

底面境界が大きな勾配を有する河口砂州周辺の三次元 流れと河床変動の解析法

CALCULATION METHODS OF THREE DIMENSIONAL FLOW AND BED
VARIATION WITH LARGE BOTTOM BOUNDARY GRADIENTS AROUND
RIVER MOUTHS

立山政樹¹・内田龍彦²・福岡捷二³

Masaki TATEYAMA, Tatsuhiko UCHIDA and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 修(工) 中央大学大学院 理工学研究科博士後期課程 都市環境学専攻
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 博(工) 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

River mouth sandbars produce bed slope gradients in longitudinal and lateral directions with a contracted channel between them. The bed topography around the sandbars changes vertical velocity distribution due to stream curvatures and flow accelerations and decelerations. It is important for flood flow and bed variation analysis to evaluate three dimensional flows around the sandbars. The objective of this paper is twofold. First, we derive the method to evaluate the variation in the vertical velocity distributions and discuss the appropriate calculation method for flows in the river mouth with sandbars using the computation result by the General Bottom Velocity Computation method. Second, we develop a calculation method of flows and bed variations around sandbars with the large bottom boundary gradients and investigate the effects on the computations results of flows.

Key Words : *Three dimensional flow, general BVC method, bed shear stress, bottom boundary gradient, sediment transport, Aganogawa River mouth*

1. 序論

河口砂州は、河道内に比べて縦横断的に河床高が大きく変化し、河口に縮流部を形成する。河口砂州周辺の洪水流は、その地形ゆえに流れの加速・減速を伴いながら大きく湾曲するため、流速鉛直分布が変形し、強い三次元性を持つ¹⁾。このため、河口砂州を有する河口域の洪水流河床変動解析を行うためには、流れの三次元性ととも底面境界の勾配が流れと河床変動に与える影響を適切に評価することが重要である。

三次元解析では、底面せん断応力は基礎方程式には表れず、せん断応力項の境界条件として評価されるために、論文に明示しているものは少ないが、長田ら²⁾は壁面から再近傍計算格子において壁面に平行な流速と壁面までの法線距離を用いて、壁面せん断応力を求めている。二次元解析などの水深積分モデルに基づく解析では、底面せん断応力項は基礎方程式に直接現れ、その評価方法も示されていることが多い。Shiono & Knight³⁾は横断方向勾配によるせん断応力の作用面の増加を考慮した横断方

向の流速分布に関する水深積分方程式を示している。しかし、縦横断勾配による潤辺の増加とともに壁面までの距離の低下(径深の低下)も考慮した二次元の浅水流方程式や準三次元解析法を示している論文は著者らの知る限り見当たらない。これは、二次元解析において、底面せん断応力項はマンニングの平均流速公式などに基づいて評価されるため、精度が十分でなく、勾配の影響については注目されてこなかったことが原因と考えられる。準三次元解析であるBVC法⁴⁻⁷⁾においては、流速や圧力の鉛直分布が評価できるが、これまで、底面境界条件の評価法について勾配の影響は十分に検討されてこなかった。

一方、河床変動解析においては、芦田ら⁸⁾、長谷川ら⁹⁾は河床勾配が流砂量に与える影響を考慮しているが、連続式における勾配による流入幅の増加については考慮されていない。梶川ら¹⁰⁾はFAVOR法によって構造物による掃流砂の流入幅の阻害を考慮した流砂の連続式を示している。しかし、水平面のコントロール領域で記述された連続式において勾配による流砂量の流入幅の増加については考慮されていない。著者らの知る限り、流れの三

次元性と底面勾配が流れの境界条件と流砂量に与える影響を考慮できる水深積分モデルは存在しない。

本研究は、二つの目的を持っている。第一に河口砂州を有する河口域の地形によって形成される流れの平面分布が生じさせる流速鉛直分布の変化量を定量化し、一般BVC法による計算結果を用いて河口砂州付近の流れの計算方法について検討する。第二に底面境界が大きな勾配を有する流れの解析法を検討し、それが流れと河床変動に与える影響を明らかにすることを目的としている。

