

交互砂州形成と流路変動を対象 とした3次元数値シミュレーション例

京都大学 音田 慎一郎

1

1. 目的

- 局地的集中豪雨の出水において、河岸侵食を伴い、流路が大きく変動する現象が確認。
- 流路変動は河道計画を検討する上で非常に重要な課題。
- 水の流れによる河床変動と、横断形状における河岸の力学的不安定による崩落によるモデル化（清水ら）。
- 河床形態，河岸高，河岸の形状と土質材料，浸透流，河岸近傍の植生等の様々な要因（渡邊ら）。



音更川の堤防流出箇所¹⁾

1) <http://thesis.ceri.go.jp/db/giken/h24giken/JiyuRonbun/GT-14.pdf>

数値解析モデル

● 流れのモデル

- 水深積分モデル（デカルト座標系，円筒座標系，一般座標系，移動一般座標系）
- 3次元モデル（デカルト座標系，移動一般座標系）

● 河床変動モデル

- 平衡流砂モデル
- 非平衡流砂モデル（pickup rateとstep length，砂粒群の運動方程式を考慮）

● 河岸崩落モデル

シミュレーション例

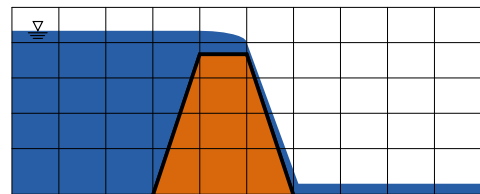
- 水深積分モデル(デカルト座標系)+平衡流砂モデル+河岸崩落モデル
- 水深積分モデル(移動一般座標系)+平衡流砂モデル+河岸崩落モデル
 - 直線・ジグザグ蛇行水路の交互砂州形成過程
 - 網状流路の発達過程
 - 混合砂河床での網状流路の動態
 - 砂州形成に伴う流路変動

3

堤防周辺の流れ（越流・浸透）を同時に予測できる
3次元流れ解析モデルの開発

流れのモデル

座標系：デカルト座標系
固相，液相：ポーラスメディア法
水面追跡：密度関数法



- 水面と河床面に沿った移動一般座標系では，越流などが扱えない。
- 河床面が境界面となり，それより下の流れは解かない。

河床変動モデル

流砂モデル：非平衡流砂モデル，弾塑性モデル
河岸崩落モデル

- 正面越流による堤防侵食
- 破堤口の拡大過程
- 浸透破壊

4

2. 数値解析モデル

【流れのモデル】

- 非定常流れの水面変動の追跡 **密度関数法Φ**
- 水域，土中，その境界を容易に表現し，堤体への浸透を同時に考慮する **ポーラスメディア法**

輸送方程式

$$\frac{\partial(1-c)\Phi}{\partial t} + \frac{\partial(1-c)u_j\Phi}{\partial x_j} = 0$$

c: 固相の体積濃度

$$c = \begin{cases} 0 & \text{水域} \\ c_0 & \text{河床材料内} \\ \frac{V_s}{V_c} c_0 & \text{水域と河床の境界} \end{cases}$$

c_0 : 河床の体積濃度
 V_s : 河床材料の体積
 V_c : セル体積

運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(1-c)u_i\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{(1-c)u_i u_j\} = (1-c)g_i - \frac{(1-c)}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{-(1-c)\overline{u'_i u'_j}\}$$

$$+ v \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (1-c) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} - \frac{v(1-c)^2 u_i}{K_d} \quad \text{Darcy則を適用}$$

$$\rho = \Phi \rho_{liq} + (1-\Phi) \rho_{gas}, \quad \mu = \Phi \mu_{liq} + (1-\Phi) \mu_{gas}$$

