

蛇行水路の河床変動及び 分級現象に及ぼす二次流の影響

THE EFFECT OF SECONDARY CURRENT FOR BED
DEFORMATION PROCESS AND GRAIN SORTING IN MEANDERING CHANNEL

岩崎理樹¹・清水康行²・木村一郎³・清治真人⁴

Toshiki IWASAKI, Yasuyuki SHIMIZU, Ichiro KIMURA and Masato SEIJI

¹ 学生員 北海道大学工学研究科 (〒 060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

² 正会員 工博 北海道大学工学研究科教授 (〒 060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

³ 正会員 工博 北海道大学工学研究科准教授 (〒 060-0813 北海道札幌市北区北 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 study investigated how the secondary currents affects the bed deformation process and grain sorting in meandering channel by using two-dimensional bed deformation numerical model. A flow field in meandering channel was calculated by plane two-dimensional hydrodynamic model with and without the effects of secondary current. The influence of the lag between curvature of streamline and development of the secondary current was considered for evaluating flow field and sediment transport in case of including effects of secondary currents. Besides, multilayer model was used for predicting sorting phenomena of bed in meandered channel. In this study, three-computations were conducted by using different type model of secondary current in meandering channel of simple-rectangular sine-generated curve. We compared the bed topography and sediment size distribution between the experimental result and the each numerical result. The result shows that the correlation of secondary currents for flow field and sediment transport is important to reproduce the bed deformation and sorting phenomena.

Key Words: secondary current, nonuniform sediment, sorting, meandering channel, plane 2D morphodynamic model

1. はじめに

現在河川には、従来重要視されてきた治水・利水といった役割とともに、環境面へのニーズが高まっており、蛇行復元事業や多自然型川づくりなどの環境にも配慮した事業が数多く展開されている。河川管理の様々な検討を行う際、近年では計算機の発達により平面 2 次元モデルによって河川の流れや河床変動を解析することも多くなってきている。この際用いられるモデルとしては、2 次元浅水流方程式と一様粒径による流砂量式を組み合わせることにより、河床変動過程を追跡するものが一般的である¹⁾。しかしながら、実河川に数値計算モデルを適用する際、一般的な平面 2 次元モデルでは再現が難しい流れの 3 次元構造や粘性土、礫からなる複雑な河床材料を考慮しなければならない場合も数多く存在する。したがって、河川を管理していくうえで、より実河川で生じる現象を再現できる数値計算モデルを構築することは、重要な課題である。

そこで、本研究では河床が混合砂で構成される蛇行水路での河床変動及び河床材料の分級現象に着目する。蛇行水路における河床変動及び河床材料の分級現象は、流線の湾曲による二次流と横断勾配により土粒子に作

用する重力に大きく影響を受けることが知られている。芦田ら²⁾は、Sine-generated Curve の蛇行水路において一様砂・混合砂を用いて実験を行い、河床変動、河床材料の分級現象及び粒度分布の河床変動に及ぼす影響について検討を行っている。その中で、混合砂河床からなる蛇行水路において生じる河床材料の内岸の細粒化及び外岸の粗粒化には、二次流と横断勾配による重力の影響が大きく影響することを示している。また、彼らは同時に浅水流方程式と混合粒径を対象とした流砂モデル³⁾を組み合わせた河床変動モデルを用いた検討も行っており、二次流と横断勾配の影響は長谷川の式⁴⁾により評価されている。また関根⁵⁾は、曲線座標系における二次流を考慮した平面 2 次元モデルを解くことにより、準 3 次元モデルを構築し、これを蛇行河川に適用することで、蛇行河川における河床変動と分級現象に関して検討を行っている。一方、近年平面 2 次元モデルの高精度化が進み、細田ら⁶⁾は一般座標系の平面 2 次元モデルに二次流による運動量輸送を組み込んだモデルやさらに二次流の発達・減衰の遅れを考慮したモデルなどを提案し、湾曲流や蛇行水路の流れに適用している。また内田ら⁷⁾は、浅水流方程式と渦度方程式を連立して解くことによって、水衝部のような加

速・減速のある流れ場に生じる複雑な渦運動を記述できるモデルを開発し、合流点の計算に用いている。しかしながら、このような高精度水深積分モデルの河床変動への適用はまだ数が少なく⁸⁾、十分な検討がなされているとは言えない。

