

尻別川河口域における流れと流砂に関する研究

A Study on the Numerical Calculation of Flow and Sediment at the Estuary of the Shiribetsu River

北海道大学工学部 ○学生員 伊東祐一郎 (Yuichiro Ito)
北海道大学大学院 正員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

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 1,640km² 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、水深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。しかし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、根本的な問題解決には至っていない。このように河口付近における土砂の挙動についてはあまり把握できていないのが現状である。そこで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。本研究はその第一歩として尻別川の河口域における土砂収支の概算と年間生産土砂量の推定を行っている。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推定することは重要である。

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清水¹⁾によって構築された浮遊砂・掃流砂を含む混合粒径モデルを用いて 1 次元河床変動計算を行い、流出土砂量の推定をしている。また実測の横断データ、浚渫量の情報との比較によりその結果の評価も行っている。

2. 実測量データによる河床変動量の概算

尻別川では 1968, 1973, 1979, 1981, 1988, 1995 年に横断測量が行われており、このデータに基づく低水路幅と河床高の経年変化を図-1、図-2 に示した。低水路幅、河床高とも局所的な変動はあるものの、全体的に見てみるとさほど特徴的な変動があるとは言えない。

次にこれらを用いてある区間に図-3 に示すような物体を考え、この物体の体積変化がその区間における土砂収支であるとした。すなわち、物体の体積減少をその区間においては洗掘、体積増加を堆積とみなした。また、この物体の体積については近似的に

$$V = \frac{Z_1 + Z_2}{2} \frac{B_1 + B_2}{2} D$$

で求めている。その変動を見てみると下流域においては顕著な堆積傾向にあることが見て取れる (図-4)。またこの期間においては図-5 に示すような河道掘削が行われており、こ

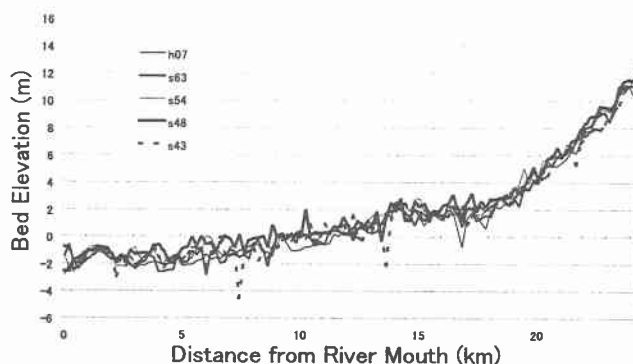


図 1: 平均河床高の経年変化図

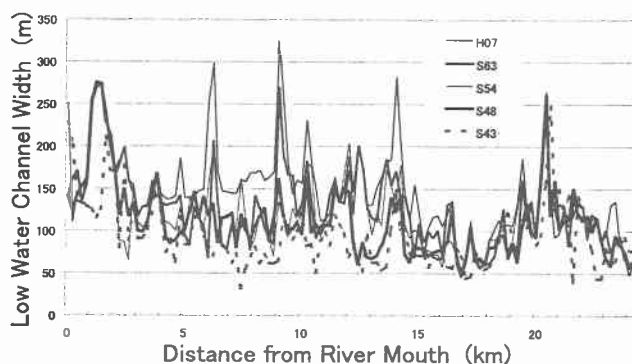


図 2: 低水路幅の経年変化図

の量を考慮すると図-6 に示すように Kp12 より下流域においては 1973 年から 1995 年までの 22 年間で約 300 万 m³ の土砂が堆積していることになる。

3. 1 次元河床変動計算

実測量データによる河床変動量の概算により尻別川の河口から約 24km の河道における 22 年間のおおまかな土砂収支は示されたが、ここでは単純に河道の横断面の変動からその区間における土砂収支を推定したもののなので、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に関しては不明である。そこで著者の 1 人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)、支川からの流入は考慮しない (流路延長 24km と比較的短いため)、下流端水位は河口水位の実測値、下流端の流砂量は自由流出条件

