

二次流による浮遊砂濃度分布の変形を考慮した 準3次元河床変動モデルの開発

A QUASI-THREE-DIMENSIONAL CALCULATION OF BED DEFORMATION CONSIDERING SUSPENDED LOAD DISTRIBUTION

井上卓也¹・清水康行²・江崎國夫³

Takuya INOUE, Yasuyuki SHIMIZU and Kunio EZAKI

¹正会員 修士(工) 財団法人 北海道河川防災研究センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目)

²正会員 博士(工) 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³財団法人 北海道河川防災研究センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目)

It is important for river planning and improvement to predict flows and river bed deformation. A quasi-three-dimensional numerical model is developed to simulate river bed deformation in the river mouth. The advantage of this model is that it enables to consider cross-sectional-velocity distribution with secondary flow, suspended load distribution. And, the calculated results of river bed deformation are compared with the observations of 1981-year flood in the Isikari River.

Key Words : *quasi-three-dimensional model, bed load, suspended load distribution, secondary flow, meandering channel, river mouth,*

1. はじめに

わが国全体の河川整備状況をみると、上流及び中流域の整備の結果、末端に位置する河口部に負荷がかかる状況となっており、河口部における洪水流下能力の確保が治水に極めて重要である。

また、河口部で浚渫などを行っても、時間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も多いことから、河口部の河床変動をより正確に予測する技術の確立が求められている。

一方、清水ら¹⁾は準3次元河床変動モデルを構築し、蛇行部の局所洗掘・堆積現象の定量的な予測を試みた。また、この準3次元モデルは、構築時点では掃流砂のみを対象としたモデルであり、河口付近のように浮遊砂の影響が大きい区間に適用する場合には浮遊砂を適切に考慮する必要がある。

このため、本研究では、上記モデルを河口付近における局所洗掘・堆積の問題に拡張して適用可能とするため、流速及び浮遊砂濃度の鉛直分布を考慮した浮遊砂濃度連続式²⁾を導入し、浮遊砂を算出するモデルを構築した。

本論文では、単一粒径・平坦河道と、混合粒径・自然

河道のそれぞれで、二次流を考慮しない場合、二次流を考慮するが、二次流による浮遊砂輸送量の変化を考慮しない場合、二次流を考慮し浮遊砂輸送量の変化も考慮する場合の3ケースの比較検討を行った。

2. 準3次元河床変動モデル

(1) 流れの基礎式¹⁾

流れの基礎方程式は、3次元のReynolds方程式及び連続式を水深方向に積分し、無次元表示とした(1)～(3)式である。

$$\tilde{N} \frac{\partial}{\partial \tilde{s}} [\tilde{D} \tilde{U}^2] + \frac{\partial}{\partial \tilde{n}} [\tilde{D} (\tilde{v} \tilde{U}^2 k_2 + \tilde{U} \tilde{V})] + \frac{2\tilde{v} \tilde{N} \tilde{D}}{\tilde{R}} (\tilde{v} \tilde{U}^2 k_2 + \tilde{U} \tilde{V}) = -\tilde{N} \tilde{D} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial \tilde{s}} - \tilde{\alpha} \tilde{\tau}_s \quad (1)$$

$$\tilde{N} \frac{\partial}{\partial \tilde{s}} [\tilde{D} (\tilde{v} \tilde{U}^2 k_2 + \tilde{U} \tilde{V})] + \frac{\partial}{\partial \tilde{n}} [\tilde{D} (\tilde{v}^2 \tilde{U}^2 k_1 + 2\tilde{v} \tilde{U} \tilde{V} k_2 + \tilde{V}^2)] - \frac{\tilde{v} \tilde{N} \tilde{D}}{\tilde{R}} (\tilde{U}^2 - \tilde{v}^2 \tilde{U}^2 k_1 - 2\tilde{v} \tilde{U} \tilde{V} k_2 - \tilde{V}^2) = -\tilde{D} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial \tilde{n}} - \tilde{\alpha} \tilde{\tau}_n \quad (2)$$

$$\tilde{N} \frac{\partial(\tilde{U}\tilde{D})}{\partial \tilde{s}} + \frac{\tilde{v}\tilde{N}\tilde{V}\tilde{D}}{\tilde{R}} + \frac{\partial(\tilde{V}\tilde{D})}{\partial \tilde{n}} = 0 \quad (3)$$

