一様湾曲水路における三次元流れ構造と河床変動に関する研究

Study on 3D Flow Structures and Bed Deformations in Curved Open Channels

島田龍市*・木村一郎**・清水康行***

Ryuichi SHIMADA, Ichiro KIMURA and Yasuyuki SHIMIZU

*学生会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-0808 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

** 正会員 工博 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (同上)

*** フェロー 工博 北海道大学教授 公共政策大学院 (同上)

Bed deformations in river bends are crucial for river management. However, due to the complex flow structures, the prediction of bed deformations in river bends is difficult. In this study, flow structures and bed deformations in curved open channels are discussed through laboratory experiments and 3D numerical simulations. In the 3D model, RANS approach was adopted. The numerical results were compared with experimental data performed by Hinokidani(1998). It is indicated that the fundamental properties of both flow and bed deformation can be captured well by present computations. In addition, numerical and laboratory experiments were conducted for verifying the difference of bed deformation patterns depending on different channel and hydraulic conditions. The experimental results showed that bed deformation patterns in river bends closely depend on two dimensionless parameters; the Dean number and the depth over the curvature radius.

Key Words: curved open channel, 3D numerical simulation, bed deformation

キーワード: 一様湾曲水路, 三次元数値シミュレーション, 河床変動

1. はじめに

河川湾曲部は、洪水の発生や側岸浸食に伴う河川の蛇行など河川防災や河川環境を考える上で重要なポイントである。特に河川湾曲部における河床変動に関しては、洪水発生時における主要な被災場所となり河川管理上非常に重要であるため、従来から実験的あるいは解析的に数多くの研究がなされてきた。また、一様湾曲水路については、蛇行水路と比較して現象が比較的単純であるため古くから検討がなされてきた。湾曲部の流れ構造については、遠心力と局所的圧力勾配のアンバランスに起因する第一種二次流が卓越するが、それに加えて、外岸部の外岸セルの発生が指摘されている。Kimura ら¹⁾は、数値解析により、第一種二次流や外岸セルの特性を精度よく再現するモデルを提案しており、一様湾曲流の定量的予測については、実用的レベルに達してきたといえるであろう。一方、湾曲部の河床変動の予測については、Blanckaert ら²⁾を始めとする研究者らが精力的な研究を進めているものの、不明な点が多い。特に、湾曲部の河床変動には定性的に異なる形態が存在することが指摘されており、これらの河床形態に及ぼす水理パラメータの影響に関しては、工学的に極めて重要な課題であるにもかかわらず、未解明である。また、実河川に目を向けると、蛇行部の河床変動と河川平面形状との関係について、未だ明確な知見は得られていない。

本研究では、一様湾曲水路を対象に三次元数値計算を行い、流況特性や河床変動特性について検討する一方で、数値計算モデルの各種パラメータを変化させた数値解析の実験と一様湾曲水路を用いた室内実験によって河床変動特性の定性的変化とその要因について検討を行う。

2. 計算対象とした檜谷³⁾の研究概要

檜谷³⁾は図-1に示す幅水深比の小さい一様湾曲水路を用いて河床変動の実験を行った。用いた水路は、曲率半径 $R=60\text{cm}$ 、水路幅 $B=20\text{cm}$ 、曲率偏角 $\theta=90^\circ$ であり、水理条件は、平均水深 $H=4\text{cm}$ 、流量 $Q=4.0\text{ l/s}$ である。また、河床砂には平均粒径 0.6mm の一様砂とし、初期河床勾配は水路中心線上で $1/300$ である。実験では、約 2 時間通水し、上流から 5 分間隔で $1.443\text{ cm}^3/\text{s}$ 給砂を行った。さらに、外岸に河床波が十分に発達した状態で河床を固定し、2 次元電磁流速計を用いて詳細な流速の測定を行っている。図-2に流速測定時における湾曲部の河床変動量を示す。これより、曲線流入部より 55° 付近で最大洗掘が生じ、また、内岸に形成される砂州の背面でも洗掘が生じることがわかる。

図-1 檜谷らの実験における一様湾曲水路の概要

図-2 檜谷ら¹⁾の実験における水路湾曲部の河床変動量

3. 数値解析法

3.1 基礎式

本研究における数値解析モデルは RANS の三次元モデルを採用している。モデルの基礎式は、流速ベクトル反変成分に関する移動一般曲線座標系における三次元流れの式である。移動座標系を採用した理由は、水面の変動に適合する計算格子を用いるためである。基礎式は以下に示す連続式、運動方程式、 k 方程式、 ε 方程式の4つで構成される。

