

II-39

流束差分法を用いた蛇行実験の数値解析

北海道大学工学部 学生員 大川 秀典
 北海道大学工学部 正員 清水 康行
 北海道開発局 正員 鳥谷部 寿人

1. はじめに

河川工学上、流路蛇行部における流況とそれによる土砂輸送、堆積及び洗掘の状況を把握することは非常に重要であり、河道計画の策定や、流路の安定化等に関わる問題である。このため、古くより現地観測、実験がおこなわれ、主々の研究成果が報告されており、いくつかの制約条件下ながらも流路変動などを予測しようまでに至っている。しかしながら、蛇行流路における流れの状況をより正確に解明しようとするに際しては、蛇行流路における流れの構造が複雑で、理論研究の不十分な部分もあり、十分な精度の解は得られてはいない。このような蛇行流路状況を検討する手段としては、一般的には解析解を求める方法¹⁾や数値解析による方法²⁾があるが、前者においては、基礎式の簡略化をおこなう必要があり、後者も極端な水位差を伴う流れや常射流混在流れでは計算の安定性を保つことは難しく、より安定性の優れた計算法が求められている。本研究では、数年間にわたっておこなっている一連の蛇行実験中の、侵食性河岸蛇行水路実験に着目し、最近、航空力学の分野等で圧縮性流れの計算法として注目されているFDS法(Flux Difference Splitting scheme: 流束差分法)^{3,4)}をこの実験に適用することを試みる。FDS法においては従来の差分法とは異なり、数値流束といった概念を導入し、この数値流束を流れの特性の伝播方向に分割して配分をおこなう。このFDSは衝撃波の捕捉を目的に開発された手法であり、跳水や断波等の不連続を含む流れにおいても対応でき、理論的にも計算アルゴリズム上においても明快であり取り扱いも易しい。したがって、多次元問題や、一般座標系への拡張も容易であり、より一般的な実河川の問題へ適用が可能と考えられる。著者らは、まず元々圧縮性流体を対象に構築されているFDS法の基礎式を非圧縮性開水路の2次元流れに対して適用可能なものへと再構築をおこなった。その際に将来の実河川への適用を考慮して一般座標系を採用し、また、これを用いて計算モデルを開発し、2次元段波の理論と比較することによりモデルの検証をおこなっている⁵⁾。

本論文では、非圧縮性開水路の2次元流れに対して構築されたFDS法の基礎式を用いて、蛇行実験の流況再現計算を試み、その結果よりモデルの考察をおこなうこととする。

2. 基礎式

2次元の浅水方程式を以下の保存型で表す。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y} + \frac{\partial G_1}{\partial x} + \frac{\partial G_2}{\partial y} = \Omega \quad (1)$$

$$Q = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, F_1 = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, F_2 = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, G_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\varepsilon \frac{\partial uh}{\partial x} \\ -\varepsilon \frac{\partial vh}{\partial x} \end{pmatrix}, G_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\varepsilon \frac{\partial uh}{\partial y} \\ -\varepsilon \frac{\partial vh}{\partial y} \end{pmatrix}, \Omega = \begin{pmatrix} 0 \\ gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \\ gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \end{pmatrix}$$

ここで、 h は水深、 u, v は流速成分、 z は河床高、 n は粗度係数、 g は重力加速度、 ε は渦動粘性係数、 (x, y) は直交する座標軸である。(1)式を一般座標系 (ξ, η) に変換する。座標 (x, y) と一般座標 (ξ, η) との関係は以下に示す通りである。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_x & \eta_x \\ \xi_y & \eta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \eta_y & -\eta_x \\ -\xi_y & \xi_x \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y \\ x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Calculation of Meandering Flow using FDS.
 by Hidenori OKAWA, Yasuyuki SHIMIZU and Toshihito TOYABE

ここで、 (ξ, η) は一般座標軸であり、 J は座標変換による Jacobian、である。また、

$$x_\xi = \frac{\eta}{J}, \quad y_\xi = -\frac{\eta_x}{J}, \quad x_\eta = -\frac{\xi_x}{J}, \quad y_\eta = \frac{\xi_y}{J} \quad \xi_x = Jy_\eta, \quad \xi_y = -Jx_\eta, \quad \eta_x = -Jy_\xi, \quad \eta_y = Jx_\xi \quad (3)$$