ただし、上式は以下に示す無次元量及び関係式を用いて表示している。

$$\begin{aligned} s &= B \cdot \tilde{s} & H &= D_0 \tilde{F}_0 \tilde{H} \\ n &= B \cdot \tilde{n} & \tilde{N} &= \frac{R}{R+n} \\ z &= D_0 \cdot \tilde{z} & \tilde{\zeta} &= 1 + \frac{(\tilde{z} - \tilde{F}_0^2 \tilde{H})}{\tilde{D}} \\ u &= U_0 \cdot \tilde{u} & \tilde{U} &= \int_{\tilde{\zeta}_0}^1 \tilde{u} d\tilde{\zeta} \\ v &= U_0 \cdot \tilde{v} & \tilde{V} &= \int_{\tilde{\zeta}_0}^1 \tilde{v} d\tilde{\zeta} \\ R &= R_0 \cdot \tilde{R} \\ \tilde{v} &= B/R_0 \\ \tilde{\alpha} &= B/D_0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 s 、 n 、 z はそれぞれ流下方向、横断方向、鉛直方向の座標軸、 u 、 v は s 、 n 方向の流速、 R は流線に添った曲率半径、 H は水位、 D は水深、 U 、 V は水深平均の u 、 v 、 τ_s 、 τ_n は s 、 n 方向の河床せん断力である。

また、 k_1 、 k_2 、 k_3 は主流と2次流の相互干渉を表す係数であるが、これを求めるためには2次流の強度を算定する必要がある。ここではJohannesson and Parker³⁾、Ikeda and Nishikawa⁴⁾らと同様に水路中心軸にそって以下の2次流の輸送方程式を仮定して、これを数値的に解くことにより2次流強度 Γ を求める。

$$u_0 \frac{\partial \Gamma}{\partial s} - \frac{u_0^2}{\partial s} = -\frac{\partial H_1}{\partial n} + \alpha \sqrt{C_0} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(v \frac{\partial \Gamma}{\partial \zeta} \right) \quad (5)$$

ここで、 Γ 及び H_1 は v 及び H を v で摂動展開した時($v=0+\nu\Gamma$, $H=H_0+\nu H_1$)の ν に対する1次オーダーの係数であり、 u_0 は主流の鉛直分布(ここでは対数則を用いる)である。 $\partial H_1/\partial n$ は $\int_{\zeta_1}^1 \Gamma d\zeta = 0$ および $\Gamma(\zeta = \zeta_0) = 0$ の条件より求める。得られた Γ の分布より、 k_1 、 k_2 、 k_3 は次式のように表される。

$$k_1 = \int_{\zeta_0}^1 \Gamma^2 d\zeta, \quad k_2 = \int_{\zeta_0}^1 u_0 \Gamma d\zeta, \quad k_3 = \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial \zeta} \frac{\partial u_0}{\partial \zeta} \right]_{\zeta=\zeta_0}^{\zeta=\zeta_0} \quad (6)$$

河床せん断力 τ_s 、 τ_n は水深平均流速を用いて以下のように表される。

$$\tau_s = C_0 U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \tau_n = C_0 (V + \alpha U k_3) \sqrt{U^2 + V^2} \quad (7)$$

ただし、 C_0 は河床抵抗係数であり、Engelund and Hansenによる次式を用いる。

$$C_0^{-\frac{1}{2}} = 6 + 2.5 \ln \left(\frac{D}{2.5 d_s} \right) \quad (8)$$

ここで、 d_s は平均粒径である。

(2) 混合粒径による河床変動モデル⁵⁾

1) 粒径別の掃流砂量式

粒径別の掃流砂量 Q_{sk} には、粒径別に拡張された芦田・道上の式を用いる。横断方向の掃流砂量 Q_{nk} には、長谷川の式を用いる。ただし、 k は第 k クラスの粒径区分を示すパラメータである。

2) 粒径別の浮遊砂基準点濃度と砂粒の浮上量式

粒径別の浮遊砂の基準点濃度 c_{bk} 及び砂粒の浮上量 q_{suk} には、板倉の式を粒径別に拡張したものを、沈降速度 w_{fk} はRubeyの式を用いる。

3) 全流砂量の連続式

全流砂量の連続式を式(9)に、粒度分布 P_k の連続式を式(10)にそれぞれ示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\Theta}{1-\lambda} \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial t} + \frac{P_k^*}{a} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\Theta}{a(1-\lambda)} = 0 \quad (10)$$

$$\Theta = \sum_k q_{suk} - \sum_k w_{fk} c_{bk} + \frac{\partial(\sum_k Q_{sk})}{\partial s} + \frac{\partial(\sum_k Q_{nk})}{\partial n} \quad (11)$$

