二次流の影響を考慮した水深積分モデルによる蛇行流路における浮遊砂輸送に関する数値計算

COMPUTATIONS OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN MEANDERING CHANNELS USING DEPTH-AVERAGED MODELS WITH EFFECT OF SECONDARY CURRENTS

萩原　佳祐[1]・木村　一郎[2]・清水　康行[3]・清治　真人[4]
Keisuke HAGIWARA, Ichiro KIMURA, Yasuyuki SHIMIZU, Masato SEIJI

[1]学生会員　北海道大学大学院工学研究科修士課程学生　（〒060-8628　札幌市北区北13条西8丁目 ）
[2]正会員　工博　北海道大学大学院工学研究科准教授　（〒060-8628　札幌市北区北13条西8丁目）
[3]正会員　工博　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）
[4]正会員　（財）建設物価調査会理事長　（〒103-0011　東京都中央区日本橋大伝馬町11-8）

This paper describes the numerical study on applicability of 2D depth-averaged models including effects of secondary currents to meandering open channel flows. The secondary current of 1st kind at curved flow regions are recognized to have dominant effects on flow structures as well as bed topography. The normal 2D depth averaged model without effects of secondary current may not be applicable for such flow fields. We compared the performance of 4 different types of depth-averaged 2D models with and without effect of secondary current for computing flow and suspended sediment. In the models with effects of secondary current, the influence of lag between the streamline curvature and development of secondary current is clarified. The more sophisticated model with effect of deformation of mean velocity profile due to the secondary current, which has recently been proposed by Onda et al (2006)[2)] are also tested. The 4 models are applied to experimental observations of simple periodically meandered channel, which is generated with sine-generated curve, and the fundamental model features are compared.

Key Words : *2D depth-averaged models, secondary current, 4 different models, Suspended sediment, lag, mean velocity profile, experiment, sine-generated curve*

1．はじめに

環境問題や河川工学の側面から蛇行河川の河道形態変動を予測することは非常に重要なことである．蛇行河道の乱流構造は二次流によって特徴づけられ，流れ場に複雑な乱流を発生させることで流下方向のみならず，横断方向への浮遊砂輸送にも影響を及ぼすことが知られている．また，二次流は三次元構造をもつ流れであり，三次元モデルで再現されるのが一般的であるが，三次元計算は計算機器の発達した今日においても非常に計算負荷の高いものであるため，水深積分モデルを用い，二次流を考慮した二次元計算での再現が望まれる．このような二次元モデルはKalkwijk & de Vriend (1980)[1)]によって最初に提唱されて以来，Hosoda ら(2001)[8)]のラグを組み込んだモデル，Onda ら(2006)[2)]の二次流による流速分布形変化を考慮したモデルなどが提案され高機能化が進んでいる（ここに，ラグとは流線の曲がりに対する二次流発達の遅れを意味し，以下「ラグ」と称する．）これらのモデルは三次元計算よりも計算負荷の低い二次元モデルを実河川規模の計算に適応させているため，随所に工夫が必要とされる．また，実河川や実験データへの適応例はまだ少なく，今後様々な条件でモデルの妥当性を検証していく必要がある．本研究では水深積分モデルを用い，流れ構造と浮遊砂輸送を以下に示す四つのモデルを用いて再現することとする．

Model 1: 二次流の影響を考慮しない二次元モデル.
Model 2: 二次流は考慮するが，ラグは考慮しない二次元モデル.
Model 3: 二次流と，ラグの両方を考慮する二次元モデル.
Model 4: 二次流，ラグ，二次流による流速分布形変化も考慮した二次元モデル.

本研究での二次元モデルは一般座標系[2)]に基づいており，同時計算される粒子は浮遊砂のみを対象としている．これらのモデルを単純な蛇行流路実験との比較によって整合性を検証することとする．なお，計算と実験

は共に初期河床を固定床とし，浮遊砂が堆積するのみで浸食は起こらないものとする．

２．計算モデル

(1) 基礎式

支配方程式は一般座標化された水深積分の浅水流方程式が用いられており，これは連続式，運動方程式，浮遊砂輸送式，河床の連続式により構成されている．また浮遊砂が流れに与える影響はここでは無視している．

[連続式]

$$\frac{1}{J}\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\hat{M}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\hat{N}}{J}\right)=0 \tag{1}$$

[主流方向運動方程式]