計算は 1974 年～1995 年の 22 年間の実績日流量 (図-7)、河口水位 (図-8) を用いて行うこととし、初期河床縦断形

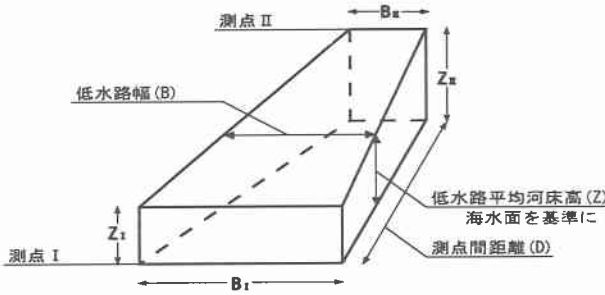


図 3: 横断面の変動から土砂収支を概算する

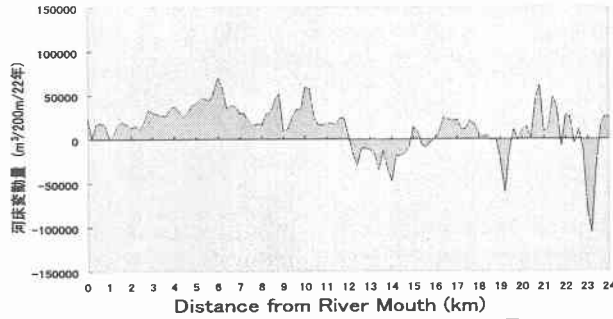


図 4: 横断面図から概算した河床変動量

状は図-9 に示される近似曲線で与えた。図-9 左に示すように次式は平均河床高の近似式である。

$$\eta = 0.28614 \exp(0.15937 Kp) - 1.5 \quad (1)$$

ここで、 η 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-9 右は図-9 左に示した平均河床高と同じ年度 (1973 年) における横断面図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。

$$B = 138.43 \exp(-0.02096 Kp) \quad (2)$$

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 1972 年の実測値を直接用いた (図-10)。計算に用いた河床材料は図-10 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。

4. 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。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) + i_e = \frac{q_x Q}{gA^2} \quad (3)$$

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、 α 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³⁾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。

$$\frac{u}{u_*} = 6.8 \left(\frac{h}{d_m} \right)^{1/6} \quad (4)$$

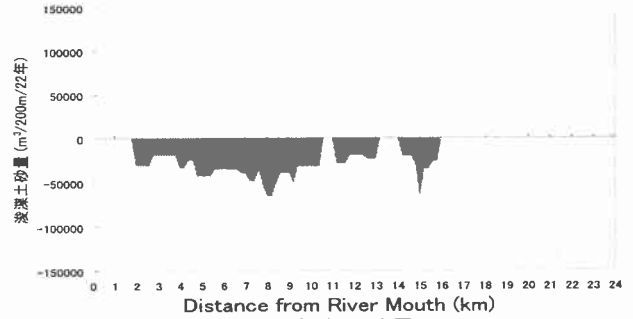


図 5: 浚渫土砂量

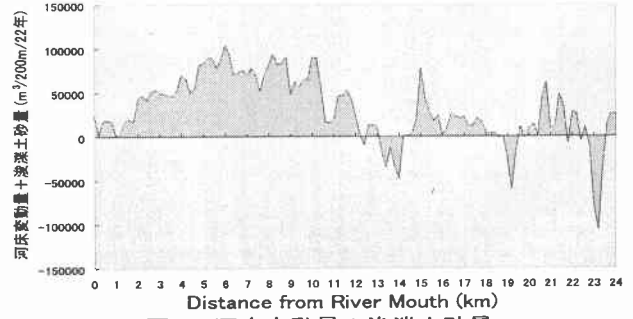


図 6: 河床変動量+浚渫土砂量

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

式 (2) および流れの連続式 $Q = Bhu$ を用いることにより式 (1) 中のエネルギー勾配 i_e は次式で表される。

$$i_e = \frac{Q^2 d_m^{1/3}}{46.24 h^{10/3} g B^2} \quad (5)$$

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⁴⁾を用いる。

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = p_i 17 \tau_{*i}'^{2/3} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}'} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_{*i}'} \right) \quad (6)$$