ただし、 λ は河床材料の空隙率、 η は河床高、 P_k^* には、堆積の場合は交換層中の粒度分布を、洗掘かつ洪水中に最も掘れた河床高以下の場合は初期粒度分布を、それ以外の場合はそれまでに堆積した土砂の粒度分布を用いる。

(3) 流速及び浮遊砂濃度の水深方向分布を考慮した浮遊砂濃度の連続式²⁾⁶⁾

本研究では円筒座標系を仮定し、流速 u 、 v 、浮遊砂濃度 c の水深方向分布を考慮した次式の流線方向の浮遊砂濃度連続式を考えることとした。ただし、次式以降は無次元化せず、一様粒径を想定し記載する。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(CD)}{\partial t} + N \frac{\partial(UCD)}{\partial s} + N \frac{\partial}{\partial s} \int_{z_b}^H u'(z) c'(z) dz \\ & + \frac{\partial}{\partial n} \int_{z_b}^H v'(z) c(z) dz + \frac{N}{R} \int_{z_b}^H v'(z) c(z) dz = q_{su} - w_f c_b \end{aligned} \quad (12)$$

q_{su} 、 w_f は砂粒の浮上量と沈降速度、 c_b は浮遊砂の基準点濃度である。また、 u' 、 v' 、 c' はそれぞれ水深方向の平均量 U 、 V 、 C からの変動成分である。ここで、Engelund⁷⁾による主流と横断方向の流速分布を仮定すると、 v' は式(13)であらわされ、式(12)は最終的に式(14)となる。

$$v'(z) = V_s \left\{ A_* \left(\frac{\alpha_*}{2} \zeta^2 + \frac{\beta_*}{6} \zeta^4 - \frac{\beta_*^2}{30} \zeta^6 \right) + 1 \right\} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(CD) + N \frac{\partial}{\partial s}(CUD) + \frac{\partial}{\partial n} \left(CUD \frac{D}{r} \theta \right) \\ & + \frac{N}{R} \left(CUD \frac{D}{r} \theta \right) = q_{su} - w_f c_b \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、

$$V_s = \frac{6\varphi}{A_*\kappa} \left(\frac{3}{3-\beta_*} \right)^2 \frac{D}{r} U \quad (15)$$

$$\zeta = \frac{D-z}{D} \quad (16)$$

$$\theta = \Omega \frac{6\varphi}{A_*\kappa} \left(\frac{3}{3-\beta_*} \right)^2 \frac{\beta}{1-e^{-\beta}} \quad (17)$$

$$A_* = 1 / \left(-\frac{\alpha_*}{6} - \frac{\beta_*}{30} + \frac{\beta_*^2}{210} \right) \quad (18)$$

$$\alpha_* = \beta_* \left(\frac{2}{3} - \frac{3}{5}\beta_* + \frac{1}{7}\beta_*^2 \right) / \left(\left(\frac{\beta_*}{3} - 1 \right) \right), \quad (19)$$

$$\beta_* = \frac{3}{\kappa\varphi + 1}$$

$$\begin{aligned} \Omega = e^\beta & \left[c_*\beta^6 - 6c_*\beta^5 + (b_* + 30c_*)\beta^4 \right. \\ & - (4b_* + 120c_*)\beta^3 + (a_* + 12b_* + 360c_*)\beta^2 \\ & - (2a_* + 24b_* + 720c_*)\beta \\ & \left. + (2a_* + 24b_* + 720c_* + d_*) \right] \\ & - 2a_* - 24b_* - 720c_* - d_* \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} a_* &= \frac{A_*\alpha_*}{2\beta^3 e^\beta}, b_* = \frac{A_*\beta_*}{6\beta^5 e^\beta}, \\ c_* &= -\frac{A_*\beta_*^2}{30\beta^7 e^\beta}, d_* = \frac{1}{\beta e^\beta} \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $\beta = w_p D / \varepsilon$ 、 ε 渦動粘性係数 ($= \kappa u_* D / 6$)、 κ はカルマン定数、 φ は流速係数 ($= U / u_*$) である。

3. 単一粒径・平坦河床における比較

(1) 計算条件

ここでは、後述する石狩川河口付近の蛇行部と概ね同じ水路幅(200m)、河床勾配(1/4000)、曲率半径(700~900m)の単一粒径・平坦河床水路において、二次流強度を考慮した影響及び二次流による浮遊砂の変形を考慮した影響の比較を行った。

計算条件を表-1に示す。また、計算ケースは式(6)の Γ をゼロとし二次流強度を考慮しない場合をCase1-1、二次流強度は考慮するが式(14)の左辺第3,4項をゼロとし二次流による浮遊砂の変形を考慮しない場合をCase1-2、二次流強度と二次流による浮遊砂の変形を両方考慮する場合をCase1-3とする。なお、計算時間は12時間とした。