の関係より

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta} \quad (4)$$

と表される。以上より(1)式を ξ と η による偏微分項に書き換えると、次式が得られる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \xi_x \frac{\partial F_1}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial F_2}{\partial \eta} + \xi_y \frac{\partial F_1}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial F_2}{\partial \eta} + \xi_x \frac{\partial G_1}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial G_2}{\partial \eta} + \xi_y \frac{\partial G_1}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial G_2}{\partial \eta} = \Omega \quad (5)$$

さらに、(3)~(4)式の関係を用いると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\xi_x}{J} F_1 + \frac{\xi_y}{J} F_2 \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\eta_x}{J} F_1 + \frac{\eta_y}{J} F_2 \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\xi_x}{J} G_1 + \frac{\xi_y}{J} G_2 \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\eta_x}{J} G_1 + \frac{\eta_y}{J} G_2 \right) = \frac{\Omega}{J} \quad (6)$$

となる。これを書き換えると、

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{F}_1}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{F}_2}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}_1}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{G}_2}{\partial \eta} = \tilde{\Omega} \quad (7)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= \frac{Q}{J}, \quad \tilde{F}_1 = \frac{\xi_x}{J} F_1 + \frac{\xi_y}{J} F_2 = m_x F_1 + m_y F_2, \quad \tilde{F}_2 = \frac{\eta_x}{J} F_1 + \frac{\eta_y}{J} F_2 = n_x F_1 + n_y F_2, \\ \tilde{G}_1 &= \frac{\xi_x}{J} G_1 + \frac{\xi_y}{J} G_2 = m_x G_1 + m_y G_2, \quad \tilde{G}_2 = \frac{\eta_x}{J} G_1 + \frac{\eta_y}{J} G_2 = n_x G_1 + n_y G_2, \quad \tilde{\Omega} = \frac{\Omega}{J} \end{aligned} \quad (8)$$

(7)式の擬似線形形は以下のように表される。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial Q}{\partial \xi} + B \frac{\partial Q}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}_1}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{G}_2}{\partial \eta} = \tilde{\Omega} \quad (9)$$

ここで、 A 及び B は以下の式で表される。

$$A = \frac{\partial \tilde{F}_1}{\partial Q} = \frac{\partial}{\partial Q} (m_x F_1 + m_y F_2) = m_x \frac{\partial F_1}{\partial Q} + m_y \frac{\partial F_2}{\partial Q}, \quad B = \frac{\partial \tilde{F}_2}{\partial Q} = \frac{\partial}{\partial Q} (n_x F_1 + n_y F_2) = n_x \frac{\partial F_1}{\partial Q} + n_y \frac{\partial F_2}{\partial Q} \quad (10)$$

A 及び B は行列であり、

$$A = \begin{pmatrix} 0 & m_x & m_y \\ -uU_m + m_x gh & U_m + m_x u & -V_m + m_x u \\ -vU_m + m_y gh & V_m + m_y u & U_m + m_y v \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & n_x & n_y \\ -uU_n + n_x gh & U_n + n_x u & -V_n + n_x u \\ -vU_n + n_y gh & V_n + n_y u & U_n + n_y v \end{pmatrix} \quad (11)$$

と書ける。ただし、

$$U_m = m_x u + m_y v, \quad V_m = m_x v - m_y u, \quad U_n = n_x u + n_y v, \quad V_n = n_x v - n_y u \quad (12)$$

Jacobian行列 A 、 B は3行3列であるから固有値を3つ持つ。 A の固有値を λ_a 、 B の固有値を λ_b とすると λ の値は、 $|A - \lambda I| = 0$ より求まる。ただし、 I は単位行列である。これを解くと、

$$\begin{aligned} \lambda_{a1} &= U_m, \quad \lambda_{a2} = U_m + \sqrt{gh} \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = U_m + cM, \quad \lambda_{a3} = U_m - \sqrt{gh} \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = U_m - cM \\ \lambda_{b1} &= U_n, \quad \lambda_{b2} = U_n + \sqrt{gh} \sqrt{n_x^2 + n_y^2} = U_n + cN, \quad \lambda_{b3} = U_n - \sqrt{gh} \sqrt{n_x^2 + n_y^2} = U_n - cN \end{aligned} \quad (13)$$

