

# 大規模洪水による河口砂州の開口機構に関する研究

立山 政樹<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>・石川 俊之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)

E-mail: a12.37ae@g.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

E-mail: sfuku@tamacc.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所 事務所長  
(〒956-0032 新潟県新潟市秋葉区南町 14 番 28 号)

E-mail: ishikawa-t845n@milt.go.jp

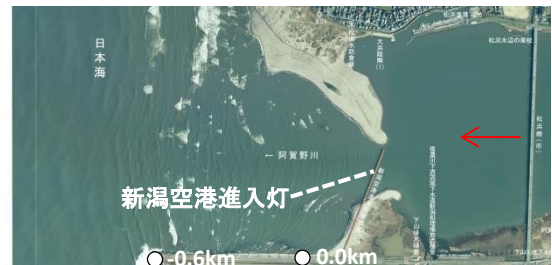
本論文では、大規模な地形変化を伴う阿賀野川河口砂州の開口解析を安定かつ高い精度で実施するために、先に著者らが定式化した斜面勾配を考慮した一般底面流速解析法(GBVC 法)および河床変動の解析方法を修正した。観測史上最大流量を記録した阿賀野川平成 23 年 7 月洪水を対象とし、河口砂州の開口過程の影響が現れている観測水面形の時間変化のデータを用い、修正した解析法に基づき洪水流・河床変動解析を行った。十分発達した河口砂州上を越流する流れと流砂運動を高精度に計算することで、河岸浸食による砂州の崩落を考慮せずとも、河口砂州開口過程および開口後の横断面形状を再現でき、力学的考察から河口砂州の開口機構を説明した。

**Key Words:** river mouth sandbar, GBVC method, flood flow, bottom boundary gradient, sediment transport

## 1. 序論

河口砂州は、波や風、潮位変動に伴う入退潮流による細砂の移動により発達する。図-1 は、観測史上最大の流量となった平成 23 年 7 月阿賀野川洪水前と洪水ピーク時での河口部の航空写真を示す。図-1 から、平成 23 年 7 月洪水によって河口砂州間の開口幅が大きくなっていることが分かる。阿賀野川河口砂州は少なくとも  $6,000\text{m}^3/\text{s}$  規模の洪水で大きく開口することが分かっているが、洪水時の阿賀野川河口砂州の開口機構については十分明らかになっていない。

これまで、洪水流による河口砂州開口の解析では、痕跡水位や一点のみの水位ハイドログラフを検証材料とした平面二次元解析が行われてきた<sup>1)</sup>。このため、洪水中にいつ、どのような機構で河口砂州が開口されたかについては、十分明らかにされていない。近年では、河道で多点水位計測が行えるようになった。洪水時の観測水面形には河口砂州開口過程の影響が顕著に現れており、観測水面形の時間変化に基づいて洪水流と河床変動解析を



(a) 洪水前の河口砂州 (平成 22 年 11 月撮影)



(b) 平成 23 年 7 月洪水時の河口砂州 (7/30 15 時頃)

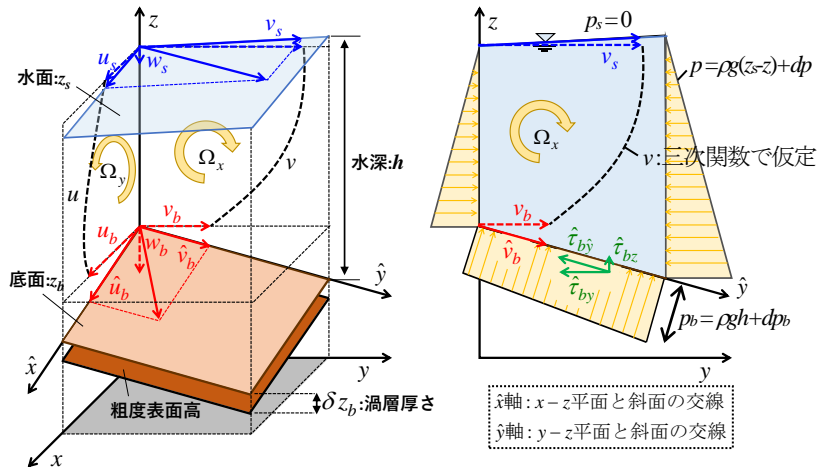
図-1 阿賀野川河口砂州の様子

一体的に行うことで、河口砂州の開口機構の解明が行えると考えられる。

著者らは、阿賀野川河口砂州は細砂で構成されるため、河床と河岸は連続する境界として捉え、従来行われてきたように河岸浸食による砂州の崩落を考慮せずとも、河口砂州上を越流する流れと斜面に作用するせん断応力、