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、 τ_{*i}' は粒径別無次元掃流力 (河床せん断力) ($= u_*'^2 / sgd_i$)、 τ_{*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、 τ_{*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⁵⁾で求める。

$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left[\frac{\log 23}{\log \left(21 \frac{d_i}{d_m} + 2 \right)} \right]^2 \frac{d_i}{d_m} \quad (7)$$

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

浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式⁷⁾で求める。

$$q_{sui} = p_i K \left(\alpha_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd_i}{u_*'} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (8)$$

$$\Omega_i = \frac{\tau_{*i}' a_i'}{B_{*i}} \frac{\int_{a_i'}^{\infty} \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_{a_i'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}'}{B_{*i} \eta_0} - 1 \quad (9)$$

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

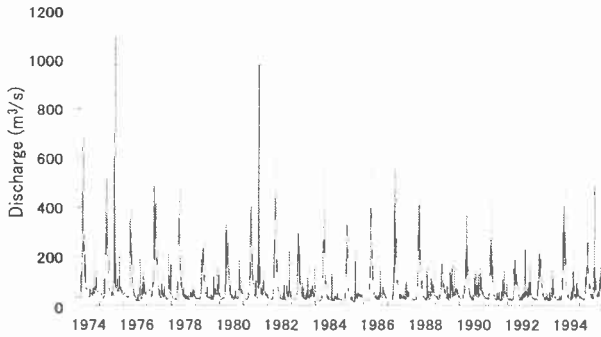


図 7: 尻別川の実績日流量 (1974 ~ 1995・名駒)

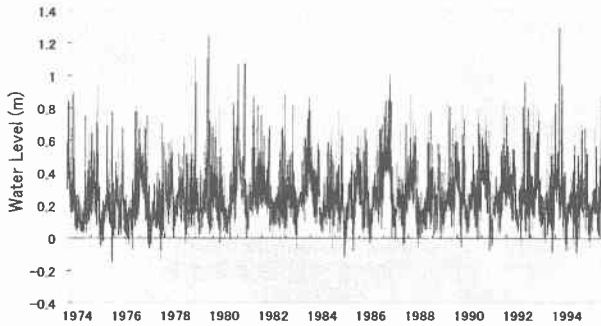


図 8: 尻別川河口における水位 (1974 ~ 1995)

求める。また、 $a' = B_{*i}/\tau_{*i}' - 1/\eta_0$ 、 $\eta_0 = 0.5$ 、 $\alpha_* = 0.14$ 、 $K = 0.008$ 、 ρ_s は浮遊粒子の密度、 ρ 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⁸⁾による次式で与える。

$$B_{*i} = \xi_i B_{*0} \quad (10)$$

$$\xi_i = \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ci0}} \quad (11)$$

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。

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle c_i \rangle + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q \langle c_i \rangle)}{\partial x} = q_{sui} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_x \langle c_{xi} \rangle}{B} \quad (12)$$

ここで、 c_{bi} は河床付近の粒径別浮遊砂濃度、 $\langle c_{xi} \rangle$ 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 $\langle c_i \rangle$ 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。

$$c_i = c_{bi} \exp(-\beta \xi) \quad (13)$$

ただし、 $\beta = w_{fi} h / \epsilon$ 、 $\xi = z/h$ 、 z は河床からの距離、 ϵ は水深平均の拡散係数 ($= \kappa u_* h / 6$)、 κ 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。

$$\langle c_i \rangle = \frac{1}{h} \int_0^1 c_i d\xi = \frac{c_{bi}}{\beta} (1 - \exp(-\beta)) \quad (14)$$