となる。固有値行列を D と定義すれば、

$$D_a = \begin{pmatrix} \lambda_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{a3} \end{pmatrix}, \quad D_b = \begin{pmatrix} \lambda_{b1} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{b3} \end{pmatrix} \quad (14)$$

となる。次に右固有値行列、左固有値行列を求める。 A 、 B の右固有値ベクトルを I_a 、 I_b とすると、右固有値ベクトルの定義、 $I_a A = \lambda_a I_a$ より、次式が得られる。

$$\begin{aligned} I_{a1} &= (V_m, -m_y, m_x), \quad I_{a2} = (\lambda_{a3}, -m_y, -m_x), \quad I_{a3} = (\lambda_{a2}, -m_y, -m_x) \\ I_{b1} &= (V_n, -n_y, n_x), \quad I_{b2} = (\lambda_{b3}, -n_y, -n_x), \quad I_{b3} = (\lambda_{b2}, -n_y, -n_x) \end{aligned} \quad (15)$$

したがって、 L を右固有値行列とすると、

$$L_a = \begin{pmatrix} V_m & m_y & -m_x \\ U_m - cM & -m_y & -m_x \\ U_m + cM & -m_y & -m_x \end{pmatrix}, \quad L_b = \begin{pmatrix} V_n & n_y & -n_x \\ U_n - cN & -n_y & -n_x \\ U_n + cN & -n_y & -n_x \end{pmatrix} \quad (16)$$

となる。また、 A 及び B の左固有値行列を R_a 及び R_b とすると、 $LR = I$ より

$$R_a = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{2cM} & \frac{1}{2cM} \\ \frac{m_y}{M^2} & \frac{-m_x\lambda_{a2} + m_yV_m}{2cM^3} & \frac{m_x\lambda_{a3} - m_yV_m}{2cM^3} \\ -\frac{m_x}{M^2} & \frac{-m_y\lambda_{a2} - m_xV_m}{2cM^3} & \frac{m_y\lambda_{a2} + m_xV_m}{2cM^3} \end{pmatrix}, \quad R_b = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{2cN} & \frac{1}{2cN} \\ \frac{n_y}{N^2} & \frac{-n_x\lambda_{b2} + n_yV_n}{2cN^3} & \frac{n_x\lambda_{b3} - n_yV_n}{2cN^3} \\ -\frac{n_x}{N^2} & \frac{-n_y\lambda_{b2} - n_xV_n}{2cN^3} & \frac{n_y\lambda_{b2} + n_xV_n}{2cN^3} \end{pmatrix} \quad (17)$$

が得られる。上記の諸式より(9)式は(18)式のように書き換えられる。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t} + R_a D_a L_a \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \xi} + R_b D_b L_b \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}_1}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{G}_2}{\partial \eta} = \tilde{\Omega} \quad (18)$$

3. 計算法

(7)式を離散化して書き直すと(19)式の様になる。

$$\tilde{Q}_{i,j}^{n+1} = \tilde{Q}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta \xi} \left\{ \partial \tilde{F}_{1,i,j}^n + (\tilde{G}_{1,i+1/2,j}^n - \tilde{G}_{1,i-1/2,j}^n) \right\} - \frac{\Delta t}{\Delta \eta} \left\{ \partial \tilde{F}_{2,i,j}^n + (\tilde{G}_{2,i+1/2,j}^n - \tilde{G}_{2,i-1/2,j}^n) \right\} + \Delta t \tilde{\Omega}_{i,j}^n \quad (19)$$

ここで上付き添え字 n は時間ステップ、下付き添え字 (i, j) は格子点の番号、 Δt は計算上の時間刻み幅、 $\Delta \xi$ 、 $\Delta \eta$ は一般座標上の格子間隔である。(19)式中の $\partial \tilde{F}_{1,i,j}^n$ および $\partial \tilde{F}_{2,i,j}^n$ については次式で求められる。

$$\partial \tilde{F}_{1,i,j} = R_a D_a L_a \partial \tilde{Q}, \quad \partial \tilde{F}_{2,i,j} = R_b D_b L_b \partial \tilde{Q} \quad (20)$$