- ・底面流速の定義式
- $$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \frac{\partial W h}{\partial x_i} + w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i}$$
- $$\varepsilon_{123} = -\varepsilon_{213} = -1$$
- $i, j = 1, 2, \quad x_1, x_2 : x, y$  方向
- ・水深積分連続式 ( $h$ )
  - ・水深積分運動方程式 ( $U_i$ )
  - ・水深積分渦度方程式 ( $\Omega_i$ )
  - ・水表面運動方程式 ( $u_{si}$ )
  - ・底面圧力方程式 ( $dp_b$ )
  - ・二重水深積分連続式 ( $W$ )

(a) GBVC 法の方程式群



(b) 斜面勾配を考慮した場合の GBVC 法における変数の定義

図-2 GBVC 法の方程式群と斜面勾配を考慮した場合の変数の定義

流砂運動を高精度に計算することで、洪水流による河口砂州の開口を説明できると考えた。この考えに基づき、水深積分モデルの枠組みで洪水流の三次元流速場と圧力の非静水圧成分を考慮できる内田・福岡の GBVC 法<sup>2)</sup>により、詳細な観測水面形の時間変化を用いて洪水流・河床変動解析を行い、阿賀野川河口砂州の開口機構を検討してきた<sup>34)</sup>。しかし、洪水後の開口部拡幅量が小さく計算される課題があった。これは、阿賀野川河口砂州が縦横断的に大きな斜面勾配を持つことが解析に十分考慮されていなかったことが原因と考えられる。

そこで著者ら<sup>5)</sup>は、GBVC 法を斜面勾配の大きな流れ場に拡張するため、図-2 に示す斜面に沿う流れに対し、底面せん断力項、渦度生産項等の運動方程式や渦度方程式の底面境界条件及び流砂の解析方法を定式化してきたが、いくつかの課題を残していた。ここで、図-2 の  $\hat{x}$  軸は  $x$ - $z$  平面と斜面の交線方向、 $\hat{y}$  軸は  $y$ - $z$  平面と斜面の交線方向である。

本論文ではこの課題に対応するため、第 2 章において、前報<sup>5)</sup>の斜面勾配を考慮した GBVC 法で曖昧さを残した底面圧力方程式の底面せん断応力項の定式化を、より正確に示すとともに、大きな地形変化を伴う阿賀野川河口砂州周辺の洪水流と河床変動解析を 1 洪水の全期間にわたり安定かつ高い精度で行うための斜面勾配を考慮した GBVC 法および流砂の解析方法<sup>5)</sup>の修正点を示す。さらに第 4 章では、平成 23 年 7 月阿賀野川洪水の観測水面形の時間変化に基づき、修正した洪水流・河床変動解析法の解析結果より大規模洪水による阿賀野川河口砂州の開口機構を明らかにし、本解析法の有効性を示す。

## 2. 斜面勾配を考慮した GBVC 法および流砂の解析方法の修正点

### (1) 斜面勾配を考慮した GBVC 法の修正点

GBVC 法における底面圧力方程式は、鉛直方向の運動方程式を水深積分することで得られ、底面せん断応力項は式(1)ようになる。

$$\frac{\hat{\tau}_{bz}}{\cos \theta} = \tau_{zz} \Big|_{z=z_b} - \tau_{xz} \Big|_{z=z_b} \frac{\partial z_b}{\partial x} - \tau_{yz} \Big|_{z=z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (1)$$

前報<sup>5)</sup>では、式(1)の右辺第一項を省略したため、式(2)の水平方向の水深積分運動方程式に底面での圧力の非静水圧成分  $dp_b$  を代入した際、等流状態において斜面に沿う方向の重力成分と底面せん断応力の釣り合い条件 ( $\rho g h \cos \theta = \hat{\tau}_b$ ) が満たされない課題があった。本研究では、式(1)の右辺第一項を省略せずに考慮することで、等流状態に斜面に沿う方向の重力成分と底面せん断応力の釣り合い条件 ( $\rho g h \cos \theta = \hat{\tau}_b$ ) を満たすように、底面圧力方程式を式(3)のように修正した。