- 数値拡散による界面のぼやけを防ぐ：**密度関数の補正**

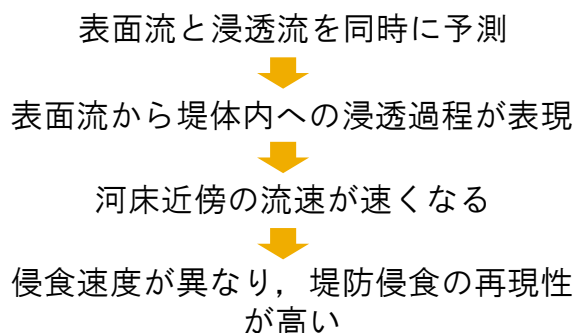
5

【乱流モデル】

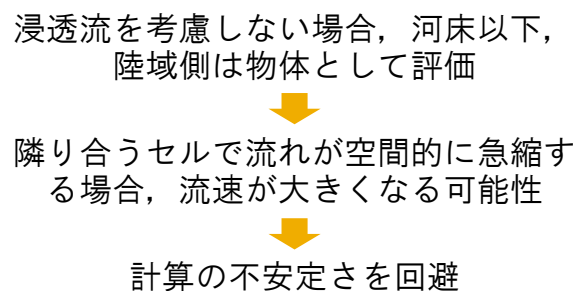
- **2次非線形k-εモデル**

表面流と浸透流を一緒に解く利点

- 河床近傍の流れと侵食の再現性



- 計算の安定性



6

【河床変動モデル・河岸崩落モデル】

- 土砂輸送形態：**掃流砂**（平衡流砂モデル）
- 主流方向の流砂量式：Kovacs and Parker式

$$q_{bs} = \frac{u_p/u_*}{\mu_k \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_k\right)} \left[\tau_* - \tau_{*c} \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_k\right) \right] \left[\tau_*^{1/2} - \tau_{*c}^{1/2} \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_k\right)^{1/2} \right] \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)} g d^3$$

- 横断方向の流砂量式：長谷川式

$$q_{bn} = q_{bs} \left(- \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right)$$

(q_{bs}, q_{bn}) を直交座標系の掃流砂量 (q_{bx}, q_{by}) に変換した後、流砂の連続式から河床変動の計算を行う

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0$$

隣接するセルにおいて、斜面の角度が安息角を越えたとき、崩落すると判定。

7

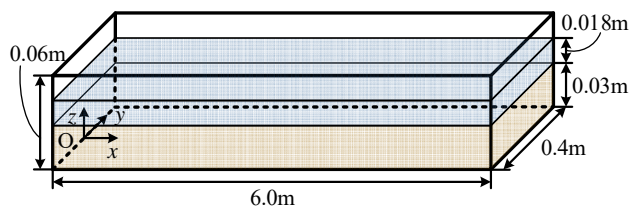
【数値解析法】

- 有限体積法（スタッガード格子）
- **移流項**の離散化：QUICK（運動方程式）
：TVD-MUSCL（ Φ の輸送方程式）
：Hybrid（ k, ε 方程式）
- 境界条件：周期境界条件
：**壁関数法**（表面流に対して）
せん断力と乱流特性量を与える

8

3. 交互砂州形成過程への適用

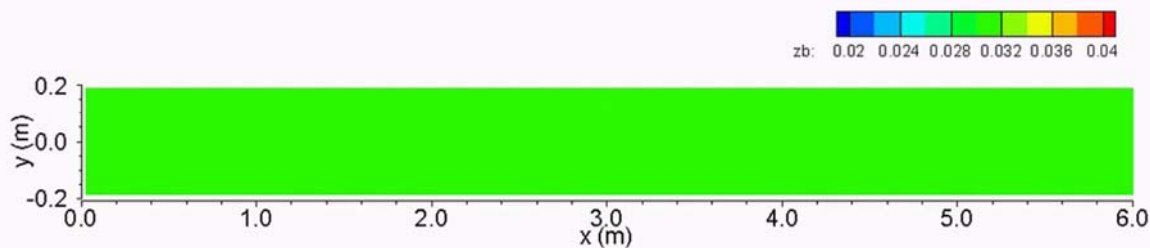
- 側岸を固定した直線水路での交互砂州形成（三上）
- 全長14.9m, 水路幅0.4m, 水路勾配1/200の一様水路に12mの移動床
- 平均粒径 $d = 0.51\text{mm}$ の珪砂5号を均一に5cm敷き詰める
- 上流から $0.0023\text{m}^3/\text{s}$ の流量
- 実験から得られた波長が $3.0\text{m} \Rightarrow 6.0\text{m}$ を計算領域
- 初期河床に粒径の10%程度の微小擾乱。移動床の厚さは 0.03m