そこで、本研究では従来用いられている平面2次元河床変動モデルに、二次流の発達・減衰の遅れと河床の多層モデルを組み込み、これを芦田らの行った実験に適用することで、モデルの評価を行うと同時に、二次流が河床変動及び分級現象に及ぼす影響を考察する。

2. 計算モデル

(1) 流れの方程式

本研究では、清水¹⁾が提案した一般座標系に変換された平面2次元河床変動モデルにおける浅水流方程式に、細田ら⁶⁾の二次流による運動量輸送を表わす付加項を加えたモデルで流れの計算を行う。連続式及び運動方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta h}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta \\ = -g \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ - \frac{C_d u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + \frac{J \xi_x}{h} (S_{\xi 1} + S_{\xi 2} + S_{\xi 3} + S_{\xi 4}) \\ + \frac{J \xi_y}{h} (S_{\eta 1} + S_{\eta 2} + S_{\eta 3} + S_{\eta 4}) + D^\xi \\ \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta \\ = -g \left[(\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right] \\ - \frac{C_d u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} \quad (3) \\ + \frac{J \eta_x}{h} (S_{\xi 1} + S_{\xi 2} + S_{\xi 3} + S_{\xi 4}) \\ + \frac{J \eta_y}{h} (S_{\eta 1} + S_{\eta 2} + S_{\eta 3} + S_{\eta 4}) + D^\eta \end{aligned}$$

ここに、 t : 時間、 ξ, η : 一般座標、 h : 水深、 H : 水位、 u^ξ 、 u^η : 水深積分された ξ, η 方向流速の反変成分、 g : 重力加速度(=9.8m/s²)、 $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$: 座標変換のメトリックス、 J : 座標変換のヤコビアン、 C_d : 河床の抵抗係数、 D^ξ 、 D^η : ξ, η 方向の拡散項及び $S_{\xi 1}, S_{\xi 2}, S_{\xi 3}, S_{\xi 4}, S_{\eta 1}, S_{\eta 2}, S_{\eta 3}, S_{\eta 4}$: 二次流による付加項である。また、諸係数は以下のように与える。

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left(\xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2}, \quad \alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} \quad (5)$$

$$\alpha_5 = 2 \left(\eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (6)$$

河床抵抗 C_d は、マニング則から以下のように求める。

$$C_d = \frac{gn^2}{h^{1/3}}, \quad n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66 \sqrt{g}} \quad (7)$$

ここで、 n : マニングの粗度係数、 k_s : 相対粗度である。拡散項 D^ξ, D^η は次式により求める。

$$D^\xi = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\nu_t \xi_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\nu_t \eta_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \quad (8)$$

$$D^\eta = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\nu_t \xi_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\nu_t \eta_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \quad (9)$$

ここで、 ξ_r, η_r : 一般座標上の局所的な格子サイズと実距離の比率を表わす係数、 ν_t : 渦動粘性係数であり、ゼロ方程式モデルを用いると以下ようになる。

$$\nu_t = \alpha u_* h \quad (10)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、 α : 定数で0.2とする⁹⁾。二次流の付加項については、次式により計算する。

$$S_{\xi 1} = -C_{sn} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n \bar{u}_s h \sin 2\theta - \xi_y A_n \bar{u}_s h \cos 2\theta) \right] \quad (11)$$

$$S_{\xi 2} = -C_{sn} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n \bar{u}_s h \sin 2\theta - \eta_y A_n \bar{u}_s h \cos 2\theta) \right] \quad (12)$$

$$S_{\xi 3} = C_{n2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n^2 h \sin^2 \theta - \xi_y A_n^2 h \sin \theta \cos \theta) \right] \quad (13)$$

$$S_{\xi 4} = C_{n2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n^2 h \sin^2 \theta - \eta_y A_n^2 h \sin \theta \cos \theta) \right] \quad (14)$$

$$S_{\eta 1} = C_{sn} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n \bar{u}_s h \cos 2\theta + \xi_y A_n \bar{u}_s h \sin 2\theta) \right] \quad (15)$$

$$S_{\eta 2} = C_{sn} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n \bar{u}_s h \cos 2\theta + \eta_y A_n \bar{u}_s h \sin 2\theta) \right] \quad (16)$$

$$S_{\eta 3} = -C_{n2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} (\xi_x A_n^2 h \sin \theta \cos \theta - \xi_y A_n^2 h \cos^2 \theta) \right] \quad (17)$$

$$S_{\eta 4} = -C_{n2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} (\eta_x A_n^2 h \sin \theta \cos \theta - \eta_y A_n^2 h \cos^2 \theta) \right] \quad (18)$$