2. 一般BVC法の概要

本研究では、一般BVC法^{4)~7)}に基づいて検討を行う。一般BVC法は、流速鉛直分布を仮定し、底面・水表面境界条件の下で後述する方程式群を解くことにより、平面二次元解析の枠組みの中で底面の流速、圧力とその鉛直分布を求めることが出来る点に特徴がある。一般BVC法の基礎方程式を以下に示す。紙面の都合上、各方程式をデカルト座標系で示すが、解析では一般座標系に変換して解かれている¹¹⁾。水深積分連続式(1)と水深積分水平方向運動方程式(2)より水深 h と水深平均流速 U_i を求める。水深積分渦度方程式(3)より水深平均渦度 Ω_i 、水表面流速方程式(4)より水表面流速 u_{si} を求める。二重水深積分の連続式(5)と水平方向の渦度の定義式を水深積分することで導かれる底面流速方程式(7)より、鉛直方向流速の水深積分値 Wh と底面流速 u_{bi} を求める。そして、 Wh を用いて水深積分した鉛直方向流速方程式(6)を解き、底面圧力の非静水圧成分 dp_b を求める。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -\frac{\tau_{bi}}{\rho} - gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial h dp}{\partial x_i} - \frac{dp_b}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h (v_i S_{ij} - \rho u'_j u'_i)}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = ER_{\sigma i} + P_{\sigma i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h D_{\sigma j i} + \frac{v_i}{\sigma_\omega} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$ER_{\sigma i} = u_{si} \omega_{s\sigma} - u_{bi} \omega_{b\sigma}$$

$$D_{\sigma j i} = -U_j \Omega_i + U_i \Omega_j + \omega'_i u'_j - \omega'_j u'_i$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial dp}{\partial z} \right)_{z=z_s} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + P_{si} \quad (4)$$

$$Wh = h \left(\frac{\partial z_m}{\partial t} + U_j \frac{\partial z_m}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ h^2 (k_2 \Delta u_j + k_1 \delta u_j) \right\} \quad (5)$$

$$\frac{dp_b}{\rho} = U_j \frac{\partial Wh}{\partial x_j} + \tau_{bj} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \frac{\partial Wh}{\partial x_i} + w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (7)$$

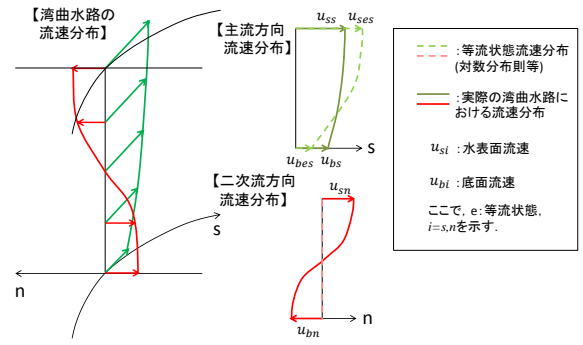


図-1 流れの三次元性の考え方

ここに、 $i, j=1,2$, $x_1, x_2: x, y$ 方向(水平面), $U_i: x_i$ 方向の水深平均流速, g : 重力加速度, z_s : 水面高, z_b : 河床高, dp : 静水圧分布からの偏差圧力($dp=p-g(z_s-z)$), dp_b : 底面における dp , τ_{bi} : 底面せん断応力, ν_i : 水深平均渦動粘性係数, S_{ij} : 水深平均流速のひずみ速度, u'_i : 水深平均流速からの偏差流速($u=U_i+u'_i$), $ER_{\sigma i}$: 鉛直方向渦度の回転項, $P_{\sigma i}$: 渦度生産項, $D_{\sigma j i}$: 渦度の移流・回転・伸縮及び乱流拡散による水深平均渦度フラックス, $\omega_{\sigma} \omega_{b\sigma}: u_{si}, u_{bi}$ の回転, $\sigma_\omega = 1.0$, ω_i : 水深平均渦度からの偏差渦度($\omega=\Omega_i+\omega'_i$), u_{si} : 水表面流速, $P_{si} = (2\nu_i/h^2)(12(u_{sei}-u_{si})-\delta u_i)$: 水面下の薄い層に作用するせん断応力, $z_m=(z_s+z_b)/2$, $k_1=1/10$, $k_2=1/20$, $\Delta u_i = u_{si} - U_i$, $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$, ε_{ij3} : Levi-Civita記号, W : 水深平均鉛直方向流速, w_s, w_b : 水面, 底面の鉛直方向流速である。

