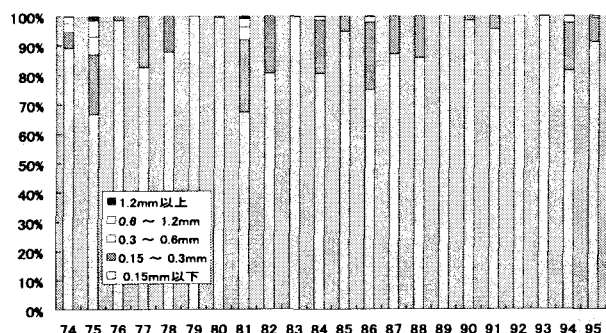


図 10: 流出土砂量のうち浮遊砂として計算される成分中の粒度構成 (Case-1)

## (2) 将来予測計算の結果について

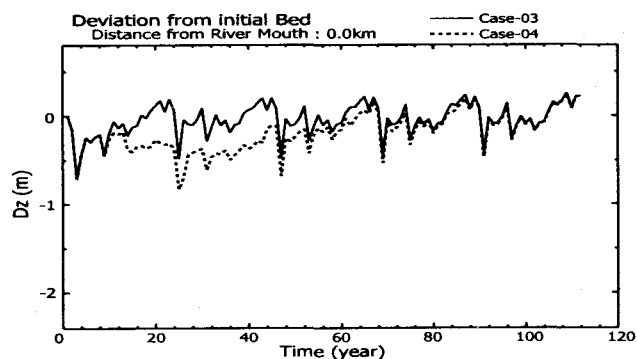


図 11: Kp0.0 における初期河床からの変動量

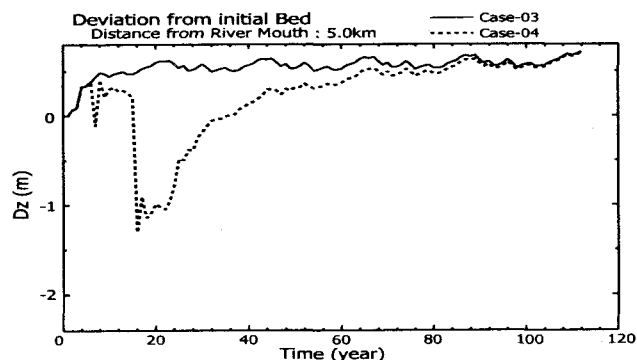


図 12: Kp5.0 における初期河床からの変動量

将来予測計算において、初期河床からの変動量については図-11～図-14 に示した。ここでは各断面における河床高の時間的な変化に注目し、横軸に時系列をとり、縦軸に初期河床からの変動量  $Dz$  を表した。濃い折れ線が Case-3(浚渫量を全く考慮していない)であり、薄

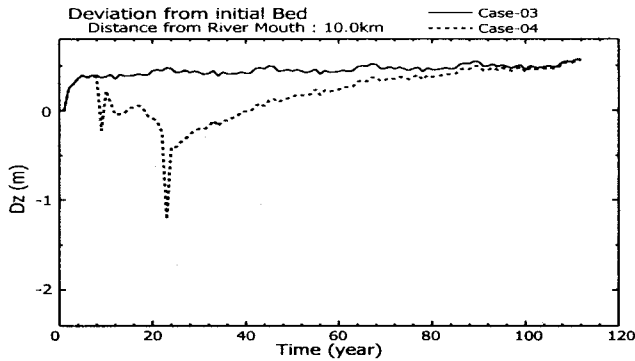


図 13: Kp10.0 における初期河床からの変動量

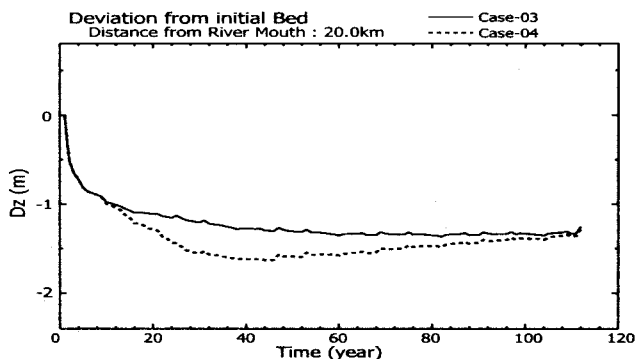


図 14: Kp20.0 における初期河床からの変動量

い折れ線が Case-4(浚渫量を計算過程で考慮している)である。代表的な断面として河口からの距離が 0.0km、5.0km、10.0km、20.0km の 4 断面を挙げた。それによると 110 年間の長期計算では浚渫を行うことにより、浚渫が行われている区間だけにとどまらず河道全体にわたって河床低下をもたらすが、60 年～80 年程ではほぼ定常の河床縦断面形に戻ろうとする。河床高は河口部ではその他の断面と比較し大きめの変動をするが、長期的に見れば流量・水位に対応した変動をしていて、最終的にはほぼ定常に至るといえる。