ここで、 θ : 流線と x 軸のなす角度、 C_{sn}, C_{n2} : 流速分布形から決定される係数であり、次式で定義される。

$$C_{sn} = \int_0^1 f^s(\zeta) f^n(\zeta) d\zeta, \quad C_{n2} = \int_0^1 f^n(\zeta)^2 d\zeta \quad (19)$$

ここで、 f^s, f^n はそれぞれ主流及びそれに直交する方向の流速鉛直分布を表わす係数であり、Engelund¹⁰⁾に従うとそれぞれ2次、6次関数で表わされる。主流とそれに直交方向の代表流速をそれぞれ $\bar{u}^s, A_n$ とすれば、 s, n 方向の流速鉛直分布 u^s, u^n は以下のように定義される。

$$u^s = \bar{u}^s f^s(\zeta), \quad u^n = A_n f^n(\zeta), \quad \zeta = z/h \quad (20)$$

このとき二次流の遅れを考慮しない場合は、 $A_n = \bar{u}^s h/R$ (R : 流線の曲率半径)で定義される。しかし、池田ら

11) が指摘するように連続蛇行流路のように二次流が十分発達しえない場合では、二次流の発達・減衰の遅れを考慮する必要がある。そこで本研究では二次流の遅れの効果を考慮するため、以下の渦度方程式 (式 (21)) と式 (22) から A_n を計算し、この影響を表現する。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{u_s^n - u_b^n}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u_s^\xi}{J} u_s^n - \frac{u_b^\xi}{J} u_b^n \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u_s^\eta}{J} u_s^n - \frac{u_b^\eta}{J} u_b^n \right) + \frac{1}{JR} (u_s^{s2} - u_b^{s2}) \\ & = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{zn}}{\rho} \right)_s - \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{zn}}{\rho} \right)_b \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & + \alpha h u_* \hat{\lambda} \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \xi^2} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \eta^2} \right) \\ & + \alpha h u_* \hat{\lambda} \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \xi^2} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial^2 A_n}{\partial \eta^2} \right) \\ & u_s^n - u_b^n = \hat{\lambda} A_n \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 ρ : 水の密度 (=1000kg/m³)、下付き添え字 s, b はそれぞれ水面と底面での値であることを意味し、 $\hat{\lambda}$ は以下のように計算される。

$$\hat{\lambda} = \frac{\bar{u}^s}{\beta u_*} \frac{1}{(1/3 + \beta r_*)^3} \left[\frac{1}{12} (\beta r_*)^2 + \frac{11}{360} \beta r_* + \frac{1}{504} \right] \quad (23)$$

ここで、 r_*, β については次式で定義される。

$$\bar{u}^s = \left(\frac{1}{3\beta} + r_* \right), \quad \beta = 0.077 \quad (24)$$

これらの方程式より、二次流の発達・減衰の遅れを考慮した流れ場を計算することができる。詳細は、参考文献⁶⁾を参考されたい。

(2) 混合砂河床を対象とした河床変動モデル

混合砂による河床変動計算を行う場合、対象とする河床材料の粒度分布をある階層に分割し、分割された階層の代表粒径とその存在割合の離散変量として扱う。河床の連続式は、以下のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\sum q_{bk}^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\sum q_{bk}^\eta}{J} \right) \right] = 0 \quad (25)$$

ここに、 z : 河床高、 λ : 河床の空隙率 (=0.4)、 q_{bk}^ξ, q_{bk}^η : 階層 k の粒径に対する ξ, η 方向の掃流砂量である。各粒径に対する主流方向の流砂量 q_{bk}^s は、以下に示す粒径別に拡張された芦田・道上の式²⁾より求める。

$$\frac{q_{bk}^s}{\sqrt{sgd_k^3}} = p_{mk} 17 \tau_{*k}^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \quad (26)$$

ここに、 s : 土粒子の水中比重 (=1.65)、 d_k : 階層 k における土粒子の粒径、 p_{mk} : 交換層における階層 k の土粒子の存在割合、 $u_{*ck}, \tau_{*k}, \tau_{*ck}$: それぞれ階層 k における限界摩擦速度、無次元掃流力及び無次元限界掃流力である。各階層 k における限界掃流力は、遮蔽効果を考