3. 流線の平面分布による流速鉛直分布の変形量の定式化

湾曲水路においては、二次流が発生し、図-1の様に流速鉛直分布は等流状態から変形する。本研究では、等流の流速鉛直分布からの変化量を流れの三次元性の強さとする。等流状態の流速鉛直分布からの変化量を水深積分すると、水面と底面の流速差 δu の等流状態からの変化量($\delta u_i - \delta u_{ei}$)となる。流速鉛直分布の変形は、一次的には底面せん断力によって生産される水平方向渦が流速の平面分布によって伸縮・回転することによって生じると考えられる。このことを評価する式を水深積分渦度方程式(式(3))の非定常項、拡散項を無視し、簡略化した式(8)より導く。

$$P_{\sigma i} = -ER_{\sigma i} - \frac{\partial h (-U_j \Omega_i + U_i \Omega_j + \omega'_i u'_j - \omega'_j u'_i)}{\partial x_j} \quad (8)$$

等流状態の流速鉛直分布を仮定して水表面流速・底面流速・渦度分散項・水深平均渦度を表し、渦度生産項を $P_{\sigma i} = 2C_{p\omega} \varepsilon_{ji3} \nu_{ib} (\delta u_{ej} - \delta u_j)/h^2$ と評価すれば次式が得られる。

$$P_{\sigma i} = 2C_{p\omega} \varepsilon_{ji3} \nu_{ib} \frac{\delta u_{ej} - \delta u_j}{h^2} = \varepsilon_{ji3} \frac{6}{\kappa} C_0 \left(1 - \frac{C_0}{2\kappa} \right) U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k}$$

この式を整理すると式(9)が得られる。

$$\delta u_i - \delta u_{ei} = -\frac{h^2}{2\kappa \nu_{ib}} C_0 \left(1 - \frac{C_0}{2\kappa} \right) U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (9)$$

ここに $C_{p\omega} = \kappa' \alpha = 6$, $v_{ib} = \alpha u_* h$, $C_0 = u_* / U$, u_* : 摩擦速度である. 式(9)は, 水深平均流速の平面分布による流速鉛直分布の変化量を一般的に表すものである. 例えば, この式を流線座標($S-N$)系に変換し, 主流方向に変化しない流れを考えれば, 流線曲率による二次流強度を導出する式¹²⁾と同形の式(10)が得られる.

$$\frac{\delta u_N}{u_*} = \frac{3}{\kappa^2 C_0} \left(1 - \frac{C_0}{2\kappa}\right) \frac{h}{r} \quad (10)$$

ここに δu_N : 二次流方向流線と垂直方向(主流に対して左方向が正)の水面と底面の流速差, r : 曲率半径(右回りが正)である.

4. 底面境界が大きい勾配を有する場合の解析法

一般BVC法は, 任意の水面と河床形状に対して連続式, 運動方程式, 渦度方程式及び渦度の定義式を水深積分して得られる方程式群で構成されている. このため, 河床勾配の影響は導出過程において考慮されている. しかし, 底面の壁法則は斜面に沿う流れに対して定義されるため, 底面せん断応力項, 渦度生産項等の底面境界条件はこれと整合するように評価する必要がある.

(1) 底面せん断応力項の評価法

運動方程式(2)の水平方向底面せん断応力は, 導出の過程において次式で定義されている.

$$\tau_{bi} = \tau_{zi} \Big|_{z=z_b} - \tau_{ji} \Big|_{z=z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \quad (11)$$

τ_{bi} は水平面における単位面積当たり作用する河床せん断応力の x_i 方向成分である. 一方, 壁法則により定義される底面せん断応力は, 河床面における単位面積当たりの力であるので, これらと関係付ける必要がある. 図-2は, 河床近傍における底面せん断応力の釣り合いを示す. これより作用面を考慮した水平方向の力の釣り合いは, 式(12)となる.

$$\hat{\tau}_b \cdot S \cdot \frac{u_{bi}}{\hat{u}_b} = \left(\tau_{zi} \Big|_{z=z_b} - \tau_{ji} \Big|_{z=z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \right) \cdot \Delta x \Delta y = \tau_{bi} \cdot \Delta x \Delta y \quad (12)$$

ここで, $\hat{\tau}_b$: 河床に沿う底面せん断応力の大きさ, $S = \Delta x \Delta y / \cos \theta$: 斜面の面積, u_{bi} : 水平方向底面流速, $\hat{u}_b \left(= \sqrt{u_{bx}^2 + u_{by}^2 + u_{bz}^2} \right)$: 河床に沿う底面流速の大きさ, $\Delta x, \Delta y$: それぞれ x, y 方向の微小距離, 本論文では, 上付きのハットは河床に沿う方向成分を示す. なお, 式(11)および式(12)の関係は, せん断応力テンソルの座標変換からも河床面における運動学的境界条件を用いて導くことができる. u_{bz} は, 底面における運動学的境界条件(式(13))から求められる. また, $\cos \theta$ は式(14)で表される.