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -g h \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{h dp}}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$-\frac{dp_b}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h (v_i S_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} - \frac{\hat{\tau}_{bi}}{\rho \cos \theta} \quad (3)$$

$$\frac{dp_b}{\rho} = U_j \frac{\partial W h}{\partial x_j} + \frac{\hat{\tau}_{bz}}{\rho \cos \theta} \quad (4)$$

$$\hat{\tau}_{bi} = \rho \hat{c}_b^2 u_{bi} |\hat{u}_b|, \quad \hat{\tau}_{bz} = \rho \hat{c}_b^2 w_b |\hat{u}_b| \quad (5)$$

$$|\hat{u}_b| = \sqrt{u_b^2 + v_b^2 + w_b^2} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\hat{c}_b} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{k_s + \delta z_b \cos \theta}{k_s} \right) + A_r \quad (6)$$

ここに、 $i, j = 1, 2, \quad x_1, x_2 : x, y$  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、 $\overline{dp}$  : 静水圧分布からの偏差圧力の水深平均値 ( $dp = p - g(z_s - z)$ )、 $dp_b$  : 底面における  $dp$ 、 $\hat{\tau}_{bi}$ 、 $\hat{\tau}_{bz}$  : 河床面に沿うせん断応力の  $i$  方向成分と  $z$  方向成分、 $v_i$  : 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 ( $u = U_i + u'_i$ )、 $k_s$  : 相当粗度、 $\hat{c}_b$  : 渦層

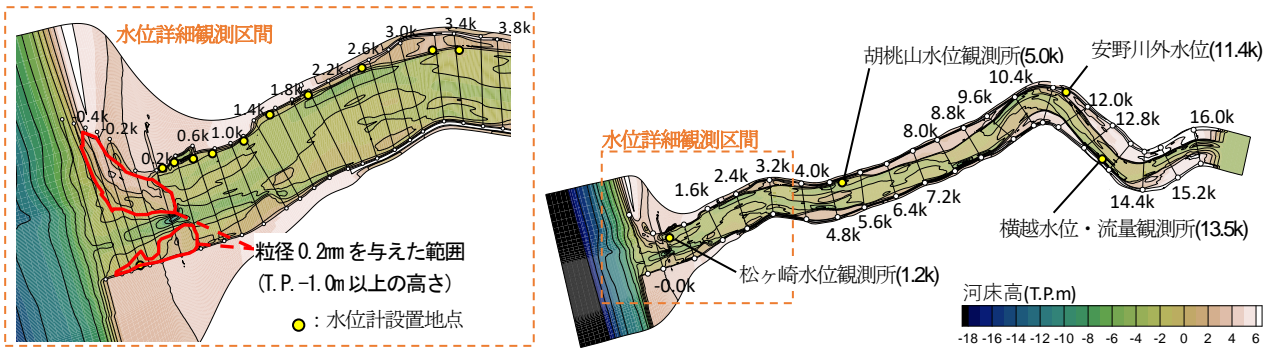


図-3 対象区間の地形と観測所位置，河口砂州上の粒径の設定範囲

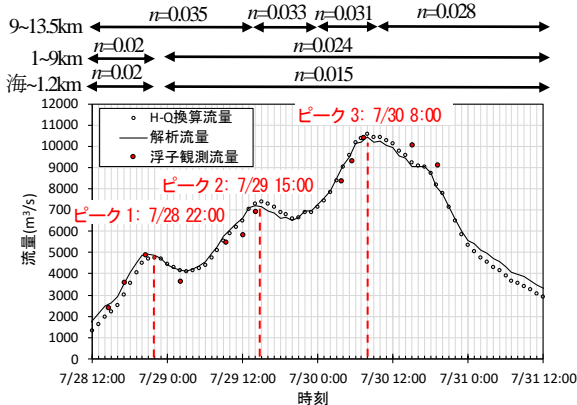


図-4 横越観測所(13.5km)における観測流量と解析流量ハイドログラフの比較及び低水路粗度係数

の厚さ( $\alpha_b \approx h/20$ ),  $\kappa$ : カルマン定数(0.41),  $A_r = 8.5$ である。上付き“-”は水深平均値を表し，底面の鉛直方向流速  $w_b$  は運動学的境界条件( $w_b = \partial z_b / \partial t + u_b \partial z_b / \partial x + v_b \partial z_b / \partial y$ )より求める。