計算過程において河口すなわち下流端断面で算出される流砂量を年ごとに総和し浮遊砂と総流砂にわけて図-15、図-16 に示した。これによると浚渫によってその量が抑えられていると見ることができ、河床の縦断面形状が定常に近づくにつれ流出土砂量も増加し、その後定常になる傾向がある。

以上のことをまとめると

- ・長期間経過すると、浚渫を行った場合でも行わない場合の将来予測に計算上では収束する傾向にある。
- ・浚渫することが無駄であるとまでは言えないが、少なくともその効果が永続的ではないということが確認された。
- ・また収束に要する期間はおよそ 60 年～80 年である。

#### 4. おわりに

本研究は尻別川の下流域における 1 次元の河床変動計算を行い、それにより河口からの流出土砂量の推定を行った。またこの河床変動計算においては実績の浚渫土砂量を考慮するものとししないものの計算を行い、この両者の比較から浚渫が長期的に河床の縦断面形や河口

からの流出土砂量に与える影響について言及した。すなわち浚渫がある程度の期間においては河口閉塞を抑制するように作用するが、それが永続的ではないという可能性が示された。

また、河口閉塞を検討するための河川域と海域の一体モデル構築に際しては、境界条件として河口から流出する土砂量が重要な意味を持つ。その点からも有益な情報が得られたといえる。

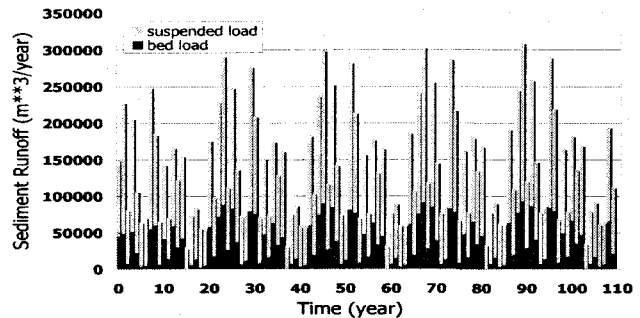


図 15: 計算上で、尻別川河口から 1 年間あたりに流出する土砂量 (Case-3)

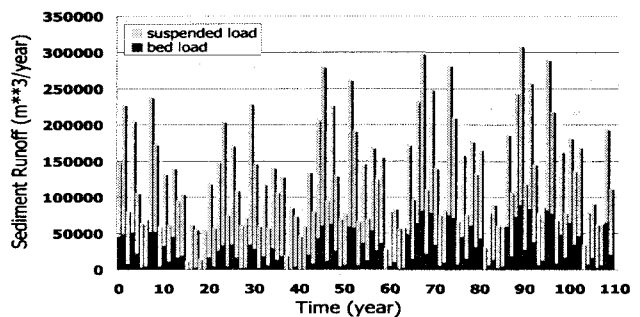


図 16: 計算上で、尻別川河口から 1 年間あたりに流出する土砂量 (Case-4)

#### 参考文献

- 1) 清水康行: 沖積河川の縦断面と河床材料分布形の形成について, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.69-78, 1995.8.
- 2) 清水康行, 蛭峨浩, 早川博, 品川守: 石狩川の土砂流出に関する研究, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1039-1044, 1998.2
- 3) 岸力, 黒木幹男: 移動床における河床形状と流体抵抗 (I), 北大工学部研究報告, 第 67 号, pp.1-23, 1973.
- 4) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 5) 浅田宏: 山地河川の流砂量と貯水池の堆砂過程に関する研究, 電力中央研究所報告, No.2, 1976.
- 6) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp.1-21, 1956.
- 7) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments. *Proc. of ASCE, HY8*, pp.1325-1343, 1980.
- 8) 沖健, 黒木幹男: 混合床上の浮遊砂量の算定式の検討, 土木学会台 40 回年次学術講演会講演概要集, pp.415-416, 1985.

(2001. 4. 16 受付)