$$u_{bz} = u_{bi} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (13)$$

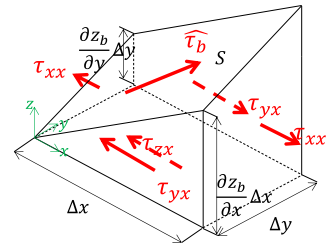


図-2 河床近傍における底面せん断力

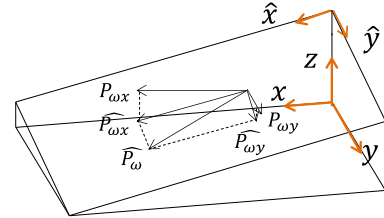


図-3 渦度生産項と軸の方向の関係

$$\frac{1}{\cos \theta} = \sqrt{1 + \tan^2 \theta} = \sqrt{1 + \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \frac{\partial z_b}{\partial x_i}} \quad (14)$$

底面せん断応力 $\hat{\tau}_b$ を式(15)より評価し, 式(12)に代入すれば, 式(16)が得られる.

$$\hat{\tau}_b = \rho \hat{u}_*^2 = \rho \hat{u}_b^2 \hat{c}_b^2 \quad (15)$$

$$\tau_{bi} = \rho \hat{u}_b u_{bi} \hat{c}_b^2 \frac{1}{\cos \theta} \quad (16)$$

ここに, \hat{c}_b : 斜面に沿う摩擦速度と底面流速の比である. \hat{c}_b は河床表面から底面流速が定義される河床近傍高さまでの微小距離 δz_b の減少を考えて, 式(17)より評価できる.

$$\frac{1}{\hat{c}_b} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta z_b \cos \theta + \delta z_0}{k_s} \right) + Ar \quad (17)$$

ここに, δz_0 : 対数分布側の原点位置である. 以上の取り扱い是一般BVC法における底面流速と底面せん断応力の関係であるが, 平面二次元解析における水深平均流速と底面せん断力についても同様に考えることが出来る.

(2) 渦度生産項の評価法

渦度生産項は, 運動方程式のせん断応力項の回転をとり, 水深積分することで得られる⁷⁾. このため, 底面せん断応力と同様に河床勾配に伴う作用面の増加と δz_b の減少を考慮する. 図-3に斜面の渦度生産項と軸の方向の関係を示す. y 方向については, 式(18)で表される.

$$P_{\omega y} \Delta x \Delta y = \left| \hat{P}_{\omega y} \right| \cdot S \cdot \frac{\omega_{bey} - \omega_{by}}{\left| \hat{\omega}_{bey} - \hat{\omega}_{by} \right|} \quad (18)$$

斜面に沿う渦度生産項は, 斜面に沿う渦度を用いて, 式(19)で定義される.

$$\hat{P}_{\omega i} = C_{p\omega} v_{ib} (\hat{\omega}_{bei} - \hat{\omega}_{bi}) / h \quad (19)$$

ここで, 分母の水深に $\cos \theta$ が入らないのは, 分子の渦動粘性係数も壁面からの距離に比例するためである. これを式(18)に代入すると, 斜面上の水平方向の渦度生産項が得られる.

$$P_{\omega_i} = C_{P\omega} V_{ib} \frac{\omega_{bei} - \omega_{bi}}{h} \frac{1}{\cos \theta} \quad (20)$$

ここに水平方向の底面における渦度 ω_{bi} 、平衡渦度 ω_{bei} は、

$$\omega_{bi} = \varepsilon_{ji3} \frac{6\delta u_j - 12\Delta u_j}{h \cos \theta} \quad (21)$$

$$\omega_{bei} = \varepsilon_{ji3} \frac{2u_{bj}\hat{c}_b}{kh \cos \theta} \ln \left(\frac{z_s}{z_b} \right) \quad (22)$$

と評価できる。

(3) 流砂量の評価法

図-4に示すように斜面上の掃流砂は斜面に沿う方向に運動をしていると考えられる。河床勾配があると、水平面におけるコントロール領域 $\Delta x \Delta y$ において流砂が通過する幅が大きくなる。このため、せん断応力や渦度の生産の評価と同様に流砂に関する方程式についても河床勾配を考慮して評価する必要がある。流砂の連続式は、式(23)で表される。

$$(1-\lambda) \frac{\partial q_{Bj}}{\partial t} = -\frac{\partial q_{Bj}}{\partial x_j} - c_B w_0 + q_{su} \quad (23)$$