(2) 計算結果と考察

本モデルは平面的2次元モデルであるため、鉛直方向の流速分布及び浮遊砂濃度分布は計算していないが、本モデルで仮定したn軸方向の鉛直方向の分布は、式(13)を用いることで示すことはできる。図-1の流速・浮遊砂濃

表-1 計算条件

流量	6000m ³ /s
マニングの粗度係数	0.018
河床材料	0.3mm(単一粒径)
下流端	等流起算
上流端	動的平衡

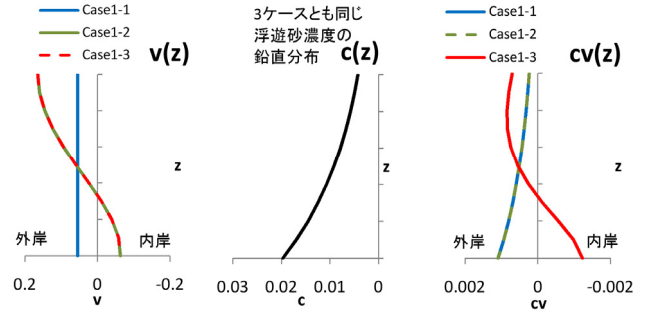


図-1 流速・浮遊砂濃度の鉛直分布 (n軸方向)

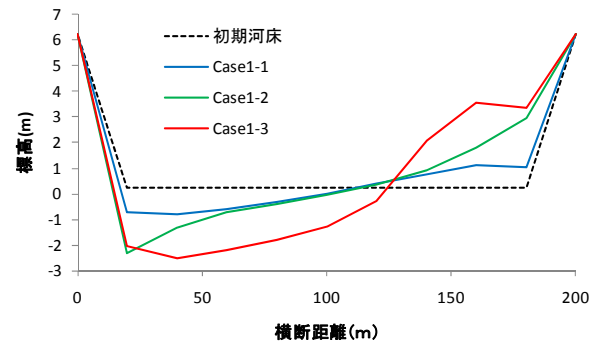


図-2 河床高横断面図(下流から1100m地点・12時間後)

度の鉛直分布をみると、Case1-2、Case1-3では、n軸方向流速の鉛直分布 $v(z)$ は二次流により変形するため、河床近傍の流速と河床せん断力は内岸側に作用する。

また、n軸方向の浮遊砂濃度のフラックスをあらわす $cv(z)$ の鉛直分布をみると、Case1-2は流速分布 $v(z)$ を鉛直方向に積分した後、浮遊砂濃度分布 $c(z)$ をかけるため、Case1-1と概ね同じになる。これに対しCase1-3は $v(z)$ と $c(z)$ をかけた後鉛直方向に積分するため、浮遊砂濃度はCase1-1、Case1-2に比べ内岸側に移流し易くなる。

そのため、図-2の河床高横断面図及び図-3の河床変化高コンター図をみると、二次流強度を考慮していないCase1-1に比べ、二次流強度を考慮したCase1-2は、蛇行部において外岸側がより洗掘し、内岸側はより堆積している。これは、n軸方向の河床せん断力に含まれる二次流の効果により、流砂の外岸側から内岸側へ移動が考慮されたためである。

また、二次流による浮遊砂の変形を考慮したCase1-3では、外岸側の洗掘と内岸側の堆積がより顕著となった。これは、図-4の浮遊砂濃度コンター図に示すように、二次流による浮遊砂の変形を考慮することにより、浮遊砂濃度が内岸側により集中したためである。池田ら⁸⁾が蛇行水路で行った三次元流れの理論安定河床解析においても同様に、外岸側の洗掘深が増加する結果となっている。