また，前報<sup>5)</sup>では過度方程式の生産項を図-2に示した斜面に沿う流速に基づき評価したが，斜面勾配が急な水際などで，過度の生産項が局所的に大きく計算されるなどの問題が生じたため，従来法<sup>2)</sup>に従い底面での水平方向流速  $u_b, v_b$  に基づき評価し計算の安定性を高めた。

## (2) 流砂の解析方法に関する修正点

前報<sup>5)</sup>では斜面に沿う方向の流砂量の水平方向成分を用い，水平面での流砂の連続式から河床高の変化を計算することとしていた。しかし，掃流砂は斜面に沿う方向に移動するものと考えられるため，本論文では斜面に沿う方向の底面せん断応力を式(7)で評価し，これを芦田・道上の流砂量式に代入することにより，斜面に沿う方向の流砂量を計算した。

$$\hat{\tau}_{bx} = \rho \hat{c}_b^2 \hat{u}_b |\hat{u}_b|, \hat{\tau}_{by} = \rho \hat{c}_b^2 \hat{v}_b |\hat{u}_b| \quad (7)$$

これまで著者ら<sup>5)</sup>は，浮遊砂の浮上・輸送・堆積機構を，浮遊砂濃度の鉛直分布を平衡状態と仮定した Lane-Kalinske の濃度分布式を用いた水深積分の二次元浮遊砂移流拡散方程式により評価してきた。また，斜面に沿う方向のせん断応力の水平方向成分を板倉・岸の式に代入

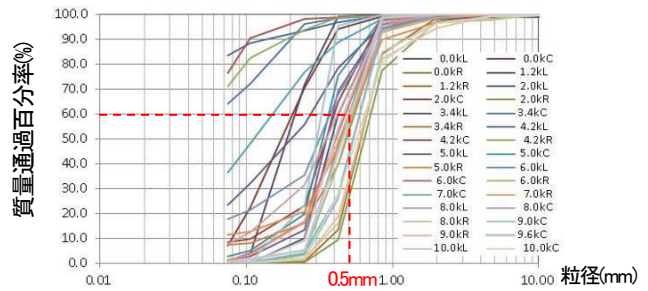


図-5 阿賀野川下流域の粒度分布と解析で与えた河床の粒径

することにより，斜面に対して垂直な方向に浮上する浮遊砂  $\hat{q}_{su}$  を計算し，これに斜面の傾きによる面積の増加分  $1/\cos\theta$  を掛けて水平面における浮遊砂の浮上量  $q_{su} (= \hat{q}_{su} / \cos\theta)$  を評価することとしていた。しかし，この浮遊砂の巻き上げ量の評価方法では，数値計算の際に何らかの拍子に瞬間的に大きな巻き上げ量が計算され，大きな河床洗掘が生じると， $1/\cos\theta$  の影響により浮遊砂の巻き上げ量がさらに大きくなり，一方的に河床洗掘が進行する結果となった。また，浮遊砂の鉛直濃度を平衡状態と仮定した二次元浮遊砂濃度移流拡散方程式では，このような局所深掘れが生じた場合，深掘れ部に浮遊砂が留まることで浮遊砂の沈降量が多くなり，浮遊砂の浮上量と沈降量がある一定の範囲でバランスするような機構が考慮されてないため，局所的な河床洗掘をさらに助長させた。後述するように，阿賀野川の河口付近では，浮遊砂が河床変動に及ぼす影響が大きいことから，浮遊砂運動の支配方程式での斜面勾配の取り扱い方が敏感に影響したものと考えられる。これらのことから，本論文では浮遊砂の巻き上げ量の式には斜面勾配を考慮せず，浮遊砂濃度の輸送方程式には三次元の移流拡散方程式を用いることとした。

数値計算を行う際に，局所的な洗掘・堆積が生じた場合には，計算を安定的に実行するため，隣り合うメッシュの斜面勾配が，水中安息角以上にならないように河床高を平滑化させた。