ここに λ ：空隙率、 c_B ：底面における基準点濃度、 w_0 ：沈降速度、 q_{Bj} ：水平面における単位幅の x_j 方向の掃流砂量、 q_{su} ：水平面における単位面積当たりの浮上量である。図-4より x 方向の掃流砂量は、斜面に沿う掃流砂量を用い、式(24)となる。

$$q_{Bx} \cdot \Delta y = \hat{q}_{Bx} \cdot \Delta y \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial y} \right)^2} = \hat{q}_{Bx} \frac{\Delta y}{\cos \theta_y} \quad (24)$$

y 方向についても同様に $q_{By} = \hat{q}_{By} / \cos \theta_x$ と表される。次に斜面上の浮遊砂の浮上量 q_{su} は、河床に対し垂直に定義されることから、

$$q_{su} = \hat{q}_{su} \frac{S}{\Delta x \Delta y} = \hat{q}_{su} \frac{1}{\cos \theta} \quad (25)$$

となる。 \hat{q}_{Bi} と \hat{q}_{su} は、斜面方向の底面せん断応力と重力による付加掃流力、斜面上の限界掃流力を用いて、それぞれ芦田・道上式と板倉・岸式より求める¹¹⁾。

5. 解析結果と考察

ここでは、平成23年7月阿賀野川河口砂州周辺での洪水時の流れと河床変動を対象に検討を行う。本洪水の解析結果の詳細は既往論文¹¹⁾を参照されたい。

(1) 河口部の三次元流れ構造の解析法

BVC法では、平面二次元解析に比べて流れの三次元性に関する多数の方程式を解く必要がある。河口部の洪水流・河床変動解析におけるBVC法の必要性和有用性を検討するため、流速鉛直分布の変化量($\delta u_i - \delta u_{ei}$)について渦度方程式を単純化し、等流の流速鉛直分布を用い渦度方

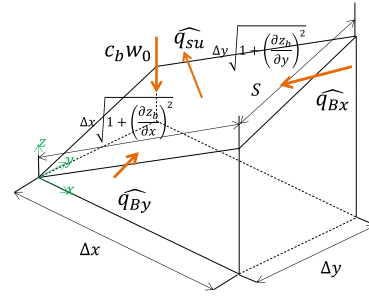


図-4 斜面上の辺と掃流砂・浮遊砂の関係

程式から導かれた式(9)と一般BCV法を比較し、検討する。流速鉛直分布の変化量の二次流方向(N方向)成分 δu_N と主流方向(S方向)成分 $\delta u_S - \delta u_{eS}$ は次のように定義できる。

$$\begin{cases} \delta u_N = (\delta u_i - \delta u_{ei}) \cdot \frac{(\varepsilon_{ij3} U_j)}{|U|} \\ \delta u_S - \delta u_{eS} = (\delta u_i - \delta u_{ei}) \cdot \frac{U_i}{|U|} \end{cases} \quad (26)$$

図-5、図-6に、洪水ピーク時の二次流と主流速方向の流速鉛直分布の変形量の平面分布について、一般BVC法による解析結果(a)と一般BVC法より解析された水深平均流速分布を用いて式(9)より計算した結果(b)の比較を示す。ここでは河口部の洪水流に伴う非定常な平面渦や水面の変動を平滑化し、時間・空間スケールの大きい渦の影響を見るために、解析刻み時間 Δt 毎に10分間計算した値を時間平均して示している。図-5(a)より河口砂州の上流において、河口砂州を回り込む流れが生じるため、右岸側では右回り、左岸側では左回りの二次流が発生している。この二次流は、河口部の拡幅を生じさせる。また、浅海部に形成された河口テラス先端部では、河床勾配が逆勾配となるため、流線が急激に曲がり、右側では右回り、左側では左回りの二次流が生じている。図-6(a)より河口砂州近傍と河口テラス先端部において主流方向の流れの三次元性が大きくなっていることが分かる。図-5(b)、図-6(b)に示す式(9)による計算結果は、これらの流れの三次元性の特徴を説明出来ている。例えば、砂州上流の流れの三次元性が小さい場所では、式(9)で計算される二次流と主流速方向の鉛直分布の変形量は、BCV法の解析結果と概ね一致している。しかし、河口砂州による縮流部や河口テラス下流では、流れの三次元性が過大に評価され空間的に大きく変化している。このことから、式(9)は水深平均流速の平面分布から流れの三次元性が大きい場所を明らかにし、流れの三次元性が小さい場所においてはそれを定量的に評価することが出来る。一方で、流れの三次元性が大きくなる箇所解析では、式(9)では十分でなく、渦度方程式等を解くBVC法を用いて流れの三次元性を考慮する必要がある。