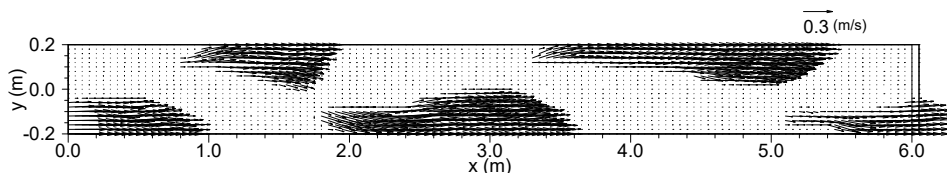
| 流れ方向 | 横断方向 | 鉛直方向 |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| $\Delta x = 0.05\text{ m}$ | $\Delta y = 0.02\text{ m}$ | $\Delta z = 0.003\text{ m}$ |
| 120メッシュ | 20メッシュ | 20メッシュ |

9

【計算結果】



[$t = 0\text{ sec} \sim 6000\text{ sec}$ の河床高コンター]



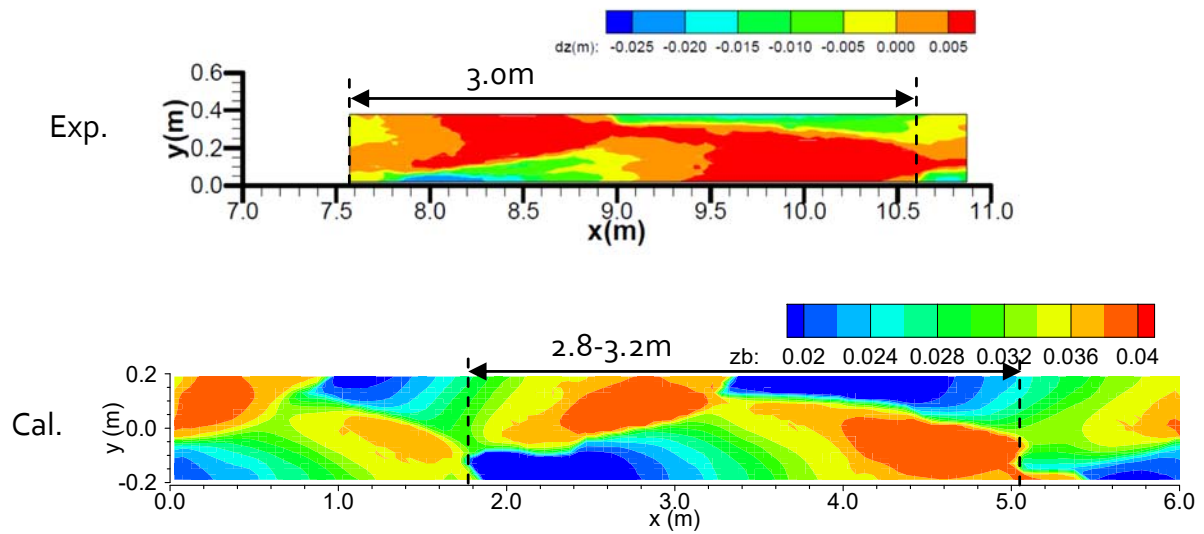
[$t = 6000\text{ sec}, z = 0.03\text{ m}$ での流速ベクトル図]