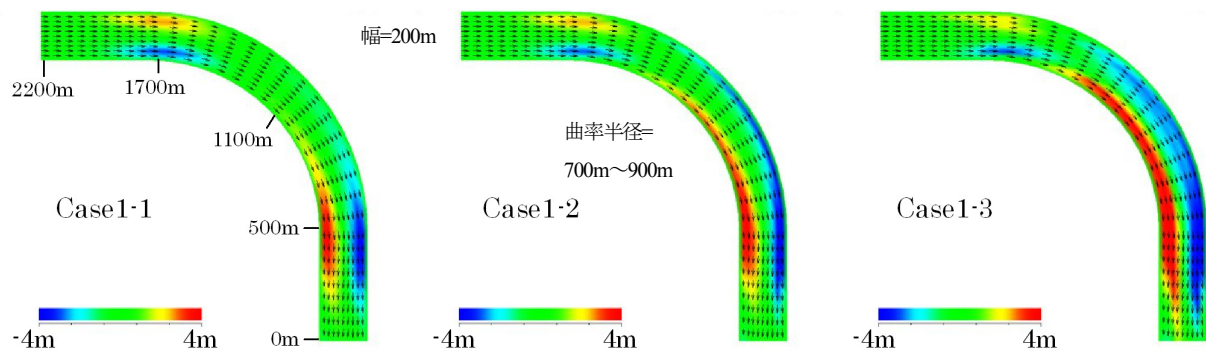


図-3 河床変化高コンター図

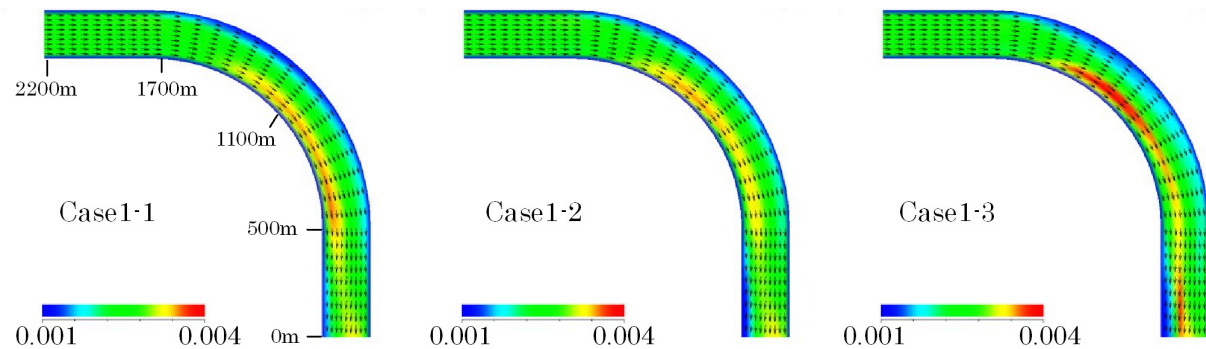


図-4 浮遊砂濃度コンター図

4. 混合粒径・自然河道における比較

(1) 計算条件

ここでは、洪水時の十分な実測データを有する⁹⁾ 石狩川河口付近の昭和56年8月上旬洪水を用いて混合粒径・自然河道の例として比較検討を行った。

石狩川河口付近の河道形状及び計算格子を図-5に示す。河道の初期河床は、洪水前の昭和56年5月測量時の河床形状とした。流量は、図-6のように昭和56年8月上旬洪水流量ハイドロを分割し、その分割時間内の平均値により時系列データを作成し設定した。河床材料は混合粒径として扱い、初期河床材料は昭和54年調査を基に設定した。なお、深さ方向については、観測資料が無かったため初期粒度分布は一定とした。低水路の粗度係数は河床抵抗則^{10) 11)} から算出した粗度係数を用いた。高水敷の粗度係数は0.050を用いた。下流端は、海域まで拡張し下流端で近傍の小樽港潮位(図-6)を与えた。上流端は、河口から18km地点とし動的平衡状態を仮定した。昭和56年洪水前後で大規模な側方侵食は発生しなかったため、側方侵食は未考慮とした。

計算ケースは二次流強度を考慮しない場合をCase2-1、二次流強度は考慮するが二次流による浮遊砂の変形を考慮しない場合をCase2-2、二次流強度と二次流による浮遊砂の変形を両方考慮する場合をCase2-3とする。

(2) 計算結果

図-7の河床高横断面図及び図-8の河床変化高コンター図をみると、二次流強度を考慮しなかったCase2-1に比べ、二次流強度を考慮したCase2-2及びCase2-3は、河口から

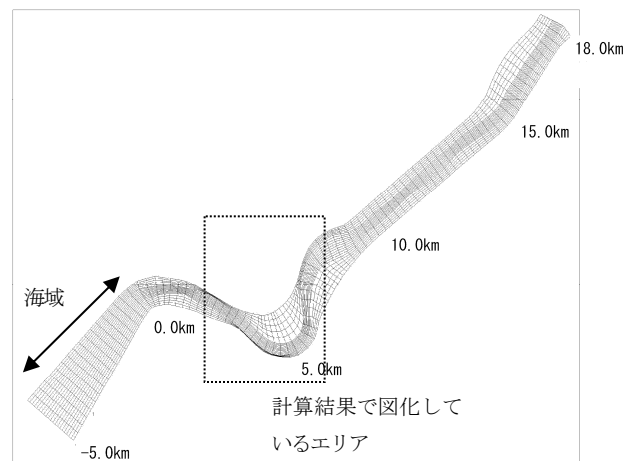


図-5 石狩川河口付近(計算格子)