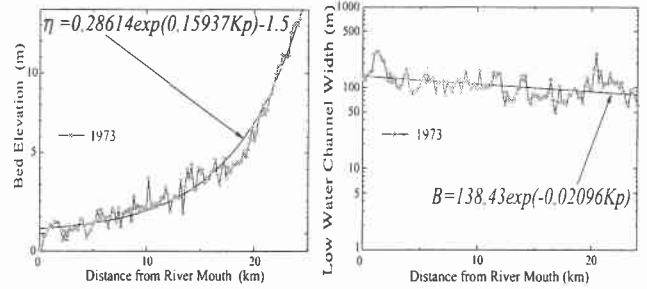


図 9: 計算の初期河床高、計算上の低水路幅

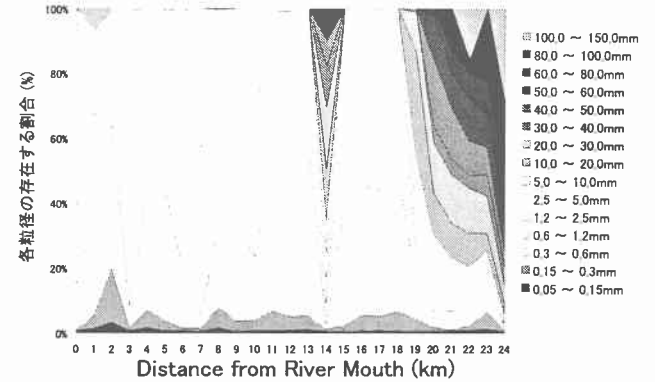


図 10: 初期粒度分布

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。

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i^* \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi} B)}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} - \frac{q_x c_{Bxi}}{B} \right] = 0 \quad (15)$$

ここで、

$$p_i^* = p_i; \partial \eta / \partial t \geq 0$$

$$p_i^* = p_{i0}; \partial \eta / \partial t < 0, \eta_0 \leq 0$$

$$p_i^* = p_{im}; \partial \eta / \partial t < 0, \eta_0 > 0$$

ただし、 η は河床高、 δ 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)、 λ 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。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial \sum_i (q_{Bi} B)}{\partial x} - \sum_i (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) - \frac{\sum_i (q_x c_{Bxi})}{B} \right] = 0 \quad (16)$$

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。

$$q_x = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (17)$$

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。

$$<C_{xi}> = <C_i> \quad (18)$$

$$c_{Bxi} = \frac{q_{Bi}B}{Q} \quad (19)$$

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。

$$\tau'_{*i} = \tau_{*i} \quad (20)$$

$$u'_{*i} = u_{*i} \quad (21)$$

5. 計算結果

22 年分の河床変動計算を通じて河口から流出する流砂量を各年毎に合計して、掃流砂と浮遊砂で分けて図-11 に示す。全体を通してほぼ浮遊砂がその大部分を占めるが、掃流砂も無視できない程度には存在する。流出量としては多い年でおおよそ 25 万 m³ 程度、平均的には 10 万 m³ となっている。本計算では粒径別のモデルを用いているため流砂量中の各粒径の構成割合を求めることが可能である。図-12 は計算の過程において算定される河口からの流出土砂の大部分である浮遊砂中の各粒径の構成割合を年毎に示したものである。これによると清水らの石狩川での計算²⁾と同様、流出する土砂の大部分が 0.15mm 以下の微細粒子であることが示された。