慮して以下の浅田の式¹²⁾により求める。

$$\frac{u_{*ck}^2}{u_{*cm}^2} = \left[\frac{\log_{10} 23}{\log_{10} (21d_k/d_m + 2)} \right]^2 \frac{d_k}{d_m} \quad (27)$$

ここに、 u_{*cm} : 平均粒径に対する限界摩擦速度で、岩垣の式により求める。また d_m は平均粒径で、階層 k の存在確率を p_k として、 $d_m = \sum d_k p_k$ で定義する。また、主流に直交方向の掃流砂量 q_{bk}^n については以下の長谷川の式を用いる。

$$q_{bk}^n = q_{bk}^s \left(\frac{u_b^n}{V_b} - \gamma \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (28)$$

ここで、 u_b^n は通常十分に発達した二次流場を想定して次式で求められる。

$$u_b^n = f^s(0) \bar{u}^s N_* \frac{h}{R} \quad (29)$$

ここに、 N_* は二次流強度を表わす係数で Engelund によると 7 である。本研究では、流れの計算において二次流の遅れを考慮していることから、掃流砂への二次流の補正についても同様の効果を考慮する。今、流れ及び掃流砂量への二次流の影響を考慮する際、両方ともに流速分布に Engelund モデルを考えているため、 n 方向の底面近傍流速は、式 (20) において $\zeta = 0$ としたものと対応しており、式 (29) と以下のような関係がある。

$$u_b^n = N_* \bar{u}_b^s \frac{h}{R} = f^n(0) A_n \quad (30)$$

すなわち、十分に発達した二次流場では $f^n(0) = f^s(0) N_*$ で、かつ遅れを考慮する必要がないため、 $A_n = \bar{u}^s h / R$ となる。本研究では二次流の発達・減衰の遅れを A_n により表わしていることから、計算された A_n を用いることで、掃流砂への効果を考慮できる。すなわち、 u_b^n を次式で計算する。

$$u_b^n = f^s(0) N_* A_n \quad (31)$$

このように求められた s, n 座標の掃流砂量を一般座標に変換し、河床の連続式に用いる。一方、横断勾配が掃流砂量に与える影響を算出する γ については混合粒径を扱う場合、その測定の困難さからモデル化が難しいが、ここでは山坂ら¹³⁾により求められた混合砂の粒径別横断・縦断流砂量比は $\sqrt{\tau_{*ck}/\tau_{*k}}$ に比例するとの考えから、長谷川による係数を以下のように拡張する。

$$\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\mu_k \mu_s \tau_{*k}}} \quad (32)$$

ここで、 μ_k, μ_s はそれぞれ静摩擦係数、動摩擦係数であり 1.0 と 0.4 とする。また分級現象の再現のため、芦田ら³⁾により提唱された多層モデルを用いる。このモデルでは河床表層を混合層と定義し、その下に遷移層及び堆積層を設けるものである。詳細は参考文献³⁾を参照されたい。各粒径の存在確率は次式により計算される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p_{mk}}{J} \right) + \frac{p_{bk}}{e_m} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z}{J} \right)$$

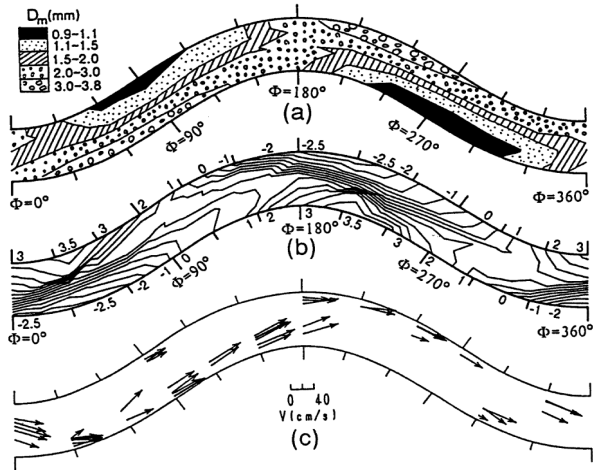


図-1 芦田らによる実験結果²⁾。上から (a) 表層の平均粒径, (b) 河床変動量及び (c) 流速ベクトルを示している。

$$+\frac{1}{e_m(1-\lambda)}\left[\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\frac{q_{bk}^\xi}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial\eta}\left(\frac{q_{bk}^\eta}{J}\right)\right]=0 \quad (33)$$