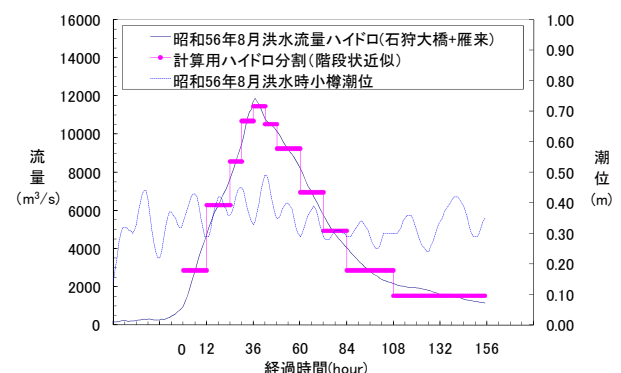


図-6 昭和56年8月洪水流量ハイドログラフ

5km付近の河床高の再現性が良くなっている。

しかしながら、二次流による浮遊砂の変形を考慮しなかったCase2-2と二次流による浮遊砂の変形を考慮した

Case2-3を比べると、Case2-3の方が若干内岸側の堆積が多いが、明確な差はみられなかった。これは、Case1-3の堆積が浮遊砂によって発生しているのに対しCase2-3の堆積は掃流砂によって発生したためである（図-10）。

図-11の平均粒径コンター図及び図-12の粒径加積曲線を見ると、洪水初期に細かい粒径はほとんど浮上し、洪水ピーク付近において表層は浮上しない粒径でアーミングされ、洪水減衰期には浮遊砂による河床変動によって内岸側の粒径は細かくなることがわかる。

つまり、河床変動が最も大きい洪水ピーク付近では、

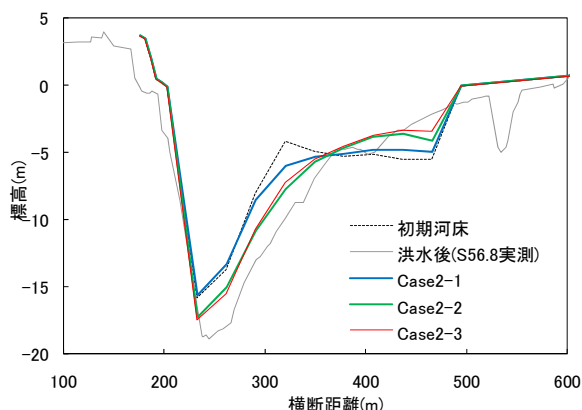


図-7 河床高横断面図（河口から5km地点）

アーミングによって浮遊砂が十分に発生しなかったため、二次流による浮遊砂濃度分布の変形を考慮した効果が十分に出なかったと考えられる。

また、浮遊砂が十分に発生していない状況では影響は少ないと思われるが、本モデルでは、流れは準定常として扱い、流速場の収束計算と河床変動計算を繰り返しているため、流量下降期における浮遊砂濃度の非平衡性を十分に再現出来ていないことも、効果が十分に出なかった一因と考えられる。