ただし、 $\partial \tilde{F}_{1,i,j}$ および $\partial \tilde{F}_{2,i,j}$ はそれぞれ3つの要素を持ち、それぞれの要素は、(20)式の右辺での固有値の正負により2種類の選択がある。例えば(20)式の $\partial \tilde{F}_{1,i,j}$ は、(21)式のように扱う。

$$\begin{aligned} \partial \tilde{F}_{1,i,j} = R_a^n_{i+1/2,j} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \lambda_{a1,i+1/2,j} + |\lambda_{a1,i+1/2,j}| & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{a2,i+1/2,j} + |\lambda_{a2,i+1/2,j}| & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{a3,i+1/2,j} + |\lambda_{a3,i+1/2,j}| \end{pmatrix} L_a^n_{i+1/2,j} (\partial \tilde{Q}_{i+1,j}^n - \partial \tilde{Q}_{i,j}^n) \\ + R_b^n_{i-1/2,j} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \lambda_{b1,i-1/2,j} + |\lambda_{b1,i-1/2,j}| & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{b2,i-1/2,j} + |\lambda_{b2,i-1/2,j}| & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{b3,i-1/2,j} + |\lambda_{b3,i-1/2,j}| \end{pmatrix} L_b^n_{i-1/2,j} (\partial \tilde{Q}_{i,j}^n - \partial \tilde{Q}_{i-1,j}^n) \end{aligned} \quad (21)$$

(13)式で示した固有値の正負を基準として、固有値が正ならば $(i+1/2, j)$ 点の、負ならば $(i-1/2, j)$ 点での値を採用する。横断方向も同様である。また、格子点 $(i, j+1/2)$ での R 、 D 、 L が必要となるが、(22)式⁶⁾より対応する格子点での流速、水深を求め、この値を用いて、(12)式および(16)、(17)式より R 、 D 、 L の要素の値を求める。

$$\begin{cases} u_{i+1/2,j} = \frac{\sqrt{h_{i,j}} u_{i,j} + \sqrt{h_{i+1,j}} u_{i+1,j}}{\sqrt{h_{i,j}} + \sqrt{h_{i+1,j}}}, & v_{i+1/2,j} = \frac{\sqrt{h_{i,j}} v_{i,j} + \sqrt{h_{i+1,j}} v_{i+1,j}}{\sqrt{h_{i,j}} + \sqrt{h_{i+1,j}}}, & c_{i+1/2,j} = \sqrt{g \frac{h_{i,j} + h_{i+1,j}}{2}} \\ u_{i,j+1/2} = \frac{\sqrt{h_{i,j}} u_{i,j} + \sqrt{h_{i,j+1}} u_{i,j+1}}{\sqrt{h_{i,j}} + \sqrt{h_{i,j+1}}}, & v_{i,j+1/2} = \frac{\sqrt{h_{i,j}} v_{i,j} + \sqrt{h_{i,j+1}} v_{i,j+1}}{\sqrt{h_{i,j}} + \sqrt{h_{i,j+1}}}, & c_{i,j+1/2} = \sqrt{g \frac{h_{i,j} + h_{i,j+1}}{2}} \end{cases} \quad (22)$$

数値計算の際に、常流から射流へ遷移する個所においては膨張衝撃波が生じ連続的な解が得られないことがあり、この膨張衝撃波を除去する必要がある。これについてはSawadaら⁷⁾の結果を参考とする。具体的には、膨張衝撃波の発生する計算点において、この膨張衝撃波の発生する $\partial \tilde{F}$ の要素の値の1/2をそれぞれ上下流の計算点に配分する。移流項以外の項については、ソース項および粘性項共に一般座標へと変換し、粘性項は中央差分によって離散化され、移流項の付加項として取り扱う。ソース項の河床勾配も同様に中央差分を用いることとする。