ここに、 e_m ：交換層の層厚でここでは初期粒度により求められる d_{90} を用いる。なお、 p_{bk} は河床の堆積・侵食により以下のように場合分けされる。

$$p_{bk} = p_{mk} \quad (\partial z / \partial t > 0), \quad p_{bk} = p_{tk} \quad (\partial z / \partial t < 0) \quad (34)$$

ここに、 p_{tk} ：遷移層における階層 k の存在割合である。

3. 蛇行水路における移動床シミュレーション

ここでは、前節までに示した数値解析モデルを芦田ら²⁾によって行われた単断面蛇行水路における混合砂移動床実験に適用する。実験は、水路幅 0.2m、波長 2.2m、勾配 0.009、最大蛇行角 35° の Sine-generated Curve を 4 波長半とった水路に混合砂を敷き詰めて河床を作り、移動床としている。上流からは流量 3.6l/s を与え、上流端の平衡状態を保つように給砂を行っている。実験結果を図-1 に示す。測定は、下流より 2 波長目のもので行われている。この図より、外岸側の侵食と内岸側の堆積と対応するように、粒度分布は外岸では粗粒化、内岸では細粒化していることがわかる。

(1) 計算条件

計算条件については、対象とする芦田らの実験と同様に設定する。本研究では、計算モデルの評価及び二次流が河床形状及び河床材料の粒度分布に与える影響を考察するため、以下の 3 ケースの計算を行った。まず、流れを一般的な平面 2 次元モデル (式 (11)～(18) を考慮しない)、主流及び横断方向の掃流砂量を芦田・道上式、長谷川の式でそれぞれ計算する Case1 を行う。このケースにおいて、二次流の影響は長谷川式により表現される。次に、流れ場を二次流の発達・減衰の遅れを考慮したモデルから計算する Case2 を行う。なお、流砂

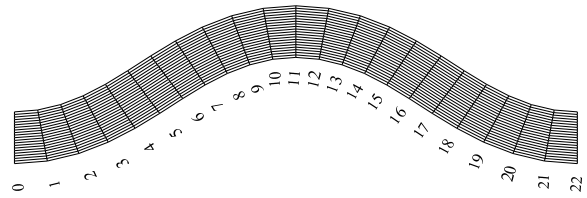


図-2 計算に用いる水路 (1 波長分)

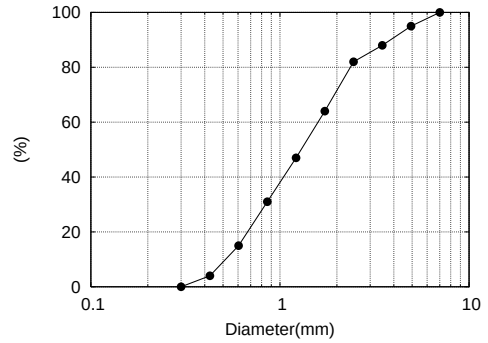


図-3 計算に用いる混合砂の粒度分布 ($d_m=1.74\text{mm}$)

モデルについては Case1 と同様とする。この Case1 と 2 を比較することで、流れの方程式に二次流の影響を考慮する効果を考察する。最後に、流れの計算を Case2 と同様に行い、式 (31) のように流れの計算で仮定される流速鉛直分布を用いて、長谷川式における底面近傍流速を見積もった Case3 を行う。

境界条件としては上流端で流量を与え、平衡流砂量式から計算される流砂量を供給する。また、下流端では水位として等流水深に相当する水位を与える。計算に用いる混合砂の粒度分布は、実験に用いたものを参考に図-3 に示すようなものとする。ここでは、粒度分布を 9 階層に分割している。また、実験では 1 層 4mm の厚さで、表層から 3 層にわたって粒度分布が測定されており、そのなかで、分級現象が生じていることが示されている。そこで、これを参考に本研究では堆積層厚を 4mm としている。

(2) 計算結果

計算された河床コンター図と交換層の平均粒径の分布をそれぞれ図-4、図-5 に示す。図より、計算により求められた外岸側の洗掘域と内岸側の堆積域は図-1 に示される実験のそれよりも下流側へシフトしていることがわかる。特に、流れに二次流の影響を考慮した Case2,3 では、外岸の洗掘は再現できているものの、洗掘域は Case1 よりも下流に位置している。これは、二次流による流れの外岸側への移動が過大であることに起因すると思われる。一般に、二次流の発生によって主流方向流速分布が変形し、最大流速点が水面ではなく水面下に表れることが知られている¹⁴⁾。この影響は水面付近の遠心力を減衰させるため、二次流強度はこれを考慮しない場合よりも弱くなる。この現象は、流速分布に Engelund モデルを用いた場合では表現できないため、モデルの改良が必要となる。しかしながら、河床変動