## 3. 観測体制と解析条件

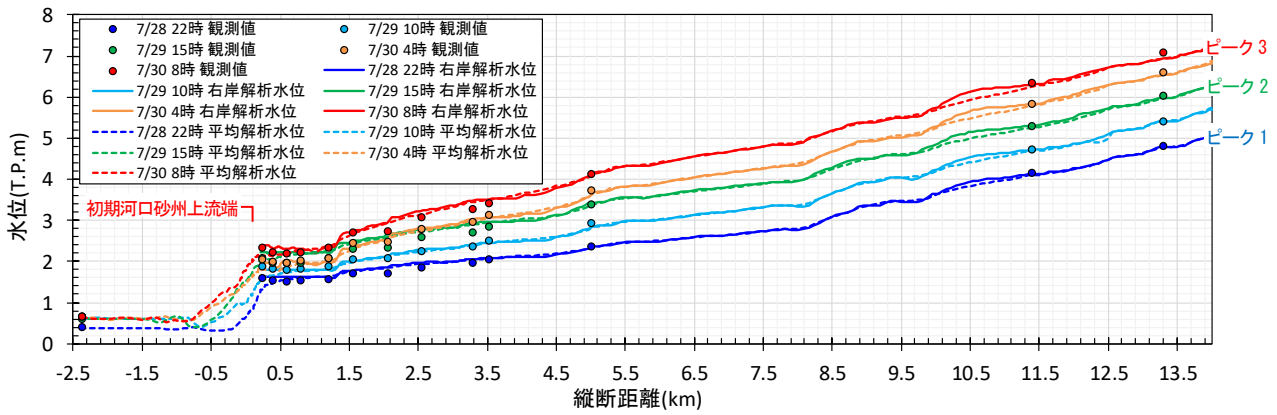


図-6 阿賀野川対象区間における解析と実測の水面形時間変化の比較

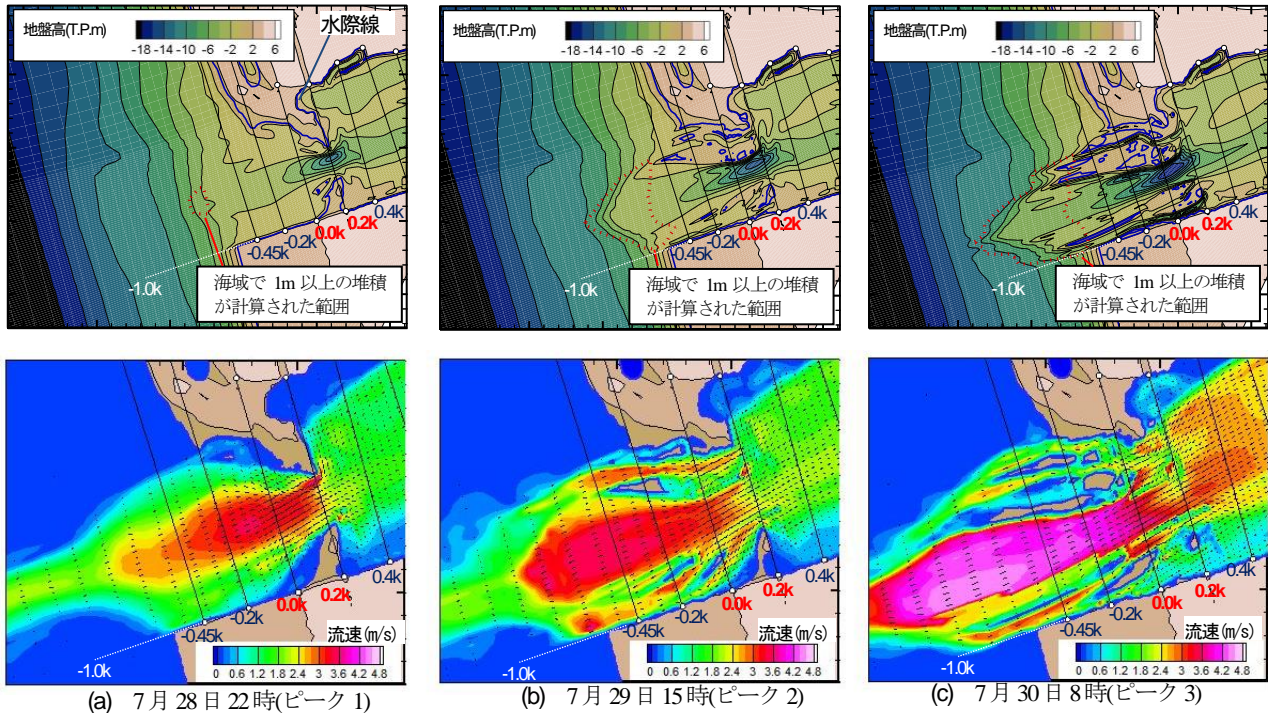


図-7 河口砂州周辺の河床地形変化と底面流速のコンター図

図-3は洪水観測体制を示す。平成23年7月阿賀野川洪水は、最大流量 $11,000\text{m}^3/\text{s}$ の三波に及ぶ大洪水で河口砂州が大きく崩壊する洪水であった。河口砂州上流 $0.2\text{km}\sim 3.5\text{km}$ において洪水流の詳細な水面形観測を実施した。洪水流量は、横越観測所において浮子により観測されており、図-4に示す。