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^a}{\partial \xi^a} \sqrt{g} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i (V^j - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i \\ = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j \left[-\overline{v^i v^j} \right] + 2\nu \nabla_j S^{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_j [k (V^j - W^j)] + k \nabla_j W^j \\ = -g_{il} \overline{v^l v^j} \nabla_j V^i - \varepsilon + \nabla_j \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i k \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla_j [\varepsilon (V^j - W^j)] + \varepsilon \nabla_j W^j = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} g_{il} \overline{v^l v^j} \nabla_j V^i \\ - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla_j \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i \varepsilon \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 ξ^i : 計算空間の空間座標、 t : 時間、 V^i : 流速ベクトルの反変成分、 W^j : 格子移動速度ベクトルの反変成分、 v^j : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 ν_t : 過動粘性係数、 ρ : 流体の密度、 $\overline{v^i v^j}$: レイノルズ応力の反変成分、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギー散逸率、 F^i : 重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表す。ここで、モデル定数としては標準的な値である、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1}=1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2}=1.92$ を用いる。 g_{ij} 、 g^{ij} は計量テンソルの共変成分及び反変成分であり、次のような関係がある。

$$g_{ij} = \frac{\partial x^k}{\partial \xi^i} \frac{\partial x^l}{\partial \xi^j} \delta_{kl}, \quad g^{ij} = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^i} \frac{\partial \xi^l}{\partial x^j} \delta_{kl}, \quad g_{ij} g^{jk} = \delta_i^k \quad (5)$$

ここに、 δ_{kl} 、 δ^{kl} はクロネッカーのデルタ、 x^j はデカルト座標系を表す。また、

$$g = \det[g_{ij}] \quad (6)$$

である。さらに、 ∇_j は共変微分を表し、例えば、あるベクトルの反変成分 A^k に関しては、次のようになる。

$$\nabla_i A^k = \frac{\partial A^k}{\partial \xi^i} + A^j \Gamma_{ij}^k \quad (7)$$

ここに、 Γ_{ij}^k はクリストッフェルの記号（接続の係数）であり、次式で計算される。

$$\Gamma_{ij}^k = \left\{ \begin{matrix} k \\ i j \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{km} \left(\frac{\partial g_{jm}}{\partial \xi^i} + \frac{\partial g_{im}}{\partial \xi^j} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial \xi^m} \right) = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^p} \frac{\partial^2 x^p}{\partial \xi^i \partial \xi^j} \quad (8)$$

なお、流速ベクトルの反変成分(V^i)と直交成分(U^i)は次の関係 (chain rule) により変換される。

$$U^i = \frac{\partial x^i}{\partial \xi^j} V^j, \quad V^i = \frac{\partial \xi^i}{\partial x^j} U^j \quad (9)$$

3.2 乱流モデル

本研究では乱流モデルとして、Hosoda⁴⁾らによる二次非線形 k - ε モデルを採用している。以下に二次非線形 k - ε モデルの構成則を示す。

$$-\overline{v^i v^j} = v_i S^{ij} - \frac{2}{3} k g^{ij} - \frac{k}{\varepsilon} v_i (\alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 + \alpha_3 Q_3) \quad (10)$$

$$v_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$Q_1 = S^{i\alpha} g_{\alpha i} \Omega^{ij} + S^{i\beta} g_{\beta i} \Omega^{ij} \quad (12)$$

$$Q_2 = S^{i\alpha} g_{\alpha i} S^{ij} - S^{k\alpha} g_{\alpha m} S^{m\beta j} g_{\beta k} \delta_i^j g^{ij} / 3 \quad (13)$$

$$Q_3 = \Omega^{i\alpha} g_{\alpha i} \Omega^{ij} - \Omega^{k\alpha} g_{\alpha m} \Omega^{m\beta j} g_{\beta k} \delta_i^j g^{ij} / 3 \quad (14)$$

$$S^{ij} = g^{j\alpha} \nabla_\alpha V^i + g^{i\alpha} \nabla_\alpha V^j \quad (15)$$

$$\Omega^{ij} = g^{j\alpha} \nabla_\alpha V^i - g^{i\alpha} \nabla_\alpha V^j \quad (16)$$