4. 蛇行実験と数値計算との比較

4. 1 実験条件及び実験方法

実験装置は開発局開発土木研究所内の長さ25m、幅3mの可傾斜架台を用い、架台上に概ね17cm厚で砂を敷き詰めた。河床砂は珪砂3号、珪砂5号及び珪砂特8号からなる混合砂を用いている。混合砂の配合比は北海道の一级河川の河床材料調査による単列交互砂州河道の粒度分布を参考にしている。この架台上に初期水路を作成し、通水をおこなった。初期水路平面形状については、実際の蛇行河川を近似的に再現できるSine-generated Curveを用い、水路の最大蛇行角、蛇行波長、流量等は、開発土木研究所でおこなわれた一連の固定壁蛇行水路実験の中から、交互砂州が発生し停止するような実験を参考にし、この実験の条件を今回の実験に用いることとした(表-1)。また、当初の予想として観測地点を水路下流とすることにより、水路上流側の側岸侵食による給砂で十分であると思われた。そのため流砂の循環、給砂等はおこなっていない。

本実験では合計通水時間を、前もっておこなった予備実験より360分間とし、通水を5回に分け、通断水を繰り返して実験をおこなっている。また、通水中に水位測定、流速測定をおこない、通水終了ごとに、水路平面形状の写真撮影及び自動河床読取装置による観測区間の河床形状測定をおこなった。

4. 2 計算条件

前節で示したFDSを用いて、蛇行実験・通水時間360分間における再現計算をおこないモデルの適用性、発展性について検討をおこなう。

計算範囲は実験中に河床測定をおこなった実験水路上流より11.193m地点から20.613m地点までとし、実験水路初期平面形状において2波長の長さ当たる。計算に用いるメッシュは図-3のようにし、流下方向51分割、横断方向15分割、流下方向の格子間隔は10cm～40cm程、横断方向では4cm～7cm程である。境界条件は計算格子上下端で流束の空間的な変化は無とし、左右岸については水路外側に仮想格子を加え、水路内側のもっとも側岸よりの格子上の流速と正負逆の値を与える。これにより側岸上の流速は計算上無くなる。また、本実験のように粗度が小さく、砂州上の水深が非常に浅い状態においては(1)式中の摩擦項の評価では実情に合わない。具体的には、水深が非常に浅くなった場合、摩擦抵抗も薄層流としての取り扱いが当然必要となる。ただ、本研究の主眼は薄層流の研究ではないので便宜的に図-4のように水深の浅い地点($h < h_r$, h は水深、 h_r は粗度が変化すると仮定した限界の水深)ではManningの粗度係数を直線的に上げることにした。

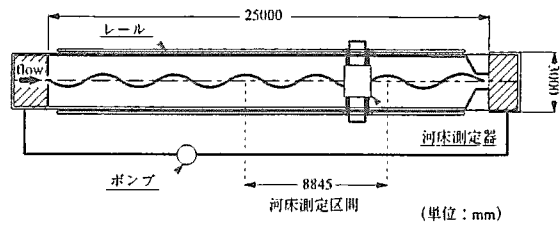


図-1 実験架台概略図

$$\theta = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi s}{L}\right) \quad (23)$$

θ : 水路蛇行角、 θ_0 : 水路最大蛇行角
 L : 水路蛇行長、 s : 水路中心線に沿った距離

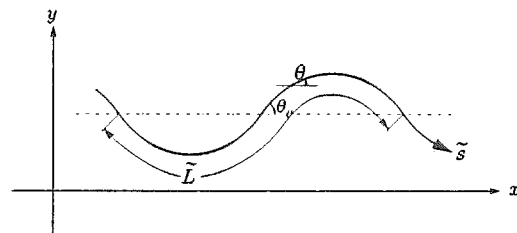


図-2 蛇行角等の定義図

表-1 実験条件

実験対象ケース	exp3
流量 Q (l/s)	1.5
初期水路勾配 I	1/161
初期水路最大蛇行角 θ (deg)	28.662
初期水路蛇行長 L (m)	4.71
河床材料・50%粒径 d_{50} (mm)	0.952