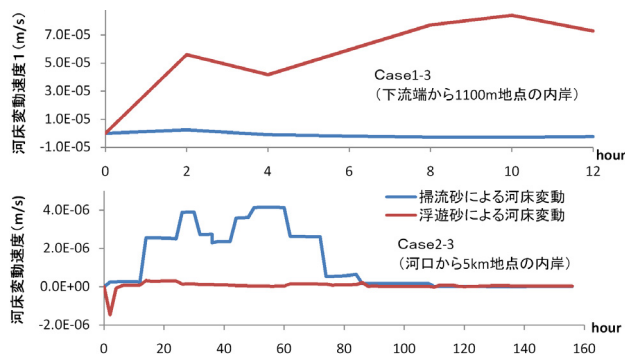


図-10 河床変動速度（掃流砂と浮遊砂）

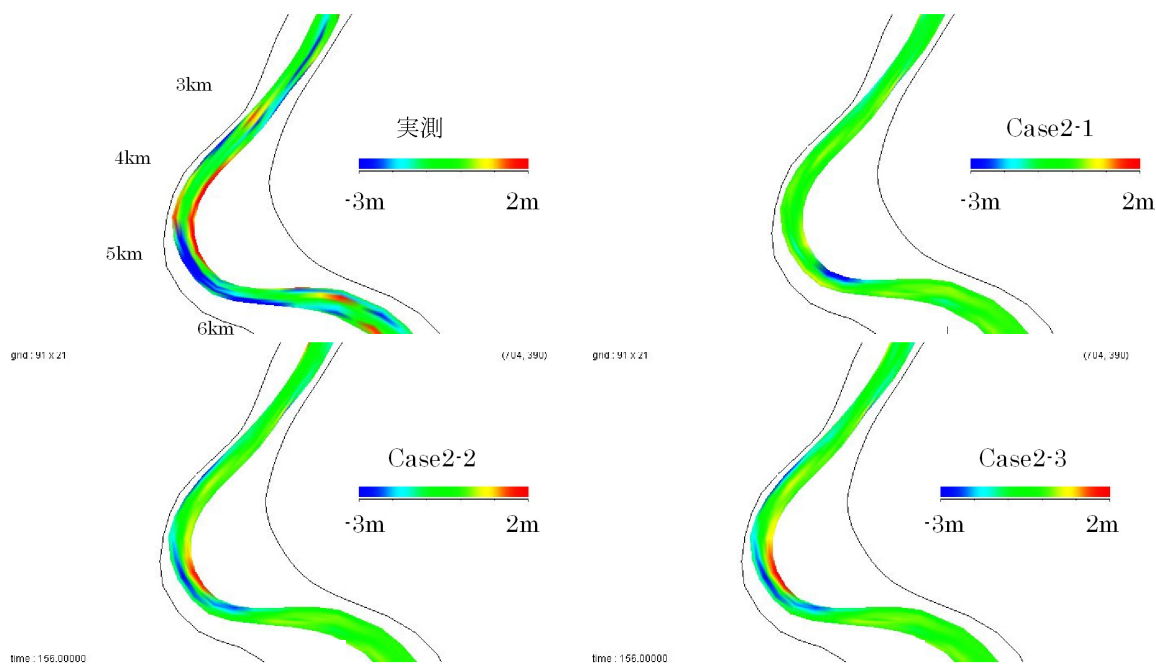


図-8 河床変化高コンター図

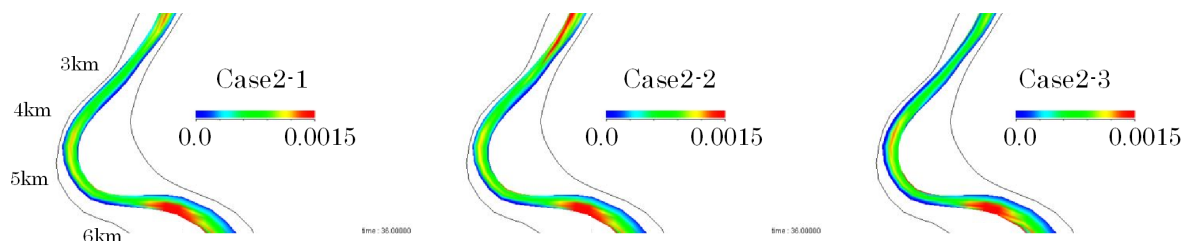


図-9 浮遊砂濃度コンター図（洪水ピーク時）

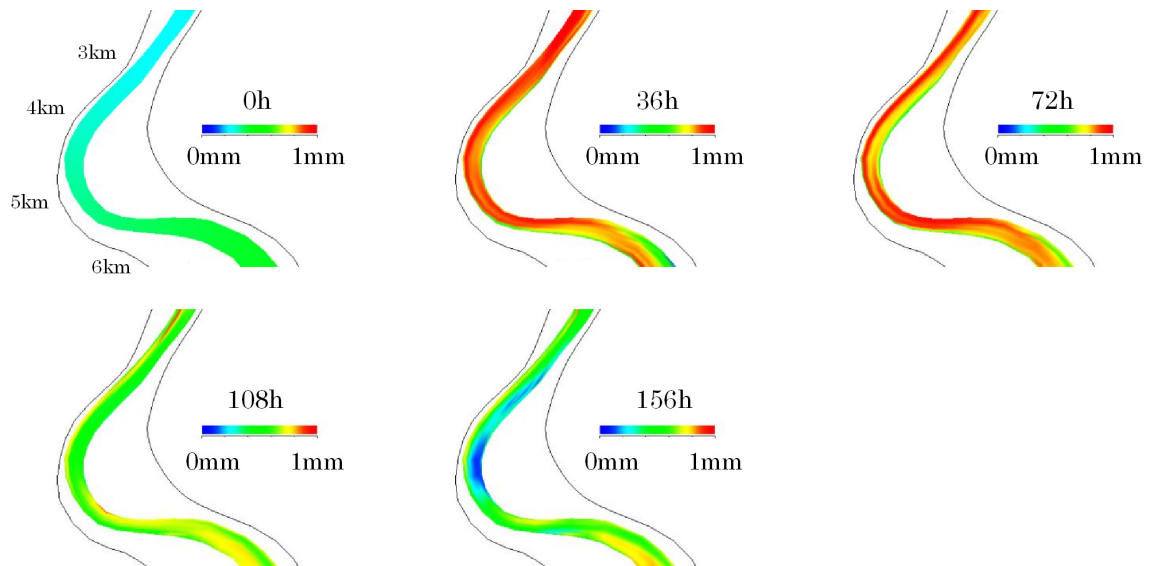


図-11 平均粒径コンター図 (Case2-3)

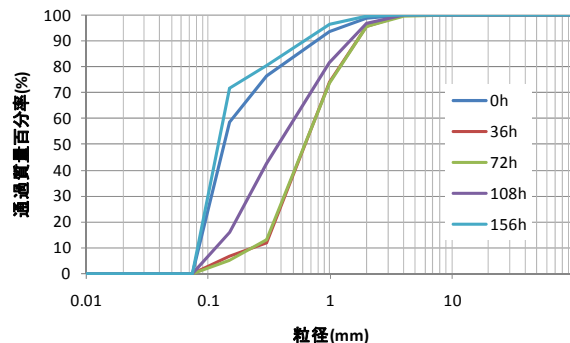


図-12 粒径加積曲線 (河口から5km地点の内岸)

5. まとめ

本論文で得られた成果を以下に整理する。

- 単一粒径・平坦河床においては、二次流強度を考慮しなかった場合、二次流強度を考慮した場合、二次流による浮遊砂の変形を考慮した場合の順で内岸側の堆積と外岸側の洗掘が顕著になった。
- 混合粒径・自然河道の場合（石狩川河口付近・昭和56年洪水）、二次流強度を考慮すると考慮しない場合に比べ再現性が良くなった。
- 混合粒径・自然河道の場合（石狩川河口付近・昭和56年洪水）、洪水ピーク付近の河床材料がアーミングされ十分に浮遊砂濃度が上昇しなかったため、二次流による浮遊砂の変形の効果は明確に出なかった。

本研究では、河床材料の深さ方向について、洪水中に最も掘れた河床高以下の層と堆積層と交換層の3層を考慮し、交換層厚は最大粒径で設定している。しかし、アーミングによって浮遊砂濃度分布の変形の効果が出なかったことを考えると、交換層厚についてのより詳細な検討と、洪水中の深さ方向の粒径分布を時系列的に記

憶できる多層モデルへの発展が必要と考える。

今後は、混合粒径における二次流による浮遊砂の変形の影響について実験と比較し検証を行いたい。

参考文献

- 清水康行, Marco Tubino, 渡邊康玄: 自由砂州と交互砂州の共鳴条件における河床変動計算, 水工学論文集第36巻, 1992
- 伊東祐一郎, 清水康行: 浮遊砂混在平面2次元一般座標モデルと石狩川模型実験の再現計算によるその検証, 水工学論文集, 2003