(2) 斜面を考慮した底面せん断応力・渦度生産・流砂の評価が流れと河床変動に及ぼす影響

河口砂州周辺の検討に先立ち、横断勾配 θ を持つ直線

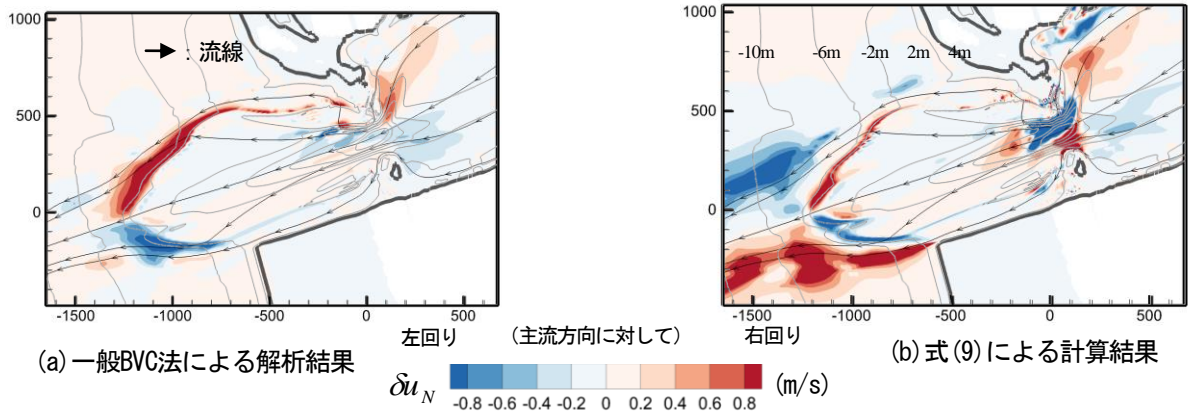


図-5 河口域における洪水時の二次流強度

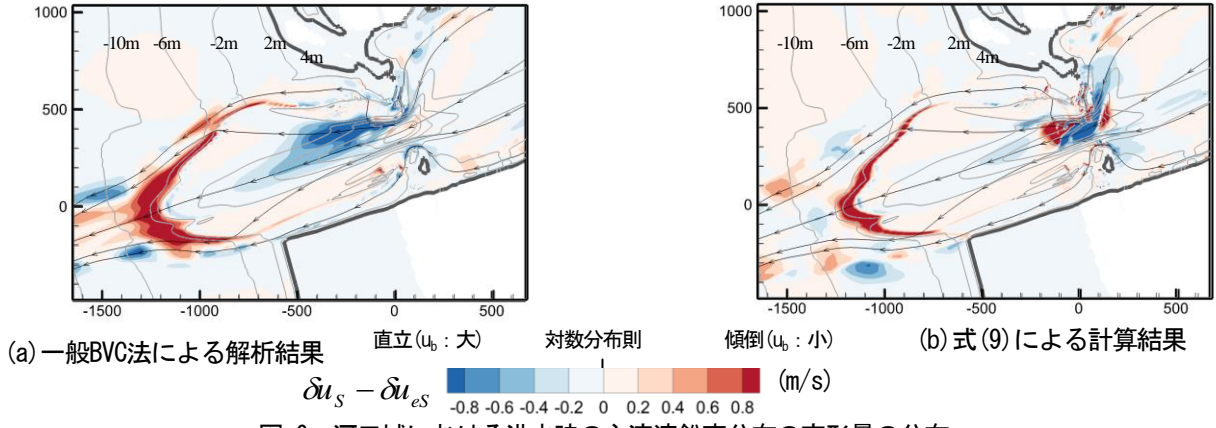


図-6 河口域における洪水時の主流速鉛直分布の変形量の分布

水路を想定し、底面境界の勾配を考慮する本評価法が底面せん断応力と流砂量に及ぼす影響について検討する。ここでは、簡単のため、縦断勾配を無視し、底面せん断応力の増加による底面流速の減速は考慮せずに流下方向底面流速一定条件における計算結果を比較する。この時、流下方向の底面せん断応力項と流砂量の増加率 β_τ, β_{q_b} は式(27)で表される。

$$\beta_\tau = \frac{\hat{\tau}_b}{\tau_b} = \frac{\hat{c}_b^2}{c_b^2} \frac{1}{\cos\theta} \quad (27)$$

$$\beta_{q_b} = \frac{\hat{q}_B}{q_B} = \beta_\tau \frac{\hat{c}_b}{c_b} \frac{1-T/\beta_\tau}{1-T} \frac{1-(T/\beta_\tau)^{1/2}}{1-T^{1/2}}$$