表-2 計算条件

粗度係数 n	0.005
渦動粘性係数 ϵ	0.0001

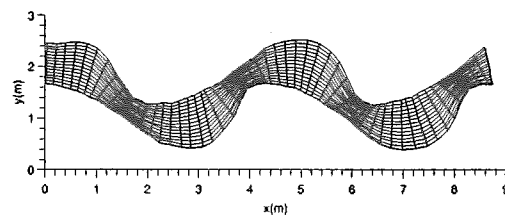


図-3 計算メッシュ図

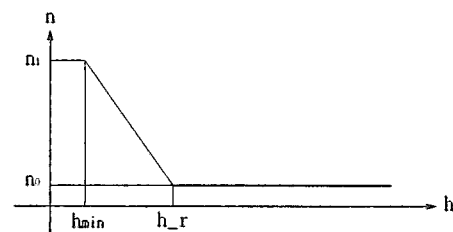


図-4 粗度係数の変化

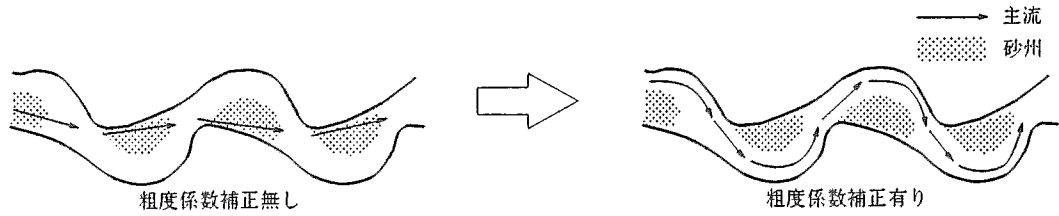


図-5 粗度係数補正による流れの変化

4. 3 計算結果

図-6及び図-7は蛇行実験・通水時間360分における測定区間の河床形状図及び実測の流速ベクトル図である。河岸の侵食、流砂の堆積等により蛇行が発達し、水路凸部付近の砂州上の水深は浅い所で数mm以下となっており、このような地点ではほぼ流速は無くなっている。ただし、実験での流速の測定方法が直径4mm程の発砲スチロール製の玉を水面上に流し、これを水路上部より写真撮影したものより流速を求めたため、図-7の流速ベクトルの値はおよそ20～30%の誤差を含んでいる。特に水深の浅い砂州上などの部分では発砲スチロール製の玉が河床に引っ掛かり正確な流速は求められてはいない。図-8は同条件下における流況計算結果である。先に述べた粗度の補正をおこなうことにより実験結果と同様に水路凸部の流速は小さく、凹部が主流となっており、蛇行部の外岸から次の蛇行部の外岸へ向かう流れが再現できている。ただし、この補正の影響により水路側岸付近ではやや流れが乱れてしまっている。図-9は横断方向水路中央部の水位を縦断方向に沿って示したものである。実測の水位と比較して、水深の浅い地点では完全には一致してないが全体として十分な精度の計算結果が得られている。図-10は水路曲頂部、x軸で5.484m地点付近の、計算での水位を示した横断面図である。同一地点での実測データが無いため比較はできないが、実験では遠心力により蛇行部の外岸部は内岸部に比べ水位が多少上がっていることが確認されている。その結果と比較すると、計算結果も同様に外岸部の水位が内岸部より上昇していることが分かるが、内岸部付近で極端に水位が下がっている部分がある。この理由としては、上流側に砂州が存在し、粗度補正によりこの流入が少なくなっているが、この地点では十分な水深が在るため粗度が急に小さくなったためであると思われる。また、この部分は実験において水深は十分に在るが流速はほとんど無く、水路の蛇行が進むにつれて、周りに流砂が堆積し初期河床の一部が取り残されてしまったような部分である。

観測結果と計算結果を比較すると、共に砂州上の流速はほぼ無く、水深と併せて比較しても流れの蛇行は十分な精度で再現できたとと言えるだろう。

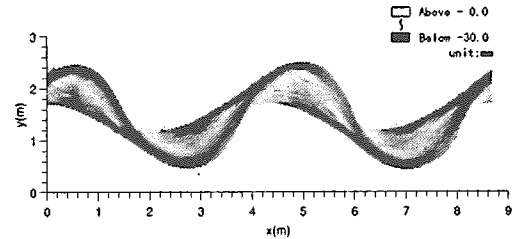


図-6 河床形状 (通水時間360分時)

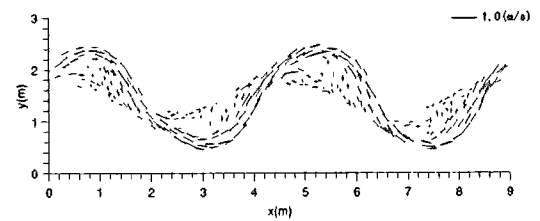


図-7 流速ベクトル図 (実測値、通水時間360分時)