モデル係数は、ストレインパラメータ S とローテーションパラメータ Ω の次のような関数で与える。

$$\alpha_1 = -0.1325 f_M \quad (17)$$

$$\alpha_2 = 0.0675 f_M \quad (18)$$

$$\alpha_3 = -0.0675 f_M \quad (19)$$

$$f_M = (1 + m_{ds} S^2 + m_{d\Omega} \Omega^2) \quad (20)$$

$$c_\mu = c_{\mu 0} (1 + c_{ns} S^2 + c_{n\Omega} \Omega^2) / D_\mu \quad (21)$$

$$D_\mu = 1 + c_{ds} S^2 + c_{d\Omega} \Omega^2 + c_{ds\Omega} S\Omega + c_{ds1} S^4 + c_{d\Omega 1} \Omega^4 + c_{ds\Omega 1} S^2 \Omega^2 \quad (22)$$

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S^{i\alpha} g_{\alpha j} S^{j\beta} g_{\beta i}} \quad (23)$$

$$\Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega^{i\alpha} g_{\alpha j} \Omega^{j\beta} g_{\beta i}} \quad (24)$$

ここに、モデル定数としては、 $m_{ds}=m_{d\Omega}=0.01$, $c_{ns}=0.0028$, $c_{n\Omega}=0.007$, $c_{ds}=0.0085$, $c_{d\Omega}=0.004$, $c_{ds\Omega}=0.003$, $c_{ds1}=0.00005$, $c_{d\Omega 1}=0.00005$, $c_{ds\Omega 1}=0.00025$, $c_{\mu 0}=0.09$ を用いる。モデル関数や定数の同定については文献⁴⁾を参照されたい。

3.3 流砂モデル

本研究では平衡流砂モデルを用いて河床変動を評価する。流砂は掃流砂のみを対象とし、流線方向の掃流砂量は Kovacs・Parker 式を単純化した泉・山口の式⁵⁾、横断方向には長谷川式で評価している。そして、得られた流砂量フラックスを一般座標系に変換し、河床の連続式を用いて時間的変化の計算を行う。以下に、一般座標系における河床の連続式、泉・山口の式、長谷川式を示す。なお長谷川式については、3次元計算であるため、2次流項を無視している。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_B^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_B^\eta}{J} \right) \right) = 0 \quad (25)$$

$$q_{Bs} = \frac{K}{\left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c \right)} \left[\tau^* - \tau_c^* \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c \right) \right] \times \left[\tau^{*1/2} - \tau_c^{*1/2} \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial x} / \mu_c \right)^{1/2} \right] \quad (26)$$

$$q_{Bn} = q_{Bs} \left(- \frac{\partial z_b}{\partial n} \sqrt{\frac{\tau_c^*}{\mu_s \mu_k \tau^*}} \right) \quad (27)$$

ここに、 J :二次元ヤコビアン、 λ :河床砂の空隙率、 q_B^ξ : ξ 方向の掃流砂量、 q_B^η : η 方向の掃流砂量、 z_b :河床高、 q_{Bs} :流線方向の掃流砂量、 K :補正関数、 s :流線の座標、 μ_c :動摩擦係数、 τ^* :無次元掃流力、 τ_c^* :無次元限界掃流力、 q_{Bn} :横断方向の掃流砂量、 n :横断方向の座標、 μ_k :静止摩擦係数をそれぞれ表す。なお、本モデルについては、Giri ら⁶⁾が鉛直二次元解析により砂堆が適切に再現できることを示している。

3.4 計算スキーム

数値計算法は有限体積法とし、圧力、 k および ε を直方体格子の中央で、流速ベクトルの成分を側面で定義する完全スタガード格子系を用いた。計量テンソル、クリストッフエル記号等は格子点上で定義し、計算過程で必要となる位置の値はその都度内挿によって求めた。これは計算機メモリの使用量低減のためである。本研究における計算格子上の水理量の配置を図-3に示す。

また、運動方程式、 k 方程式、 ε 方程式の移流項の離散化にはいずれも TVD-MUSCL スキームを用いた。また、運動方程式の移流項に関するクリストッフエル記号を含む付加項についても、Takizawa et al⁷⁾の研究にならい、コントロール・ボリュームの上流側で評価した。時間積分は完全陽解法とし、二次の Adams-Bashforth 法を用いた。圧力は時間ステップ毎に HSMAC 法を用いて求めた。