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Q^{\xi}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \xi}\left(U\frac{Q^{\xi}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(V\frac{Q^{\xi}}{J}\right)\\
&-\frac{M}{J}\left(U\frac{\partial \xi_x}{\partial \xi}+V\frac{\partial \xi_x}{\partial \eta}\right)-\frac{N}{J}\left(U\frac{\partial \xi_y}{\partial \xi}+V\frac{\partial \xi_y}{\partial \eta}\right)\\
&=-gh\left(\frac{\xi_x^2+\xi_y^2}{J}\frac{\partial z_s}{\partial \xi}+\frac{\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y}{J}\frac{\partial z_s}{\partial \eta}\right)-\frac{\tau_b^{\xi}}{\rho J}\\
&+\frac{\xi_x^2}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}\left(-\overline{u'^2}h\right)+\frac{\xi_x\eta_x}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(-\overline{u'^2}h\right)+\frac{\xi_y^2}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}\left(-\overline{v'^2}h\right)\\
&+\frac{\xi_y\eta_y}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(-\overline{v'^2}h\right)+\frac{\xi_x\eta_y+\xi_y\eta_x}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(-\overline{u'v'}h\right)\\
&+\frac{2\xi_x\xi_y}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}\left(-\overline{u'v'}h\right)-\xi_x\left(S_{\xi 1}+S_{\xi 2}+S_{\xi 3}+S_{\xi 4}\right)\\
&-\xi_y\left(S_{\eta 1}+S_{\eta 2}+S_{\eta 3}+S_{\eta 4}\right)
\end{aligned} \tag{2}$$

[横断方向運動方程式]

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Q^{\eta}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \xi}\left(U\frac{Q^{\eta}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(V\frac{Q^{\eta}}{J}\right)\\
&-\frac{M}{J}\left(U\frac{\partial \xi_x}{\partial \xi}+V\frac{\partial \xi_x}{\partial \eta}\right)-\frac{N}{J}\left(U\frac{\partial \xi_y}{\partial \xi}+V\frac{\partial \xi_y}{\partial \eta}\right)\\
&=-gh\left(\frac{\eta_x^2+\eta_y^2}{J}\frac{\partial z_s}{\partial \eta}+\frac{\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y}{J}\frac{\partial z_s}{\partial \xi}\right)-\frac{\tau_b^{\eta}}{\rho J}\\
&+\frac{\eta_x^2}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(-\overline{u'^2}h\right)+\frac{\xi_x\eta_x}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}\left(-\overline{u'^2}h\right)+\frac{\eta_y^2}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(-\overline{v'^2}h\right)\\
&+\frac{\xi_y\eta_y}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}\left(-\overline{v'^2}h\right)+\frac{\xi_x\eta_y+\xi_y\eta_x}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}\left(-\overline{u'v'}h\right)\\
&+\frac{2\eta_x\eta_y}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}\left(-\overline{u'v'}h\right)-\eta_x\left(S_{\xi 1}+S_{\xi 2}+S_{\xi 3}+S_{\xi 4}\right)\\
&-\eta_y\left(S_{\eta 1}+S_{\eta 2}+S_{\eta 3}+S_{\eta 4}\right)
\end{aligned} \tag{3}$$

[浮遊砂輸送式]

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial t}(\bar{c}h)+\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\bar{c}}{J}\hat{M}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\bar{c}}{J}\hat{N}\right)=\frac{1}{J}w_0(c_{be}-c_b)\\
&+\left\{hD_{LS}\left(\frac{\xi_x{}^2\cos^2\theta+2\xi_x\xi_y\sin\theta\cos\theta+\xi_y{}^2\sin^2\theta}{J}\frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi}\right.\right.\\
&\left.\left.+\frac{\xi_x\eta_x\cos^2\theta+(\xi_x\eta_y+\xi_y\eta_x)\sin\theta\cos\theta+\xi_y\eta_y\sin^2\theta}{J}\times\frac{\partial \bar{c}}{\partial \eta}\right)\right\}\\
&\frac{\partial}{\partial \xi}+\frac{\partial}{\partial \eta}\left\{hD_{LS}\right.\\
&\times\left(\frac{\xi_x\eta_x\cos^2\theta+(\xi_x\eta_y+\xi_y\eta_x)\sin\theta\cos\theta+\xi_y\eta_y\sin^2\theta}{J}\times\frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi}\right.\\
&\left.\left.+\frac{\eta_x{}^2\cos^2\theta+2\eta_x\eta_y\sin\theta\cos\theta+\eta_y{}^2\sin^2\theta}{J}\frac{\partial \bar{c}}{\partial \eta}\right)\right\}\\
&+\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\xi_xC_x+\xi_yC_y}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\eta_xC_x+\eta_yC_y}{J}\right)
\end{aligned} \tag{4}$$