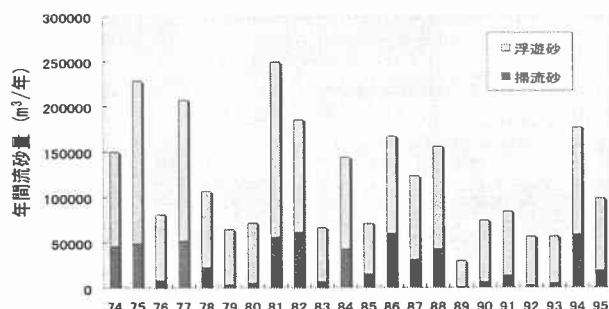


図 11: 尻別川河口の年間流砂量の計算結果

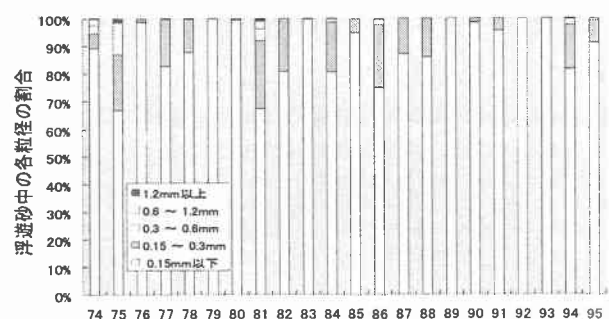


図 12: 浮遊砂の計算結果に占める各粒径の割合

また、図 13 は日流量と河口水位を逐次与えて 22 年間の計算を行った河床高の計算結果と 1995 年の実測値を示してある。これによると Kp12 付近より上流ではかなり一致した結果が得られたが、それより下流域では大きくずれている。これは実河川においては浚渫や拡幅などの河道改修がなされているためと思われる。そこで図-5 に示した浚渫土砂量を計算結果に加味してみると図-14 のようになる。この結果と実測値にはある程度の整合性が認められる。この

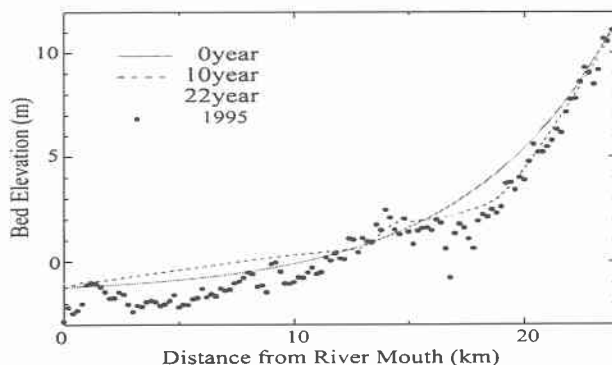


図 13: 計算結果と実測値との比較

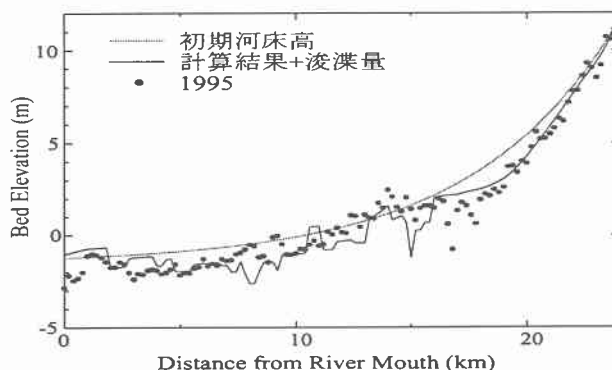


図 14: 計算結果に浚渫を考慮しそれと実測値との比較

ことはすなわち図-11、図-12 で示した河口から流出する流砂量がある程度の信頼性を持っていると言えよう。

6. おわりに

本研究は尻別川の下流域における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。また今後は河口閉塞を検討するため、河川域と海域の一体モデル構築を目標としているが、その意味からも有益な情報が得られたと言える。

参考文献

- 清水康行：沖積河川の縦断形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
- 清水康行、嵯峨浩、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
- 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
- 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
- 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.
- 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.
- Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments. *Proc. of ASCE, HY8*, pp.1325-1343、1980.
- 神健、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.