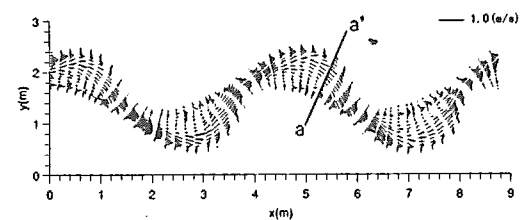


図-8 流速ベクトル図 (計算値、通水時間360分時)

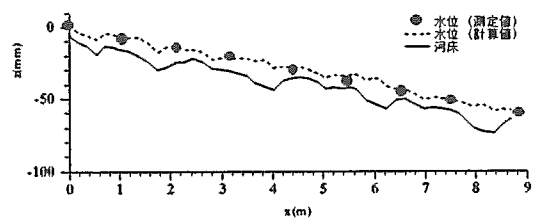


図-9 水位比較図 (縦断方向変化、水路中央部)

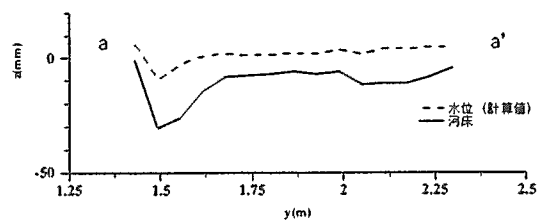


図-10 横断方向水位図 (図- 中のa-a' 地点に対応)

5. おわりに

本研究では、開水路の2次元流れに適応させたFDS法を用い、侵食性河岸蛇行水路実験の流況再現を試みた。その結果、数値計算をおこなうに際して、厳しい条件下となっている蛇行実験の流況全体を精度良く再現できることが確かめられ、実現象の特徴的な傾向を概ね捕らえることができた。また容易に計算を進めることが可能であった。ただし、側岸付近、つまり計算における境界付近の流況再現は完全なものではなく、粗度補正等の部分を含め、いくつかの検討すべき点も明らかになっている。これらは、河床と河岸の両方の変化を同時に扱うことが可能な数値計算モデルの開発につながるものであり、その中核となる流況再現計算は十分な精度が要求される。そのため、よりいっそうの計算精度向上を図る必要があると考える。

【参考文献】

- 1) 長谷川和義：沖積蛇行の平面形状および河床形状と流れに関する水理学的研究、北海道大学博士論文、1983.
- 2) 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、北海道大学博士論文、1990.
- 3) 八田夏夫：流れの計算、森北出版株式会社、1994.
- 4) 藤井孝蔵：流体力学の数値計算法、東京大学出版会、1994.
- 5) 大川秀典、清水康行、藤田睦博：FDSを用いた開水路における衝撃波を含む流れの数値計算：水工学論文集、第41巻、1997。(投稿中)
- 6) Struijs R., Deconinck H. and Roe P.L. : Computational Fluid Dynamics, VKI Lecture Series 1991-01, 1991.
- 7) K.Sawada, E. Shimada and T. Matsuda: *Memoirs of Fac. Eng., Kyoto Univ.*, 51(1986), Part 2, p. 124.
- 8) 鳥谷部寿人、渡邊康玄、清水康行、長谷川和義、大川秀典：侵食河岸による蛇行水路実験、土木学会北海道支部論文報告集、第52号、pp.212-217、1996.
- 9) 大川秀典、清水康行、長谷川和義、鳥谷部寿人：蛇行河川の流路変動に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集、第52号、pp.206-211、1996.
- 10) 清水康行、渡邊康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算、水工学論文集、第40巻、pp.921-926、1996.
- 11) 西本直史：FDSによる開水路流れの数値解析、2次元数値計算法による都市域急流河川の安全度評価システムの開発、pp.133-143
- 12) 森 明巨：最近の衝撃波捕捉理論の話題・AUSMとCIP、2次元数値計算法による都市域急流河川の安全度評価システムの開発、pp.45-57
- 13) 小澤功一：蛇行部の流れ、近代文芸社、1995.