[河床の連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{z_b}{J}\right)+\frac{1}{1-\lambda}\left(\frac{1}{J}\omega_0\left(c_{be}-c_b\right)\right)=0 \tag{5}$$

ここに，(x,y)：デカルト座標系，(u,v)：(x,y)方向の速度，(ξ,η)：一般座標系，t：時間，h：水深，$(\xi_x,\xi_y,\eta_x,\eta_y)$：行列，$J$：ヤコビアン，$(M,N)$：流量フラックスベクトル，$(Q^{\xi},Q^{\eta})$：単位幅流量フラックスベクトルの反変成分，$(U,V)$：速度ベクトルの反変成分，$g$：重力加速度，$z_s$：水位，$(\tau_b{}^{\xi},\tau_b{}^{\eta})$：底面せん断力の反変成分，$\rho$：水の密度，$\bar{c}$：水深平均の浮遊砂密度，$w_0$：浮遊砂の沈降速度，$-\overline{u'^2},-\overline{u'v'},-\overline{v'^2}$：レイノルズ応力テンソル，$\theta$：$x$軸に対する流線の傾きの角度，$C_x$，$C_y$：二次流の影響を示すが，これについては後述することとする．

$$\begin{aligned}
&U=\xi_x u+\xi_y v \quad , \quad V=\eta_x u+\eta_y v\\
&\hat{M}=\xi_x M+\xi_y N, \quad \hat{N}=\eta_x M+\eta_y N
\end{aligned} \tag{6}$$

底面せん断力ベクトルの各方向成分は以下の(7)式で示される．

$$\tau_b^{\xi}=\frac{\rho g n^2}{h^{\frac{4}{3}}}U\sqrt{u^2+v^2}\ ; \quad \tau_b^{\eta}=\frac{\rho g n^2}{h^{\frac{4}{3}}}V\sqrt{u^2+v^2} \tag{7}$$

ここに n：マニングの粗度係数．(8)式で示されるゼロ方程式モデルはレイノルズ応力テンソルを評価する方程式である．(Kimura & Hosoda , 1997)[6)].

$$-\overline{u_i'u_j'}=D_h\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\delta_{ij}\ , \quad D_h=\alpha h u_* \tag{8}$$

ここに，α：経験的係数（本研究では$\alpha = 0.2$とする）u_*： 摩擦速度($\equiv\sqrt{f(u^2+v^2)/2}$)，$k$: Nezu & Nakagawa (1993)[4]によって提案された経験式に基づく水深積分の乱流運動エネルギー．(9)式は乱流運動エネルギー分布を与える．

$$\frac{k}{u_*^2} = 4.78\exp\left(-2\frac{z}{h}\right) \tag{9}$$

ここに，z：河床底面からの鉛直距離．(9)式の水深積分の乱流運動エネルギーは，水深方向に積分することで以下の(10)式のように表わすことができる．

$$k = 2.07{u_*}^2 \tag{10}$$

$\sin\theta$，$\cos\theta$は以下のように求めることができる．

$$\sin\theta = \frac{|v|}{\sqrt{u^2+v^2}},\ \cos\theta = \frac{|u|}{\sqrt{u^2+v^2}} \tag{11}$$

対流拡散係数と渦拡散係数は以下のように与えられる．

$$D_{LS} = 5.93hu_* \tag{12}$$

河床付近の浮遊砂濃度c_bは以下のように与えられる．

$$c_b = \frac{\beta c}{1-e^{-\beta}},\ \beta = \frac{w_0 h}{\varepsilon_s} \tag{13}$$

ここに，ε_s：渦拡散係数の鉛直方向成分，水平方向成分は渦動粘係数と等価とされている．

$$\varepsilon_s = \frac{\gamma\kappa u_* h}{6} \tag{14}$$

ここに，(13)，(14)式で用いられている κ，γはそれぞれ 定数で，ここではκ =0.41 (カルマン係数)，γ =1.0としている．また βは以下の(15)式で求められる．

$$\beta = \frac{w_0 h}{\varepsilon_s} = \frac{6w_0 h}{\gamma\kappa u_* h} = \frac{15w_0}{u_*} \tag{15}$$