- 砂州の形成, 下流方向への移動が確認。
- 砂州の形成領域を避けるように流れている。

10

砂州波長の比較

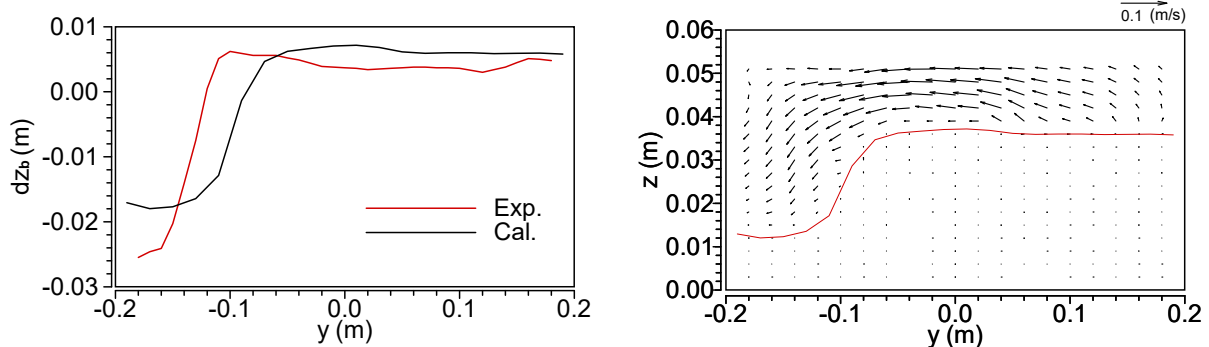
波長：全縁線の先端から次の先端までの長さ



- 波長の整数倍を計算領域とし、周期境界条件を用いているため、計算結果は実験結果と概ね同じ波長を示している。

砂州波高の比較

波高：最深河床を含む横断面での最大河床高と最深河床の差



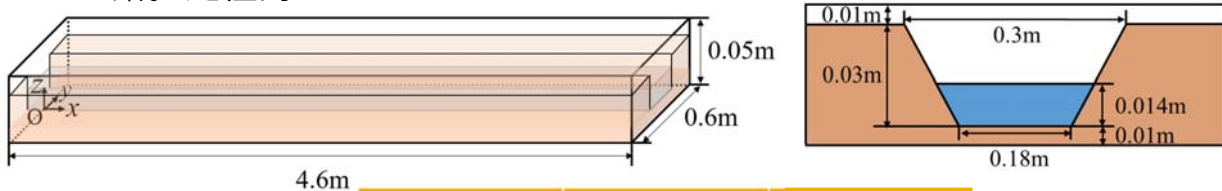
x = 2.225mでの河床変動横断分布の比較

横断面内流速ベクトル図

- 実験の波高0.032m, 計算では0.025mであり若干小さい。横断方向計算格子の影響ではないか。
- 河床の高いところから低いところに流れ込んでいる様子が確認できる。3次元モデルを用いることにより河床近傍の流れを予測。

4. 交互砂州を伴う流路変動現象

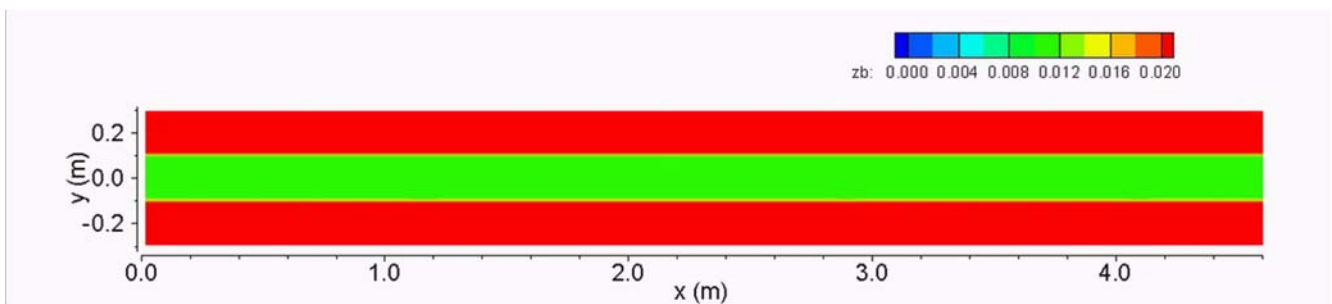
- 長田らの模型実験：長さ8.0m，幅1.0m，深さ0.2mの水路に粒径1.42mmの一樣砂を敷き詰め，底部0.14m，上部0.3m，高さ0.04mの台形断面。水路勾配1/100，流量0.00073 m³/s
- 計算領域：幅0.6m，深さ0.05mとし，その中に底部0.18m，上部0.3 m，高さ0.03mの台形断面。
- 実験の蛇行波長が2.3mから計算領域を4.6m。
- 初期河床に微小擾乱を与えて，周期境界条件。
- 流れ、底部での河床変動計算の計算を600s，その後河床変動計算を開始。定性的なプロセス