解析の上流端境界条件は横越観測所の水位ハイドログラフを用い、下流端境界条件には新潟西港の観測潮位ハイドログラフを用いた。図-5は、対象区間の河床材料粒度分布を示す。本解析では対象区間の平均的な粒径として、粒径 $0.5\text{mm}$ の材料を河床上に一様に与えた。一方、河口砂州は主に波浪や漂砂によって運ばれてきた細かい材料で形成されるため、図-3に示す $\text{TP}-1.0\text{m}$ 以上の砂州の範囲には粒径 $0.2\text{mm}$ の材料を与えた。解析の初期地形は、平成23年に $200\text{m}$ 間隔で測量された横断データを用い、河口砂州の平面形状は洪水前の航空写真により作成した<sup>4)</sup>。低水路粗度係数は、観測水面形を再

現するように与え(図-4)、高水敷の粗度係数は、 $0.037$ を与えた。

#### 4. 河口砂州開口部の拡幅機構

図-6は対象区間における水面形時系列の観測結果と解析結果の比較を示す。解析結果は実線で右岸側の水面形を示し、破線で河道中央の水面形を示している。解析水面形時系列および水面形時系列から解析した流量ハイドログラフの解析結果は、それぞれ図-6、図-4に示すように観測値をほぼ説明している。以下では、本解析結果を用いて河口砂州開口部の拡幅機構について考察する。

図-7は河口砂州付近の河床地形の時間変化と底面流速のコンター図を示す。ピーク1(7/28 22:00頃)では、約 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ の流量であり、河口砂州を越流する流れが生じておらず、砂州上流で水位が堰上がり緩やかな水面形が