(13)式における c_{be}は検査領域における浮遊砂濃度を示し，芦田・道上式 (Nagataら，2005)[9]によって評価される．

$$c_{be} = 0.025\left\{\frac{g(\zeta_0)}{\zeta_0} - G(\zeta_0)\right\} \tag{16}$$

ここに，

$$\begin{aligned}&\zeta_0 = \frac{4w_0}{3u_*},\quad g(\zeta_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-0.5{\zeta_0}^2\right)\\ &G(\zeta_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{\zeta_0}^{\infty}\exp(-0.5\zeta^2)d\zeta\end{aligned} \tag{17}$$

(2) 二次流のモデル

二次流の影響で付加される項，$S_{\xi1}, S_{\xi2}, S_{\xi3}, S_{\xi4}, S_{\eta1}, S_{\eta2}, S_{\eta3}, S_{\eta4}, C_x, C_y$は以下の(18)式で求められる．

$$\begin{aligned}
S_{\xi1} &= -C_{sn}\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\frac{1}{J}\left(\xi_x A_n\overline{u_s}h\sin 2\theta - \xi_y A_n\overline{u_s}h\cos 2\theta\right)\right]\\
S_{\xi2} &= -C_{sn}\frac{\partial}{\partial\eta}\left[\frac{1}{J}\left(\eta_x A_n\overline{u_s}h\sin 2\theta - \eta_y A_n\overline{u_s}h\cos 2\theta\right)\right]\\
S_{\xi3} &= C_{n2}\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\frac{1}{J}\left(\xi_x {A_n}^2 h\sin^2\theta - \xi_y {A_n}^2 h\cos\theta\sin\theta\right)\right]\\
S_{\xi4} &= C_{n2}\frac{\partial}{\partial\eta}\left[\frac{1}{J}\left(\eta_x {A_n}^2 h\sin^2\theta - \eta_y {A_n}^2 h\cos\theta\sin\theta\right)\right]\\
S_{\eta1} &= C_{sn}\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\frac{1}{J}\left(\xi_x A_n\overline{u_s}h\cos 2\theta + \xi_y A_n\overline{u_s}h\sin 2\theta\right)\right]\\
S_{\eta2} &= C_{sn}\frac{\partial}{\partial\eta}\left[\frac{1}{J}\left(\eta_x A_n\overline{u_s}h\cos 2\theta + \eta_y A_n\overline{u_s}h\sin 2\theta\right)\right]\\
S_{\eta3} &= -C_{n2}\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\frac{1}{J}\left(\xi_x {A_n}^2 h\sin\theta\cos\theta - \xi_y {A_n}^2 h\cos^2\theta\right)\right]\\
S_{\eta4} &= -C_{n2}\frac{\partial}{\partial\eta}\left[\frac{1}{J}\left(\eta_x {A_n}^2 h\sin\theta\cos\theta - \eta_y {A_n}^2 h\cos^2\theta\right)\right]
\end{aligned} \tag{18}$$

$$C_x = -c_{cn}A_n\bar{c}h\sin\theta,\ C_y = c_{cn}A_n\bar{c}h\cos\theta$$

C_{s2}, C_{sn}, C_{n2}はモデル係数で，流速分布の式を用いて表わされる．

$$C_{s2} = \int_0^1 f_s(\zeta)^2 d\zeta,\quad C_{sn} = \int_0^1 f_s(\zeta)f_n(\zeta)d\zeta$$

$$C_{n2} = \int_0^1 f_n(\zeta)^2 d\zeta \tag{19}$$

ここに，

$$u_s(\zeta) = \bar{u}_s f_s(\zeta),\ u_n(\zeta) = A_n f_n(\zeta),\ \zeta = \frac{z}{h} \tag{20}$$

Hosoda ら(2001)[8]のこの係数はEngelund (1974)[5]によって提唱された流速の分布形に由来する．また，Onda (2004)[10]は二次流の影響による流速の分布形変化を考慮した．係数c_{cn}は以下のように与えられる．

$$\bar{c}\cdot c_{cn} = \int_0^1 f_n(\zeta)\left[1 - f_c(\zeta)\right]d\zeta \tag{21}$$