3.5 境界条件および水面の取り扱い

本研究では、壁面における k と ε については次のような壁関数法で与えた。

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_{\mu 0}}} \quad , \quad \varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa z_0} \quad (28)$$

ここに、 z_0 :壁から定義点までの距離、 $C_{\mu 0}$:const.(=0.09)である。また、底面近傍の流速は粗面の対数則、側壁面近傍の流速は滑面の対数則条件で評価することとした。また、上流端の k と ε は、時間ステップ毎に一つ下流側の定義点の値と等しく置き、下流端の k と ε については、勾配ゼロ条件を用いた。水面の ε は杉山ら⁸⁾の提案する次式で評価した。

$$\varepsilon_s = \frac{C_{\mu 0}^{3/4} k_s^{1/2}}{0.4 \Delta z_s} \quad , \quad (C_{\mu 0} = 0.09) \quad (29)$$

上式中において、添字 s は表層の値を、 Δz_s は水面から定義点までの距離を表す。水面の k には鉛直方向の勾配ゼロ

図-3 完全スタガード格子系における変数配置

という条件を課すこととする。また、水面近傍の鉛直方向の乱れの減衰を考慮するため、細田⁹⁾にならい、次の減衰関数を渦動粘性係数に乘じる。

$$f_{s^*} = 1 - \exp \left\{ -B(h-z)\varepsilon_{s^*}/k_{s^*}^{3/2} \right\}, \quad (B=10) \quad (30)$$

自由水面変動量は、反変成分表示の基礎式において次式を用いて計算される(Takizawa et al⁷⁾).

$$\Delta h = \sqrt{g_{33}} V^3 \Delta t \quad (31)$$

ここに、 Δt : 計算時間間隔、 Δh : Δt 時間の水面変動量を表わし、添字の 3 は鉛直方向を表すものとする。

4. 数値計算モデルの再現性の検討

4.1 計算格子の設定および計算手順

(1) 計算格子

本研究では檜谷らの実験を対象に再現性の検討を行う。まず、流れの再現性の検討を行うために、実験より得られた河床形状を適用した固定床上の流れを検討する (Run A)。次に、河床変動の再現性を検討するため、初期が水平床から移動床の計算を行い実験結果との比較を行う (Run B)。図-4 に計算格子の水路平面図を示す。計算段階では、檜谷らの実験水路とは鏡に投影した水路で計算を行っている。計算格子数は主流方向(ξ 方向)、横断方向(η 方向)、鉛直方向(ζ 方向)それぞれ $132 \times 30 \times 16$ であり、総計算格子数は 63,360 である。主流方向の計算格子は、水路直線部では水路曲線部に向かい格子幅を等比級数的に小さく、水路曲線部では曲率偏角 1.25° ごとに等間隔とした。ただし、水路の流入部および流出部の計算格子 3 つには計算の安定化を図るために等間隔の格子幅となるよう設定した。横断方向については河岸に近づくほど格子幅を等比級数的に小さく、水深方向には等間隔となる格子幅とした。また、河床変動後固定床の計算モデルについては、実験結果の河床高から水

図-4 数値計算における平面内の計算格子

路底面の格子点に近い座標 3 点抽出し、距離の逆数の二乗の重み付き平均により格子点座標の河床高を内挿した。

(2) 計算手順

計算手順として、計算上流端条件を求めるために直線部のみを対象に周期境界条件を用いた予備計算を行い、十分に発達した直線水路の流況を求めた。そして直線水路における予備計算により得られた流速と k, ε 値を水路曲線領域の上流端に与え、流れがほぼ定常となるまで計算を行った。

4.2 流れの再現性の検討

(1) 平面流速ベクトル

図-5 に、(a)実験、(b)数値計算 (Run A) における水面付近および底面付近における平面流速ベクトルを示す。実験では 40° 付近より内岸からの主流の剥離が生じ、最大洗掘深が生じる外岸 55° 付近に向けて流れが集中していく様子が確認される。そして、内岸には逆流域が形成され、さらに、 55° 以降では外岸部に集中していた流れは内岸方向へと発散する様な流況を示している。特に底面付近においてこのいずれの傾向も顕著に表れている。一方、数値計算では主流の剥離に伴う逆流域の形成、外岸への流れの集中、および底面付近で内岸への発散傾向が強くなる部分などが良好に再現され、本数値計算モデルが実験における一様湾曲水路の流れ構造の傾向を概ね再現できることが確認される結果となった。