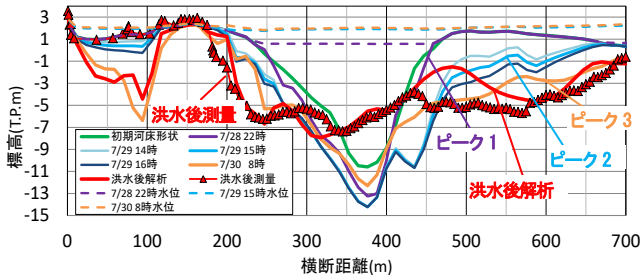


図-8 0.2km 横断形状の時間変化と洪水後の測量結果との比較

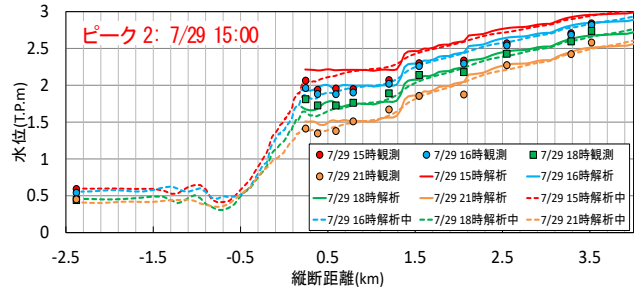


図-9 河口付近におけるピーク 2 前後の水面形時系列の観測結果と解析結果

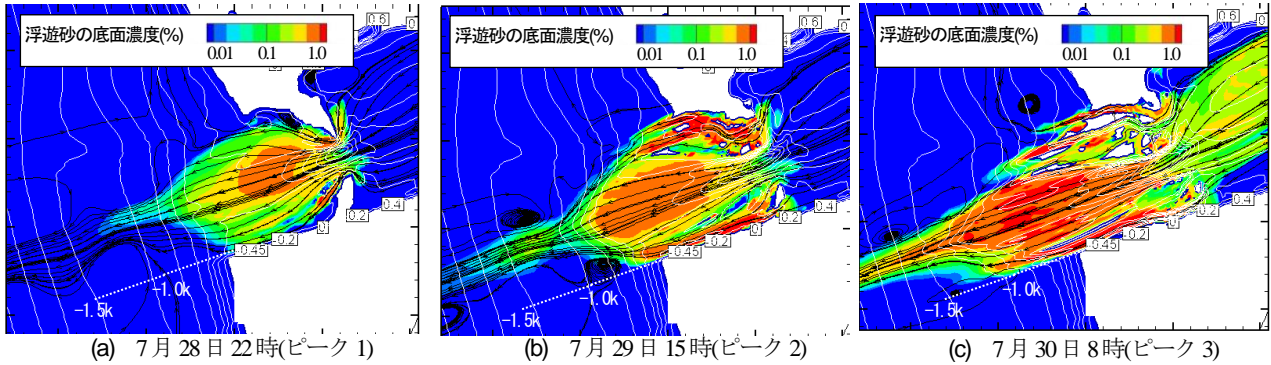


図-10 浮遊砂の底面濃度分布のコンター図と流線

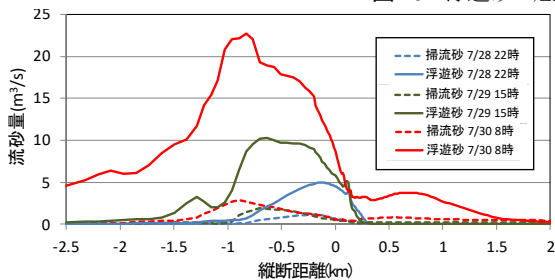


図-11 河口付近の掃流砂量と浮遊砂量の縦断分布

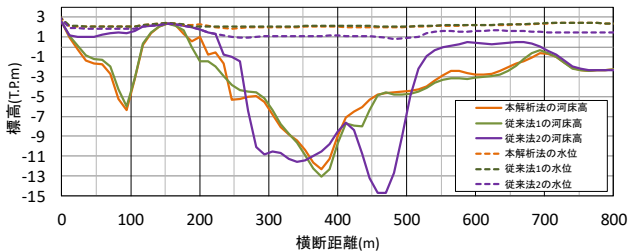


図-12 ピーク 3 (7/30 8:00) での本解析法, 従来法 1, 従来法 2 による 0.2km の解析横断形状の比較

形成されている (図-6) . 図-8 は, 0.2km の河道横断形状の時間変化と洪水後の測量結果との比較を示す. ピーク 1 では河口砂州を越流していないため, 図-7(a)に示すように開口部に流れが集中し, その結果, 開口部中央の河床が初期河床に比べて顕著に洗掘を受けている (図-8).

ピーク 2 (7/29 15:00) では, 流量が約 7,000m<sup>3</sup>/s であり, 図-7(b)より砂州を越流する流れが生じ, 砂州上流端に位置する 0.2km の横断面 (図-8) では, ピーク 2 の前後 1 時間 (7/29 14:00~16:00) で右岸側の砂州が最大約 3m の洗掘を受け, 河口砂州が大きく開口し始めている. 図-9 より, 7/29 15:00 までの解析水面形は, 河口砂州の影響によりその直上流で水位が堰上げられ, 観測水面形よりやや高めに計算されている. その後の 7/29 16:00 以降では, 解析において河口砂州が拡幅するため (図-8), 解析水面形は観測水面形を説明出来るようになってきている (図-9). 7/29 15:00 頃までの解析水面形が観測値よりも高めに計算された要因は, 河口砂州開口部の大規模な拡幅が生じる時間帯が実現象より遅く計算されたためと考えられる.

ピーク 3 は約 11,000m<sup>3</sup>/s の流量であり, 流量の増加に伴い 0.2km 横断面 (図-8) では, 河口砂州の拡幅が進行

し, その土砂による河床への埋め戻しが生じている. 0.2km における解析横断形状は, 洪水後測量結果に見られるような砂州の拡幅と河床の埋戻しを説明している.

図-10 は底面付近の浮遊砂濃度分布を示し, 図-11 は河口付近の掃流砂量と浮遊砂量の縦断分布を示す. 図-11 から, 掃流砂量と浮遊砂量は河口砂州の位置する 0.2km 付近から急激に増大すること, 点線の掃流砂量に比べ実線の浮遊砂量が大きく, 河口付近の河床変動に対して浮遊砂の影響が大きいことが分かる. 図-10 に示すように, ピーク 2 では河口砂州の前縁付近 (0.2km 右岸砂州) から底面の浮遊砂濃度が急激に高くなっている. このことから, 河口砂州を越流する流れにより, 砂州上の土砂が大量に巻き上げられることで, 河口砂州開口部の急激な拡幅が生じたことが分かる. また, 図-7 上段の河床地形コンター図の赤点線は, 海域で 1m を超える土砂堆積が計算された範囲を示す. 河口部で大規模な地形変化の生じたピーク 2, ピーク 3 において, 図-10 に示した底面付近の浮遊砂濃度は, 0.2km 付近から図-7 上段の赤点線の範囲 (-0.5km~ -1.0km 付近) まで高濃度となっており, 赤点線の範囲を過ぎると急激に濃度が低下して