ここに，$f_c(\zeta)$は鉛直方向の浮遊砂の密度分布を説明する関数で，指数関数を用いて以下のように表わされる．

$$f_c(\zeta) = \frac{\beta e^{-\beta\zeta}}{1-e^{-\beta}} \tag{22}$$

(3) モデル係数A_nの評価

A_nはラグを無視するモデルにおいて二次流強度を表わす係数であり，以下の(23)式で与えられる．

$$A_n = \frac{\overline{u}_s h}{R} \tag{23}$$

ここに，R：流れの曲率半径．Hosoda ら(2001)[8]は，流路の曲がりと二次流の間に生じるラグを導入することで，より実現象に近いモデルを提唱した．このモデルでは，二次流の発達の遅れと曲率半径から生まれる二次流強度の減衰を考慮することができる．そのため，ここでは A_n は以下の(24)式に示す水深積分の輸送方程式によって評価することとする．

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{(u_n)_s-(u_n)_b}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\frac{U_s}{J}(u_n)_s-\frac{U_b}{J}(u_n)_b\right)\\
&+\frac{\partial}{\partial\eta}\left(\frac{V_s}{J}(u_n)_s-\frac{V_b}{J}(u_n)_b\right)-\frac{1}{JR}\left[\left(u_s^2\right)_s-\left(u_s^2\right)_b\right]\\
&=\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\tau_{zn}}{\rho}\right)_s-\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\tau_{zn}}{\rho}\right)_b\\
&+\alpha h u_*\hat{\lambda}\left(\frac{\xi_x^2+\xi_y^2}{J}\frac{\partial^2 A_n}{\partial\xi^2}+\frac{\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y}{J}\frac{\partial^2 A_n}{\partial\eta^2}\right)\\
&+\alpha h u_*\hat{\lambda}\left(\frac{\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y}{J}\frac{\partial^2 A_n}{\partial\xi^2}+\frac{\eta_x^2+\eta_y^2}{J}\frac{\partial^2 A_n}{\partial\eta^2}\right)
\end{aligned} \tag{24}$$

ここに，$)_s$，$)_b$ はそれぞれ水面と河床底面を表わしている．A_n は以下の(25)式で表わされる．

$$(u_n)_s-(u_n)_b=\hat{\lambda}\cdot A_n \tag{25}$$

Engelundモデル(Hosodaら，2001)[8]において $\hat{\lambda}$ は(26)式のように求めることができる．

$$\hat{\lambda}=\frac{\overline{u}_s}{\beta u_*}\frac{1}{\left(\frac{1}{3}+\beta r_*\right)^3}\left(\frac{1}{12}(\beta r_*)^2+\frac{11}{360}(\beta r_*)+\frac{1}{504}\right) \tag{26}$$

$$r_*=\frac{\overline{u}_s}{u_*}-\frac{1}{3\beta} \tag{27}$$

ここに，β：定数(=0.077)．Onda ら(2006)[2]は $\hat{\lambda}$ を二次流の形成によって発生する流速の分布変化を考慮することで導き出した．これに関する詳細はHosoda ら(2001)[8]と，Onda ら(2004)[10]の文献を参照されたい．

(3) 計算スキーム

計算法はスタガード格子上の有限体積法とし完全陽解法で計算を進めた．運動方程式の移流項の離散化にはQUICKを，時間積分には二次Adams Bashforth法を用いた．

3．蛇行流路による水理実験

(1) 目的と方法

蛇行流路での浮遊砂堆積に関する実験的研究はあまり行われておらず，浮遊砂の堆積状況の定性的，定量的な特徴を観察し，計算結果と比較するため**表-1**に示す実験を行った．実験は通水時間15(min)のRUN1と，60(min)のRUN2の2ケースを行ったが，どちらも水理条件は**表-1**に示すとおりである．**図-1**に実験装置の概要を示す．水路は上流端に越流タンクを有し，電動ポンプにて常時一定流量を流すことのできる循環式木製水路で，河床勾配は任意に調節可能である．観測領域は**図-1**の枠で示す領域内で，上流端から2波長下流の1蛇行長間に取られている．水路平面形状は中心線 $\tilde{s}$ に対する偏角 ψ が，$\sin\psi=\psi_0\sin\left(2\pi\tilde{s}/\tilde{L}\right)$ にて表わされるsign-generated curveが使用されている．最大偏角(蛇行角) ψ_0 は本研究では30°とした．中心線 $\tilde{s}$ にそった蛇行長 $\tilde{L}$ は150(cm)としている．浮遊砂として使用した粒子は粒径 d =120(μm)，単位体積重量 s =1400(kg/m^3)の塩ビ樹脂粉末を用いている．沈降速度はRubeyの式より w_0 =0.66(cm/s)となる．給砂方法は浮遊砂体積濃度が0.1(%)となるように，界面活性剤と水を混和した液を上流から1(min)おきに滴下した．計測は水深，堆積高とし，各々ポイントゲージ，レーザー砂面計にて計測を行った．