| 流れ方向 | 横断方向 | 鉛直方向 |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| $\Delta x = 0.04 \text{ m}$ | $\Delta y = 0.01 \text{ m}$ | $\Delta z = 0.002 \text{ m}$ |
| 115メッシュ | 60メッシュ | 25メッシュ |

13

【計算結果】

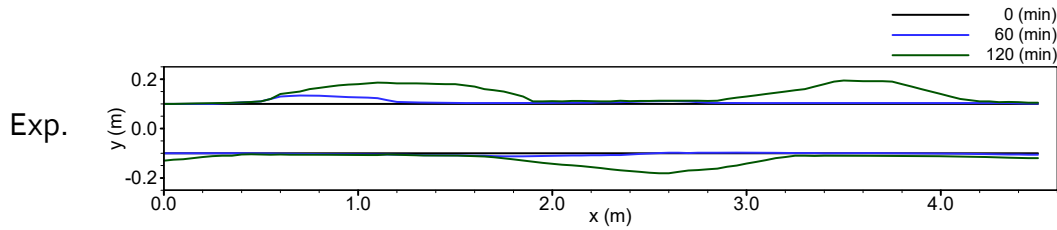


[$t = 0 \text{ sec} \sim 7200 \text{ sec}$ の河床高コンター]

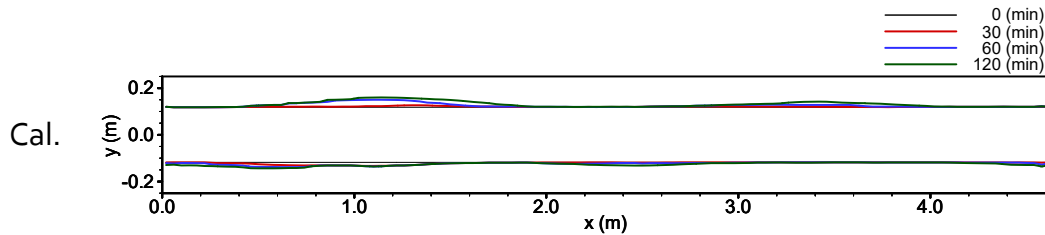
- 上流側から砂州の形成が見られ，その下流では対岸への流れが発生し，河岸侵食が進行。
- 河床の低く，安息角を超えるところから側岸侵食が進行し，流路が蛇行していく様子が再現

14

流路平面形状の比較



- 蛇行波長は2.3m。
- t = 60 minから120 minにかけて蛇行流路の形成が進行。



- t = 60 minまでの流路変動過程については、振幅が概ね一致。
- その後は河岸侵食量が実験に比べて小さい。
- 理由として：デカルト座標系。河岸崩落モデル。

15

5. まとめ

- 表面流と浸透流を同時に予測するデカルト座標系での3次元流れ解析モデルと平衡流砂モデルを用いて、交互砂州形成過程と蛇行流路形成過程について数値解析を行った。
- 交互砂州：波高が若干小さいものの実験結果を概ね再現できることを示した。
- 蛇行流路形成過程：河岸侵食量が小さく、再現性が十分ではなかった。
- 模型実験を実施し、再現計算を行いたい。
- 一般座標系を導入するとともに、初期平面形状が蛇行流路である場合の蛇行の発達・減衰過程について検討したい。

16