ここに、 $T=\tau_{*c}/\tau_*$ 、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 τ_* ：無次元掃流力であり、流砂量式には芦田・道上式を用いている。図-7は、式(27)の横断方向勾配に伴う変化を示している。ここでは、洪水時の阿賀野川河口部を想定し、 $h/k_s=10^3$ 、 $\delta z_0/h=0$ 、 $\tau_*/\tau_{*c}=10^2$ としている。式(27)より底面せん断応力項の増加率は、河床勾配 $1/\cos\theta$ と \hat{c}_b/c_b の二乗に比例して増加するため、勾配が大きくなるほど勾配が底面せん断応力項に与える影響は大きくなると言える。更に掃流砂量は、底面せん断応力の増加率と \hat{c}_b/c_b に比例するため、大きく河床勾配による影響をより強く受ける。阿賀野川河口砂州の最大横断方向河床勾配は、0.3~0.4であるため、図-7より横断勾配が底面せん断応力項と流砂量に与える影響は大きく、河床勾配を考慮することで河口砂州の拡幅量が大きく計算されると考えられる。

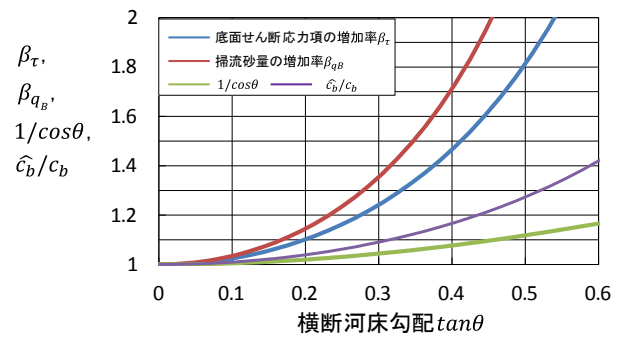


図-7 河床勾配と増加率の関係

しかし、以上の考察は、底面の抵抗増加による底面流速の低下を考慮しておらず、勾配の影響を大きく評価していると考えられる。また、洪水流解析においては、せん断応力項と渦度生産項によって流れの三次元構造が変化する。このため、平成23年阿賀野川洪水の河床変動が最も激しい洪水ピーク時について同一の初期条件で1時間の解析を行い、勾配を考慮した本解析結果と勾配を考慮しない従来の解析結果¹¹⁾の比較を行う。図-8は1時間後の摩擦速度の計算結果の比較を示している。河口砂州の近傍と越流部、縮流部で本評価法を用いた解析結果の方が用いない解析結果に比べて、摩擦速度が大きい。このことから、河床勾配の大きい阿賀野川河口域において本評価法により、底面抵抗が増加しても、摩擦速度が大きくなることが明らかとなった。図-9は、洪水ピークの1時間にわたり、本評価法を用いた解析と用いない解析により計算した時の1時間当たりの河床変動量の差を表