表-1　実験における水理条件

$Width(cm)$	$Slope$	$Q(l/s)$	$h(cm)$	Re	Fr
30.0	1/1000	1.0	2.19	5688	0.33

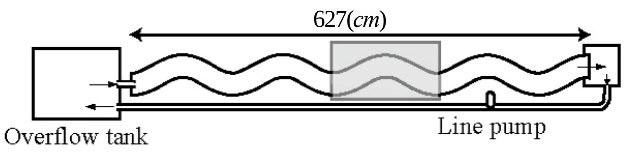

図-1　実験装置の概要

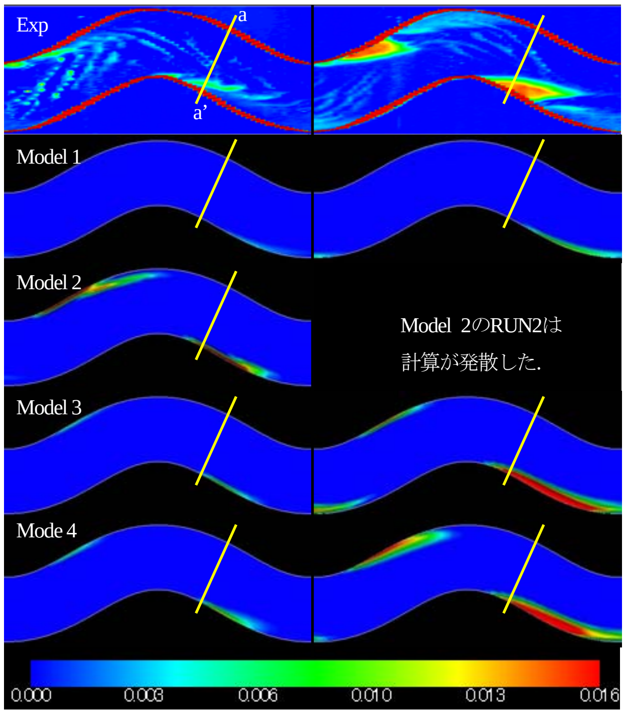

図-2　堆積高コンター図　左側がRUN1，右側がRUN2を示す

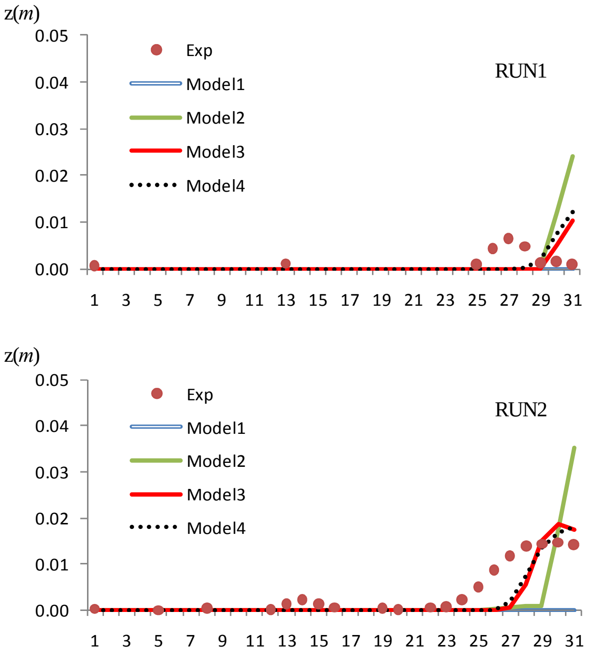

図-3　a-a'断面の浮遊砂堆積高の比較

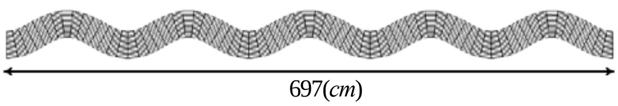

図-4　計算格子

(2) 計算結果の考察

計算は実験と同じ水理条件の下で行われた．計算結果と実験における排水後の堆積高コンターを**図-2**に示す．ここでは図の左側が上流である．**図-3**はRUN1，RUN2の横断面a-a'(**図-2**参照)における断面図であり，横軸はグリッドの番号で右側が右岸に対応し，縦軸は河床高 z (*m*)を示している．計算格子を**図-4**に示す．横断方向30分割，1波長30分割，縦断方向全150分割の5波長の条件で計算を行った．まず，Model 1に関しては**図-2**，**図-3**から見てとれるとおり浮遊砂の堆積がほとんど認められず，実験結果との一致は見られない．これは二次流を考慮していないため，横断方向への浮遊砂輸送が促進されず，浮遊砂が湾曲部において局所的に堆積する現象が再現されなかったためと考えられる．Model 2は27(*min*)付近で発散がみられた．これは，ラグを無視したモデルでは流線に対する二次流発達の遅れがない分，局所的に曲率半径 R の符合や大きさが変動し，二次流強度が過大評価されて，計算が不安定になったことが原因であると考えられる．現に**図-2**における15(*min*)の時点で堆積高が実験値の2倍程にまで到達し，堆積の形状も実験や他のモデルの結果と比べ連続性が見られない．この点でもラグを考慮したモデルが必要不可欠であることを示している．なお，**表-2**に示すRUN2のModel 2の計算結果は27(*min*)付近，t=1620(*sec*)における計算結果を比較のため掲載したものである．