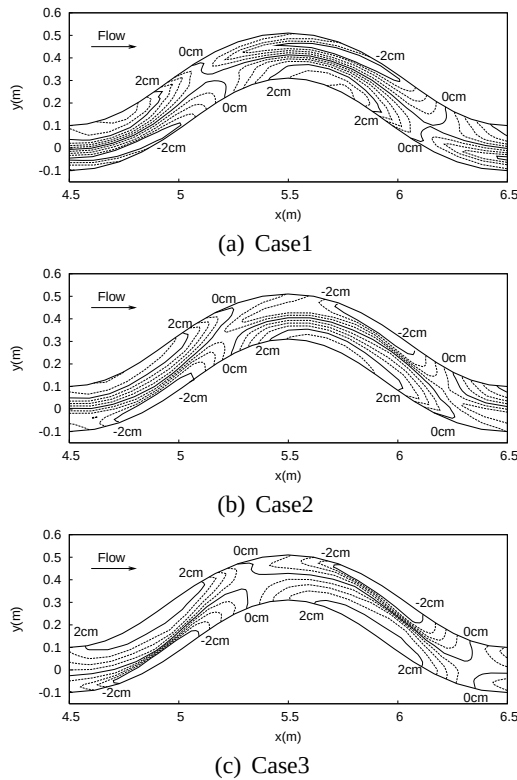


図-4 河床変動量計算結果. 上から (a) 通常の平面 2 次元モデル, (b) 流れに二次流の発達・減衰の遅れを考慮したモデル及び (c) 流れ, 土砂移動の両方に二次流の遅れを考慮したモデルによる結果.

の平面形状や表層河床材料の平均粒径分布は実験結果で見られる傾向をおおむね表わしており, 計算モデルは妥当なものであると考えられる. 以下, 実験と計算の比較を通して, 各ケースの違いについて考察を行う.

a) 河床変動について

既に述べたように, 洗堀・堆積域については実験と計算で若干のずれが見られるが, 河床変動パターンに着目すると各モデル間で再現性が異なってくる. まず, 図-4 に示す河床コンター図を見てみると, 流れに二次流の影響を考慮した Case2, 3 では実験で見られる外岸の洗堀をよく再現できているのに対して, Case1 では最大洗堀点が若干内岸にずれていることがわかる. これは, 二次流を考慮することで流線の湾曲が急になり, 流速が外岸側にシフトしたためと考えられる. ここで, 図-6 に Case1, 2 における平衡河床状態での流速ベクトルを示す. なお, Case3 については流れの方程式が Case2 と同じであるため省略している. この図をみると, 平衡河床状態において二次流を考慮しない場合では, 最大流速は外岸側ではなく水路中央付近に生じていることがわかる. 特に, 水衝部 (図-2 の 13~14 付近) において最大流速点が, 外岸に表れていない. 一方二次流を考慮した場合は, 流速ベクトルは外岸側にシフトしており, 最大流速点も外岸部で生じている. この効果により, 二次流を考慮したケースでは外岸部の洗堀が再現できたと考えられる.