- Johannesson, H. and Parker G.: Secondary Flow in a Mildly Sinuous Channel, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.115, No.3, 1989.
- Ikeda, S. and Nishimura, T.: Flow and Bed Profile in Meandering Sand-Silt Rivers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.112, No.7, 1985.
- 清水康行: 沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 北海道開発局開発土木研究所 (現北海道開発土木研究所) 河川研究室編, 1991
- 濱木道大, 井上卓也, 川村嘉勝, 荒井信行, 江崎國夫, 大山孝, 清水康行: 浮遊砂濃度分布を考慮した河口付近の準3次元河床変動計算, 河川技術論文集vol.9, 2003
- Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Cannel Bends, Jour. of Hydraulic Div., ASCE, Vol.100, HY11, pp.1631-1648, 1974.
- 池田駿介, 西村達也: 砂床蛇行河川の三次元流れと河床形状, 土木学会論文集第365Ⅱ-5, 1986
- 竹本成行, 高木譲治, 牧野成雄, 森田康志: 石狩川下流部における洪水観測について(第2報), 河川に関する調査・試験・研究報告書, 北海道開発局土木試験所河川研究室, 1982
- 岸力, 黒木幹男: 移動床流における河床形状と流体抵抗(Ⅰ), 工学部研究報告第67号, 北海道大学, 1973
- 清水康行, 板倉忠興: 浮遊砂を考慮した河床変動計算手法, 土木試験所月報No.396, 北海道開発局土木試験所河川研究室, 1986.

(2009. 12. 18受付)