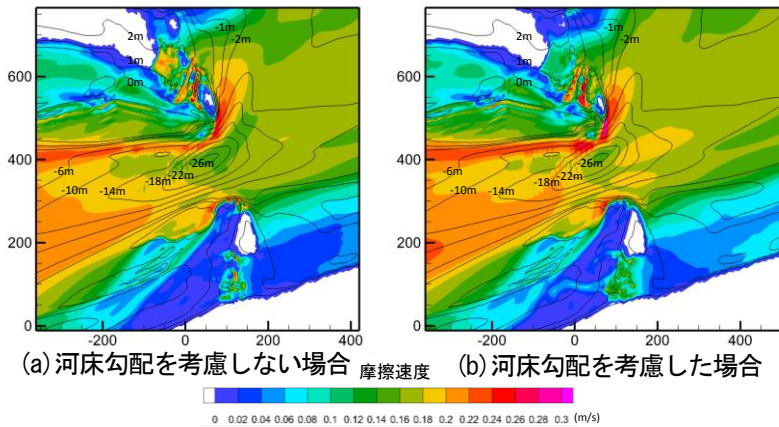


図-8 河口砂州周辺における摩擦速度の比較

す。赤色が本評価法による堆積または未洗掘の影響、青色が洗掘または未堆積の影響を示す。河口砂州越流部と縮流部では、洗掘傾向が大きくなるのが分かる。また、上り勾配となる河口砂州上流側と縮流部下流側では、堆積傾向となることが分かる。河床変動によって、洪水時の流れ構造は変わるため、本評価法の有効性と必要性を詳しく検討するには、少なくとも1洪水期間全体の解析が必要であるが、以上の結果より底面境界の勾配が底面せん断応力と流砂量に与える影響は小さくなく、河口砂州のある場合の洪水流・河床変動解析においては流れの三次元性とともに勾配を考慮した本解析法が必要であることが明らかとなった。

6. 結論

本検討で得られた主要な結論を以下に示す。

水深平均流速の平面分布から流速鉛直分布の変化量を表す式を渦度方程式から導出した。導出した式は、流れの三次元性が強くない場所においては、水深平均流速の平面分布から定量的に流速鉛直分布の変形量を評価できる。しかし、河口砂州近傍の流れの三次元性が大きい場所では、この式は十分でなく、強い流れの三次元性を計算出来るBVC法等の解析法が必要である。

底面境界の勾配が大きい場合の底面せん断応力・渦度生産・流砂の解析方法を導出した。本解析法による底面せん断応力と流砂量は、底面勾配が1/10よりも大きくなると顕著に勾配に比例して大きくなるのが明らかとなった。河口砂州周辺を対象とした洪水ピーク時の洪水流・河床変動解析結果では、本解析法を用いることで、従来法と比べて、河口砂州周辺の底面摩擦速度が上昇し、洗掘傾向が高まる事が示された。このことから、底面境界の大きな勾配を有する河口砂州周辺の流れと河床変動解析に本解析法を用いて底面境界の勾配の影響を考慮することが重要であることを示した。

参考文献

1) 小野信幸, 伊藤啓勝, 酒井隆行, 西隆一郎, 間瀬肇: 河口

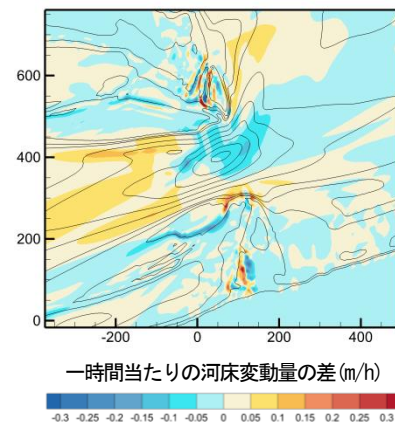


図-9 本評価法による河床変動量の増減

域の流況特性に関する現地観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.386-390, 2009.

- 2) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, 中藤達昭: 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684, II-56, pp.21-34, 2001.
- 3) Shiono, K. and Knight, D.W.: Turbulent open channel flows with variable depth across the channel, J. Fluid Mech., vol.222, pp.617-646, 1991.
- 4) Uchida T., Fukuoka S.: Numerical calculation for bed variation in compound-meandering channel using depth integrated model without assumption of shallow water flow, Advances in Water Resources, Vol.72, pp.45-56, 2014.
- 5) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.56, pp.I-1225-1422, 2012.
- 6) 内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.1, pp.16-29, 2011.
- 7) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.2, pp.43-62, 2015.
- 8) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第35巻, pp.383-385, 1991.
- 9) 長谷川和義, 藤田豊彦, 目黒嗣樹, 竜澤宏昌: 河床不安定および分級不安定をともなう急勾配混合砂礫床の形態, 水工学論文集, 第44巻, pp.659-664, 2000.
- 10) 梶川勇樹, 檜谷治: 橋脚部周辺における局所洗掘現象の再現性に関する数値計算モデルの比較, 水工学論文集, Vol.51, pp.667-672, 2007.
- 11) 立山政樹, 山崎友子, 田部成幸, 内田龍彦, 福岡捷二: 洪水流による河口砂州フラッシュの新しい解析法に関する研究, 河川技術論文集, Vol.19, pp.183-188, 2013.
- 12) Englund, F.: Flow and Bed Topography in channel Bends, Jour. of Hydraulic Div., ASCE, Vol.100, No.HY11, pp.1631-1648, 1974.

(2015. 9. 30受付)