(2) 横断方向流速の鉛直分布

図-6 に湾曲部各断面における横断方向流速の鉛直分布の比較を示す (Run A)。実験では、洗掘孔 ($=60^\circ$) より上流側では外岸部において実験値同様の 2 次流の発達が認められる。この洗掘孔上流側、特に 30° および 40° 断面では計算値は実験結果を概ね再現できていることが分かる。しかしながら、洗掘孔の発達した $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 断面においては外岸の水面付近で、数値計算結果では二次流と逆方向きの渦状流れである外岸セルが生じてしまい、水面付近において再現性があまり良好ではない。これは数値解析では

(a) 檜谷ら¹⁾による実験値

(b) 計算値 (Run A)

図-5 平面流速ベクトルの比較

図-6 横断方向流速鉛直分布の比較 (Run A)

図-7 最大洗掘深で無次元化した河床変動量の比較(Run B)

面近傍の乱れの減衰を過小評価している可能性が考えられ、モデルの改良が必要な箇所といえる。しかしながら、河床付近の流速分布については概ね再現できている。一方、湾曲部終盤の 80°断面では流速分布は正負が真逆になるという結果が得られた。この部分の再現性が局所的に悪い原因として、外岸セルを過大評価してしまい、その影響が下流側まで残っていることと、本数値解析モデルの河床位の座標が実験結果より補間して得られたものであるため正確な河床形状を再現できていなかった可能性が指摘される。しかしながら、本数値解析モデルは実験における三次元流れ構造をほぼ再現できていると考えられる。

4.3 河床変動の再現性の検討

図-7 に、(a)実験、(b)数値計算 (Run B) における河床変動量を示す。本研究では三次元計算を用いたため、計算時間をかなり要するため、実験に相当する時間の計算を行っていない。そのため、実験では最大洗掘深が 10.15cm であったのに対し、計算では 7.234cm である。ここで、実験での最大洗掘深の測定は実験開始より 2 時間後であり、計算では河床変動開始より 1000 秒後である。そこで今回は最大洗掘深で河床変動量を無次元化し河床変動の大まかな傾向の比較を行うこととする。河床変動形態を比較すると、外岸の洗掘域の占有範囲や位置、局所的な洗掘孔が生じる点、内岸の堆積域の占有範囲などはよく再現できている。しかしながら、実験では内岸でも 50°断面以降では洗掘域に変わっているが計算結果ではそれが見られない。また、最大洗掘深や最大堆積高が生じる地点は計算結果では実験結果より下流側に位置してしまっており、さらに、実験では砂堆が明確に発生しているが計算では明確な砂堆が見られない。これらは計算による河床形状はまだ計算時間が短いことや、砂堆の下流方向への移動が考えられる。しかしながら、コンターには曲線流入部より 80°から 90°の外岸洗掘域にわずかながらくびれが生じており、砂堆生成の初期段階を捉えているものと考えられる。従って、全体的な

河床変動の傾向についてはほぼ再現できていると考えられる。

5. 河床変動形態に関する数値解析の実験

5.1 数値解析の実験概要

前述の数値計算モデルが河床変動の傾向を十分良好に再現できたと判断できたので、そのモデルを用いて水路条件を様々に変化させて河床変動形態がどのように変化するのかについての数値解析的に実験を行って確認した。

5.2 計算条件

表-1 に今回数値解析の実験に用いた水路条件を示す。Run 1 は前述の檜谷らの実験と同等の水路である。また、Run 2 では Run 1 の曲率半径を 2 倍($R=120\text{cm}$)としたものである。さらに、Run 3 は Run 1 の条件において流量を一定のまま Froude 数を半分にするために、水深と水路床勾配を調節したモデルとなっている。今回着目したパラメータは Froude 数、Dean 数、水深曲率半径比($=h/R$)、水路幅曲率半径比($=B/R$)の 4 つのパラメータであり、このパラメータの違いが河床変動形態の変化に及ぼす影響を調べる。なお、Dean 数は以下のように定義される。