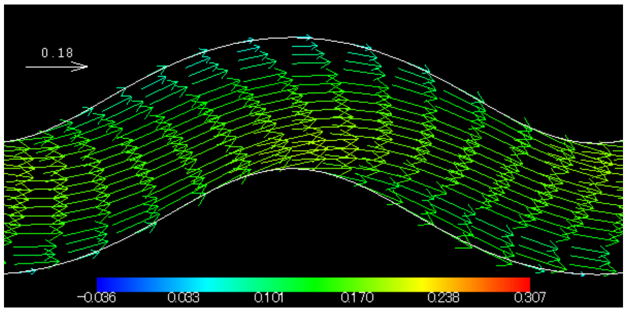

図-5　Model 4における流速ベクトル (t=3600*sec*)
(計測区間は図-2に同じ)

表-2　平均水深の比較　(t=3600*sec*)

	Exp	Model1	Model2	Model3	Model4
h(*cm*)	2.19	2.46	(4.24)	2.51	2.48

Model 3はModel 4と並んで**図-3**においては良好な堆積高を与えている．しかし，**図-2**で示すコンター図では，左岸と右岸で強い非対称性が見られる結果となった．

Model 4は各モデルの中で一番良好な再現性を示しているといえる．特にRUN2における堆積高は良好に再現している．Kimura ら(2009)[11]の研究では，流路側方に設けられたキャビティ内に堆積する浮遊砂の堆積形状は二次流，ラグ，流速分布形変化を考慮したModel 4が最も実験と一致しているという結果が得られているが，本研究で用いた蛇行流路においてもModel 4が実験との最も良好な一致を見せた．

水深に関しては，発散したModel 2を除いておおよそ良好な値を示していることがわかる．(**表-2**参照)

また，本研究では堆積状況の時間的変化を計測するため，通水時間の異なる2通りの実験を行った．通水時間でRUN1は15(*min*)でRUN2は60(*min*)であるが，RUN1では堆積が発達過程であり，RUN2では定常状態であると判断した．Model 3，4はRUN1，RUN2を通して堆積高に関して実験結果に良好に適合していることが見て取れる．

一方，全てのモデルに共通して実験結果と相違する点は，堆積域の形状である．実験，計算ともに流路の湾曲部の下流側から堆積が始まる点では共通しているが，実験結果が壁面から剥離しての堆積が見られるのに対し，計算結果では壁面に沿った形で堆積が生じていることが分かる．実験中に流路の観察を行ったところ，流れは湾曲部の下流側で剥離し，その影響からか流下方向とは逆方向に浮遊砂が輸送されている現象を肉眼で観測することができた．しかし計算では**図-5**に示すように剥離域での負の流速は確認することができなかった．このことが堆積域の形状の違いの一因である可能性があると考えられる．この仮説を証明するためには流速計による局所流速観測が必要不可欠であり，堆積域形状の再現性向上は今後の課題の一つである．