次に内岸と外岸の堆積・洗堀の関係について考察す

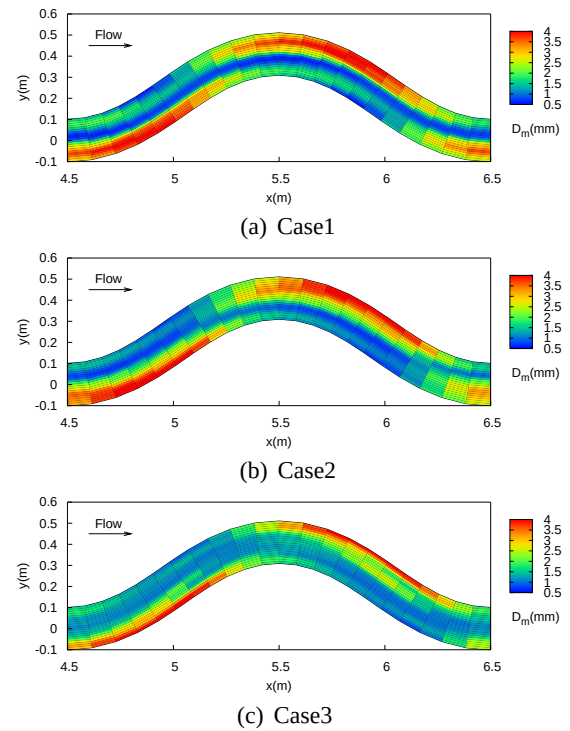
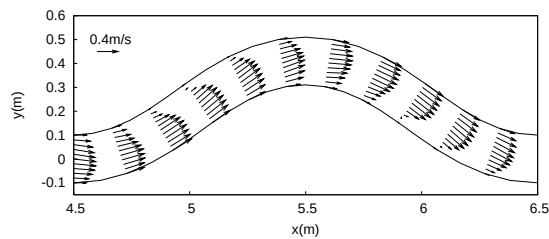
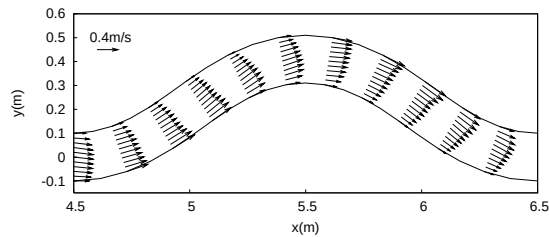


図-5 表層の平均粒径の計算結果. 上から (a) 通常の平面 2 次元モデル, (b) 流れに二次流の発達・減衰の遅れを考慮したモデル及び (c) 流れ, 土砂移動の両方に二次流の遅れを考慮したモデルによる結果.

る. 図-7 は, 各計算ケース及び実験における最大洗堀・堆積が生じた地点を表わしている. ただし, 実験データについては図-1 から読み取ったものをプロットしている. 最大洗堀・堆積地点は, 計算と実験でずれが生じているが, 傾向として Case2 を除いて最大洗堀地点と最大堆積地点はほぼ同じ横断面に生じるか, もしくは洗堀地点のほうが若干上流側の横断面で生じることがわかる. これは芦田ら²⁾が考察しているように, 洗堀域で巻き上げられた流砂が二次流により内岸に運ばれると同時に, 主流により下流側に流されたのち堆積したためである. この傾向は, 地点ではなく堆積・洗堀域をみると明確な差があることがわかる. すなわち, 図-4 に示すコンター図において -2cm と 2cm の等高線に着目すると, 掃流砂に二次流の遅れを考慮しない Case1, 2 の場合, 二次流の評価が過大であるため, 内岸への移動が大きく, 両者のコンターはほぼ同位相で生じていることがわかる. 特に Case2 では図-6 からわかるように, Case1 とは違い内岸の剥離域が生じないため, 最大曲率半径が蛇行頂点で生じる. 従って内岸域への堆積が促進され, 最大堆積・洗堀位置の傾向も, 他のケースと異なったと考えられる. 一方, 掃流砂の移動にも二次流の遅れを考慮した場合, 主流に運ばれる作用が相対的に強くなり, 堆積域は洗堀域よりも若干の位相遅れを伴って下流側に生じている. この傾向は図-1 の実験結果でもみられており, Case3 の計算結果は現象を傾向的には再現できていることがわかる. 従って, 掃流砂の移動へ二次流の遅れを考慮することは, 蛇行水