$$D_e = R_e \sqrt{h/R} \quad (32)$$

ここに、 D_e : Dean 数、 R_e : Reynolds 数、 h : 計算開始時の平均水深、 R : 水路中心線の曲率半径である。

5.3 計算結果と考察

図-8 に、(a)Run 1、(b)Run 2、(c)Run 3、における河床変動量を最大洗掘深で無次元化した結果を示す。いずれも計算時間は 1000 秒間である。いずれも砂堆が発生する条件であるが、Run 3 では砂堆が確認できない。これは Run 3 では河床砂が動きにくい条件であり、明確な砂堆が発生するに至らないためであると考えられる。一方、Run 1 と Run 2 では、波長 30~40cm 程度の砂堆が曲線終盤部に生じてい

表-1 数値解析の実験における各 Run の計算条件

	曲率半径 R [m]	水路勾配 i [-]	平均水深 h [m]	平均流速 v [m/s]	Froude 数 F_r [-]	Reynolds 数 Re [-]	Dean 数 De [-]	h/R [-]	B/R [-]
Run 1	0.60	1/300	0.04000	0.5000	0.7982	20000	5164.0	0.0667	0.3333
Run 2	1.20	1/300	0.04000	0.5000	0.7982	20000	3651.5	0.0333	0.1667
Run 3	0.60	1/664	0.06340	0.3155	0.4000	20000	6501.3	0.1057	0.3333

図-8 最大洗掘深で無次元化した各 Run の河床変動量(計算時間 $t=1000[\text{sec}]$)

図-9 室内実験で用いた水路の概要

表-2 室内実験における各ケースの実験条件

	水路勾配 i [-]	平均水深 h [mm]	平均流速 v [m/s]	流量 Q [l/s]	Froude 数 F_r [-]	Reynolds 数 Re [-]	Dean 数 De [-]	h/R [-]	B/R [-]
ケース 1	1/100	4.375	0.1408	0.0616	0.6798	616.1	105.2	0.0292	0.6667
ケース 2	1/100	3.750	0.1554	0.0583	0.8101	582.7	92.1	0.0250	0.6667
ケース 3	1/100	2.500	0.1496	0.0374	0.9553	374.0	48.3	0.0167	0.6667

ることが確認された。また、Run3 に着目すると湾曲部外岸の一部分に集中して局所的に洗掘が生じているのが確認できる。一方、曲率半径の大きいRun2 では水路外岸の曲線に沿った連続的な洗掘が生じている。そして、Run1 では局所的な洗掘と連続的な洗掘を併せ持っており、Run2 と Run3 の中立的な河床変動形態であるといえる。局所的洗掘の発生メカニズムは、主流が湾曲部外岸側壁に衝突して、潜り込むことにより生じる馬蹄渦と類似の渦構造に、また、連続的洗掘は第一種二次流に起因して生じていると推察される。ここで、各種パラメータを比較してみると、Dean 数と水深曲率半径比の2つが大きいと局所的洗掘が生じ、これら2つが小さいと連続的洗掘が生じる傾向がある。したがって、湾曲部における河床変動形態の違いはDean 数と水深曲率半径比に依存している可能性が高いと考えられる。一方、この数値実験を通じて、Froude 数が湾曲部河床変動形態の決定に直接の影響を及ぼさない可能性が高いといえる。また、幅曲率半径比についてはこの実験では小さい場合に連続的洗掘が生じているが、後述の室内模型実験で河床変動形態の決定に支配的では無いことがわかっている。

6. 河床変動形態に関する室内模型実験

6.1 水路概要

図-9 に室内模型実験で使用した水路の概略を示す。水路は曲率偏角 $\theta=180^\circ$ 、曲率半径 $R=15\text{cm}$ 、水路幅 $B=10\text{cm}$ 、水路勾配 $i=1/300$ の U 字型水路である。また、河床砂には 5 号珪砂(中央粒径 0.5mm)を用いた。

6.2 実験条件

表-2 に各ケースにおける実験条件を示す。ケース 1 から 3 に行くにつれて流量を小さくするように設定している。なお、今回は河床変動形態の大まかな傾向のみの観察とし、河床位等の測定は行っておらず、流量と水位のみを測定している。水位の測定は図-9 の a (水路流入部)、b (曲線流入部)、c (曲線流出部)、d (水路流出部) の水路直線上 4 カ所で行った。また、比較するパラメータは前述の解析の実験と同様に Froude 数、Dean 数、水深曲率半径比、水路幅曲率半径比の 4 つとした。