また，本研究のような浮遊砂を対象とした水路実験においては，浮遊砂卓越条件を満たしているにもかかわらず，浮遊砂が掃流砂的な挙動を示す可能性が考えられる．現に通水中に砂漣状の河床形状が観察されている．砂漣を発生させずに浮遊砂輸送の実験精度を高めるためには最適な水理条件の模索が必要不可欠であると考えられる．

４．まとめ

本研究は蛇行流路を対象とした浮遊砂輸送についての実験と，4つのモデルを使用した数値解析による検討を行った．主な成果を以下にまとめる．

1) 三次元的流れ構造を持つ二次流を計算負荷の比較的低い二次元計算で再現し，ラグや流速分布形の変化の項を付加することにより，蛇行流路においても高い精度での実現象の再現が可能となった．
2) 二次流を考慮しないModel 1では，横断方向の浮遊砂輸送が促進されないため，実現象で見られるような湾曲部外岸への浮遊砂堆積を再現することができなかった．
3) 二次流を考慮し，ラグを考慮しないModel 2では，局所的に符合や大きさが変動する曲率半径のために二次流が過大評価され，安定した計算が不可能であることが分かった．これにより，蛇行流路などの曲率半径が定常ではない流場でのラグを考慮したモデルの必要性が示された．
4) 本研究の蛇行流路においても，二次流，ラグ，流速分布形変化を考慮したModel 4が実験結果を最も良好に再現することがわかった．
5) 同じ水理条件で異なる通水時間の実験を行い，堆積の発達過程と定常状態における計算との比較を行った．その結果，発達過程，定常状態を通してModel 3, 4は良好に堆積高を再現できることがわかった．

今後の課題としては，今回実施できなかった実験における流速分布測定，異なる蛇行角における実験，計算結果と実験結果の堆積域の定量的な一致を再現することが挙げられる．

参考文献

1) Kalkwijk, J. P. & de Vriend, H. J.: Computation of the flow in shallow river bends, J. Hydraulic Res., IAHR, Vol.18, No.4, pp.327-342, 1980.
2) 音田慎一郎，細田尚，木村一郎:一般座標系での湾曲流の水深積分モデルの改良とその検証について，水工学論文集，第50巻，pp.769-774, 2006.
3) Kimura, I., Hosoda, T. & Onda, S.: Fundamental properties of suspended sediment transport in open channel flows with a side cavity. Proceedings of RCEM 2007, Enschede, Netherlands, Balkema Pblishers, pp.-, 2007.
4) Nezu, I. & Nakagawa, H.: Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR Monograph, Belkema, Rotterdam, Netherlands, 1993.
5) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, Proc. ASCE, Vol.100, HY11, pp.1631-1648, 1974.
6) Kimura, I. & Hosoda, T.: Fundamental properties of flows in open channels with dead zone. J. Hydraulic. Engineering, ASCE, Vol.123 (2), pp.98-107, 1997.
7) Hosoda, T. & Kimura, I. Vortex formations with free surface variation in the shear layer of plane-2D open channel flows. *Proc, 9th Symp. on Turbulent Shear Flows*, Kyoto, Japan, Vol. 1, P112, pp.1-4,1993.
8) Hosoda, T., Nagata, N., Kimura, I., Michibata, K. & Iwata, M. A depth averaged model of open channel flows with lag between main flows and secondary currents in a generalized curvilinear coordinate system. *Advances in Fluid Modeling & Turbulence Measurements, (eds. H. Ninokata, A.Wada and N. Tanaka),* World Scientific, pp.63-70, 2001.
9) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. & Muramoto, Y. Threedimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures. *J. Hydraulic. Engineering, ASCE*, Vol.131, No.12, pp.1074-1087, 2005.
10) Onda, S. 2004. PhD Thesis, Kyoto University. Shimizu, Y. (1988). Practical Computation of Three Dimensional Flow and Bed Deformation with Bed Load and Suspended Load in Meandering Rivers. *J. CERI*, No.88 pp.1-52..
11) 木村一郎，音田慎一郎，細田尚，清水康之:　開水路側方キャビティ内二次流とその浮遊砂輸送への影響を再現する水深積分モデル，水工学論文集，第53巻，2009.

(2009.9.30受付)