(a) Case1



(b) Case2

図-6 平衡河床における流速ベクトル図。

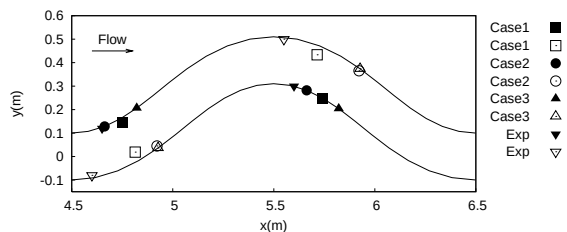


図-7 各ケースの最大洗堀・堆積位置。白抜きと黒塗りはそれぞれ各ケースの最大洗堀、堆積位置を表わしている。

路の洗堀・堆積域に影響を及ぼすといえる。

b) 分級現象について

図-5 より、実験では外岸側で粗粒化、その若干下流側で内岸部に細粒域が見られる。これは、前節で述べた洗堀域と堆積域の位相遅れと同一傾向である。すなわち、これは横断勾配による重力の影響を受けづらい細粒分が、主流に運ばれる間に二次流によって内岸域に運ばれ、堆積することを示している。計算結果を見てみると、計算の全ケースで実験で示している粒度分布の傾向は表わしているが、二次流の遅れを考慮しているケースほど内岸への細粒分の堆積域が下流側へシフトしていき、実験結果と良い一致を見せている。Case1 による結果を見てみると、水路全域にわたり中央部に細粒分が堆積している。これは、細粒分が二次流によって内岸側に輸送されようとするが、内岸側に発達している剥離域によりその輸送が妨げられたためだと考えられる。また Case2 の場合、二次流が発達しきれていない蛇行部に入る前の断面(図-2 の 8~10 付近)では、同様の堆積が少なくなっているが、蛇行部を過ぎると二次流の発達により、堆積が見られる。最後に Case3 であるが、流れと掃流砂の移動に二次流の遅れを考慮することで細粒分の堆積がさらに下流・内岸側に運ばれ、堆積位置が若干ずれるものの実験結果と近い分布となっている。これらのことから、混合砂河床における分級現象、特に細粒分の堆積については二次流を考慮することによって再現性が上がると考えられる。

4. おわりに

本研究では、河床が混合粒径で構成された蛇行流路の河床変動及び分級現象を解析するために、通常の平面 2 次元河床変動モデルと二次流の影響を考慮した 2 次元モデルを適用することで、モデルの評価と二次流が河床変動と分級現象に及ぼす影響について考察を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) 流れの計算に二次流の影響を考慮することで、外岸域へ流れが集中し、蛇行部の外岸域で見られる洗堀が良好に再現できる。
- 2) 二次流の遅れを掃流砂の移動に適用することで、洗堀・堆積域及び粒度分布の再現性が向上する。
- 3) 混合粒径の河床変動を行う場合、二次流が河床変動に与える影響は大きくないが、分級現象、特に細粒分の移動については大きな影響を及ぼす。

今回のケースでは、二次流による河床変動への影響が明確に見られなかったが、今後は二次流の影響が大きな流れ場にモデルを適用し、その影響を明らかにするとともに、実河川への適用も行っていきたい。

参考文献

- 1) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について，水工学論文集，第 47 巻，pp.643-648，2003。
- 2) 芦田和男・江頭進治・劉炳義・梅本正樹：蛇行流路における Sorting 現象および平衡河床形状に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 33 号，B-2，pp.261-279，1990。
- 3) 芦田和男・江頭進治・劉炳義：二層モデルによる複断面河道の流れおよび河床変動の数値解析，京都大学防災研究所年報，第 35 号，B-2，pp.41-62，1992。
- 4) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究，北海道大学学位論文，1984。
- 5) 関根正人：蛇行河川における土砂のふるい分けに関する研究，土木学会論文集，No.467/II-23，pp.29-38，1993。
- 6) 細田尚・長田信寿・岩田通明・木村一郎：一般座標系での主流と二次流の遅れを考慮した平面 2 次元モデル，水工学論文集，第 44 巻，pp.587-592，2000。
- 7) 内田龍彦・福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用，水工学論文集，第 53 巻，pp.1081-1086，2008。
- 8) 清水康行ら：自由砂州と固定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，pp.15-22，1992。
- 9) 木村一郎・細田尚・音田慎一郎：橋脚による堰き上げ効果の再現性に着目した数値解析モデルの比較，水工学論文集，第 49 巻，pp.559-564，2005。
- 10) Engelund, F. : Flow and bed topography in channel bends, *J. of Hyd. Div., ASCE*, Vol. 100, HY11, pp.1631-1648, 1974。
- 11) 池田駿介・西村達也：河床蛇行河川の三次元流れと河床形状，土木学会論文集，第 369 号/II-5，pp.99-108，1986。
- 12) 浅田宏・石川晴雄：水流による河床砂礫の分級機構に関する研究 (III)，電力中央研究所報告，第 71015 号，1972。
- 13) 山坂昌成・池田駿介・木崎茂：混合粒径砂の横断方向流砂量，土木学会論文集，第 387 号/II-8，pp.105-114，1987。
- 14) 石川忠晴・金 舜範：湾曲部の二次流に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 375 号，pp.143-149，1986。

(2009.9.30 受付)