6.3 実験結果と考察

図-10 に、(a)ケース 1、(b)ケース 2、(c)ケース 3 における最大洗掘域の様子を示す。この図からも明らかな通り流量の多いケース 1 とケース 2 では曲線流入部より 45° 付近で局所的な大きな洗掘が確認された一方で、流量の小さいケース 3 では水路外岸曲線に沿った連続的な洗掘が確認された。また、実験では河床波の生成は確認されなかった。各種パラメータについて比較してみると、前述の解析の実験同様、Dean 数と水深曲率半径比が大きいほど局所的洗掘傾向が見られ、また、それらが小さいほど連続的洗掘傾向が見られることがわかる。また、この実験では全ケース同じ形状の水路を用いているため幅曲率半径比はどれも

(a) ケース 1 の河床変動形態(撮影位置:図-9, A)

(b) ケース 2 の河床変動形態(撮影位置:図-9, A)

(c) ケース 3 の河床変動形態(撮影位置:図-9, B)

図-10 最大洗掘深の様子

同じ値となるが、局所的洗掘、連続的洗掘のいずれの場合も発生した。従って、本研究で対象とした範囲では、幅曲率半径比は河床変動形態の決定には支配的パラメータとはなっていない。解析の実験と室内実験の2つから、河床変動形態を決定づけるパラメータとして Dean 数、水深曲率半径比が挙げられる。しかしながら、その水路規模に応じてこれらの値には差が生じ、局所的洗掘と連続的洗掘の生じる境界については明確には不明である。これらのパラメータの閾値の決定は工学的に極めて重要であるが、その

(a) 男型蛇行

(b) 女型蛇行

図-11 釧路川蛇行部における航空写真

(a) 男型蛇行部(図-11 (a), A)

(b) 女型蛇行部(図-11 (b), B)

図-12 マルチビームによる釧路川蛇行部の河床位の測定値

表-3 釧路川蛇行部の各種パラメータ

蛇行形状	曲率半径 R [m]	平均水深 h [m]	平均流速 v [m/s]	川幅 B [m]	Reynolds 数 Re [-]	Dean 数 De [-]	h/R [-]
男型	40.57	2.350	0.722	42.91	1696700	408344	0.0579
女型	52.17	2.401	0.763	32.63	1831963	393003	0.0460

ためにはさらに広範な条件での検討が必要であり、今後の課題である。

7. 蛇行形状と河床変動形態の関連性

7.1 蛇行形状

実河川では様々な蛇行形状が確認される。図-11 に釧路川の蛇行部の航空写真を示す。田中ら¹⁰⁾は Parker らの助言をもとに、図-11, (a)のように鋭角に尖った蛇行形状を男型蛇行, (b)のように滑らかに曲線を描く蛇行形状を女型蛇行と呼んでいる。釧路川ではこの2つの蛇行形状がおおよそ

10km 程度のごく近くに存在しており、この蛇行形状の違いがなぜ生まれるのかということについて焦点をあてた研究が行われている。田中らはその先駆けとして、当該蛇行部の流れ構造の違いに関する研究を行っている¹⁰⁾。

7.2 蛇行部の河床変動形態

図-12 に図-11 で示した釧路川蛇行部の河床位を現地観測にてマルチビームで測定した結果を示す。この結果から、男型の蛇行部では外岸部分に局所的な洗掘域が形成されている一方で、女型では外岸曲線に沿って連続的な洗掘が生じていることがわかる。このことから、蛇行と河床変動

の関連性が示唆される。また、これらの蛇行部について Dean 数と水深曲率半径比を概算した結果を表-3 に示す。なお、曲率半径、平均水深、平均流速、川幅については現地観測によるデータをもとにしている。このことから、実河川においても実験同様、Dean 数と水深曲率半径比が大きいほど外岸の局所的洗掘を生じ、いずれも小さいほど外岸曲線に沿った連続的洗掘になるということがわかる。

8. おわりに

本研究は一樣湾曲水路を対象として、RANS による三次元数値計算を行い、その流れ構造と河床変動の再現性の検討を行うと同時に、水路の各種パラメータが河床変動形態に及ぼす影響を数値実験と室内模型実験の双方で検討したものである。主な結果は次の通りである。

- 1) 一樣湾曲水路を対象とした RANS による三次元数値計算結果と檜谷ら¹⁾による計測結果において平面流速ベクトルについては水面付近、底面付近のいずれも良好に再現することができた。一方、横断方向流速分布は湾曲部初期での再現性は良好であるが、湾曲部終盤では数値計算では水面付近の外岸セルを過大評価したが、河床付近での再現性は良好であった。このことから、本研究で使用したモデルは固定床計算において、流れ構造をほぼ再現することが可能であるといえる。
 - 2) 河床変動計算については、内岸での堆積域や外岸での洗掘域の形成などの傾向は再現できたが、内岸砂州背面の洗掘などの再現があまり良好ではない部分も見られたため、モデルの改善が必要である。
 - 3) 水理条件に応じた河床変動形態の違いに関する数値実験および室内実験の結果から、Dean 数および水深曲率半径比の 2 つのパラメータのいずれも大きい場合外岸の局所的洗掘が生じ、いずれも小さい場合は外岸水路曲線に沿った連続的洗掘が生じる傾向が見られた。しかしながら、これらのパラメータは水路規模に規模にも依存することが指摘され、普遍的な閾値は見いだせなかった。蛇行部の河床形状を支配するパラメータとその閾値の同定は工学的に重要な課題であり、今後さらに検討が必要である。
 - 4) 男型蛇行では外岸の局所的洗掘が、女型蛇行では外岸曲線部に沿った連続的洗掘が生じることがマルチビームの計測結果から指摘された。これより、実河川における蛇行平面形状と河床変動の関連性が示唆された。また、実河川においても Dean 数と水深曲率半径比の 2 つのパラメータが河床変動形態を左右する指標であることが確認された。
- 今後は、数値計算モデルの改善を進めるとともに、河床変

動形態の相違を決める閾値の決定法の提案、さらには蛇行平面形状と河床変動形態の関係に関する研究も進めていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたって、鳥取大学の檜谷治教授および梶川勇樹助教には実験データの提供を受けるとともに数々のご助言をいただいた。また、実験に際して独立行政法人土木研究所寒地土木研究所の実験水路をお借りするとともに、同所研究院吉川泰弘氏には数々のご助言をいただいた。ここに記して、深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Blanckaert, K.: Flow and turbulence in sharp open-channel bends, *PhD thesis* 2545, *Ecole Polytechnique Federale*, 2002.
- 2) Kimura, I., Hosoda, T., Takimoto, S. and Shimizu, Y.: RANS computations on curved open channel flows, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, JSCE, vol.27, No.2, pp.29-47, 2009.
- 3) 檜谷治, 道上正規, 川合茂: 一樣湾曲水路における河床変動と河床波の特性に関する実験的研究, *水工学論文集*, 第 42 巻, pp.979-984, 1998.
- 4) Hosoda, T., Ali, M. S. and Kimura, I.: A non-linear k-ε model to predict the spatial change of turbulent structures in large scale vortices, *J. of Applied Mech.*, JSCE, vol.10, pp.723-732, 2007.
- 5) Giri, S. and Shimizu, Y.: Numerical computation of sand dune migration with free surface flow, *Water Resources Research*, vol.42, W10422, 2006.
- 6) 山口里実, 泉典洋: デューン-平坦床遷移過程にみられる亜臨界分岐現象, *土木学会論文集*, 740 号, pp.75-94, 2003.
- 7) Takizawa, A., Koshizuka, S. and Kondo, S.: Generalization of physical component boundary fitted coordinate (PCBFC) method for the analysis of free-surface flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.15, pp.1213-1237, 1992.
- 8) 杉山均, 秋山光庸, 松原珠: 複断面開水路内の乱流構造解析と縦渦生成に関する研究, *土木学会論文集*, vol.515/II-31, pp.55-65, 1995.
- 9) 細田尚: 開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究, *京都大学博士論文*, 1990.
- 10) 田中梢, 清水康行, 山口里実, 岩崎理樹, 田中岳, 木村一郎: 女型と男型蛇行形状における流れ特性の研究, *土木学会北海道支部 論文報告集* 第 67 号, B-13, 2011. (2011 年 3 月 8 日 受付)