いる。このことから、河口部から流出した浮遊土砂の大部分が、-0.5km~-1.0km 付近に堆積し河口テラスを形成することが分かる。一方、浮遊砂の一部は 0.0~0.2km 右岸付近に堆積し、図-1 に示すピーク 3 の時間帯の航空写真からは確認出来ない島状の堆積地形を形成している。比較的水深の浅い砂州上の浮遊砂の輸送・堆積機構に課題がある。これについては、今後の検討課題とする。

図-12 は、ピーク 3 (7/30 8:00)での 0.2km の解析横断面形状について、斜面勾配を考慮した GBVC 法と浮遊砂濃度の三次元移流拡散方程式を組み合わせた本解析モデル、従来の GBVC 法<sup>34)</sup>と浮遊砂濃度の三次元移流拡散方程式を組み合わせた解析法(従来法 1)、従来の GBVC 法<sup>34)</sup>と浮遊砂濃度の平面二次元移流拡散方程式を組み合わせた解析法(従来法 2)の比較を示す。従来法 2 は、本解析法および従来法 1 に比べて河道中央部で極端に深掘れが進行し、河口砂州の開口幅が小さく計算されている。これは、上述したように河口付近の大規模な地形変化には浮遊砂が大きな役割を持つため、流れの三次元性の強い河口砂州周辺では、浮遊砂の三次元的な挙動を計算に考慮することが重要なことを示している。

また、図-12 の本解析法と従来法 1 の解析結果を比較すると、本解析法と従来法 2 ほどの差はないが、解析横断面形状に違いが見られ、斜面勾配の影響が認められる。本研究では、計算の安定化のため、河口部の地形変化に支配的である浮遊砂の巻き上げ量の算定に斜面勾配を考慮していない。上述した浮遊砂計算の課題解決には、斜面勾配の影響を考慮することで改善される可能性もあり、この点に対する検討が必要である。

## 5. 結論

本研究では、十分発達した阿賀野川河口砂州の洪水中の開口機構の解析を大きな斜面勾配を考慮した GBVC

法により、安定かつ高精度に行うために洪水流と河床変動解析での河口砂州斜面の取り込み方、流砂運動の計算法について再検討した。

大規模な河口砂州の開口が生じた平成 23 年 7 月阿賀野川洪水の観測水面形に基づき、新たな解析法により、縦横断的に大きな斜面勾配を有する河口砂州を越流する流れ、河口砂州上の細砂の大量の巻き上げと輸送を高精度に計算することで、河岸浸食による砂州の崩落を考えなくとも、河口砂州の横断面形状の開口過程を良く再現できることを示した。

謝辞：本論文を作成するにあたり、中央大学研究開発機構 後藤岳久博士、竹村吉晴博士との議論は非常に有益であった。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 桑原直樹, 田中仁：洪水時の河口砂州崩壊現象に対する砂州高さ・潮位変動の影響に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.43, pp.631-635, 1996.
- 2) 内田龍彦, 福岡捷二：非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面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.
- 3) 立山政樹, 内田龍彦, 福岡捷二, 田部成幸：大規模洪水時の河口砂州と周辺河床の変動解析-平成 23 年阿賀野川洪水を対象として-, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I\_1009-I\_1014, 2013.
- 4) 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.
- 5) 立山政樹, 内田龍彦, 福岡捷二：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, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I\_835-I-840, 2016.

(2017.9.29 受付)

## STUDY ON FLUSHING MECHANISM OF RIVER MOUTH SANDBAR DUE TO LARGE FLOOD

Masaki TATEYAMA, Shoji FUKUOKA and Toshiyuki ISHIKAWA

We extended the GBVC (General Bottom Velocity Computation) method to consider bottom boundary gradients in the analysis of flood flows and bed variations. This paper reconstructed and applied our extended model to the flood flows and bed variations around the Aganogawa River sandbars with large topographic changes produced by flushing of river mouth sandbars. Based on the time series data of observed water surface profiles, the model is applied to calculation of flushing of river mouth sandbars at large 2011 flood of the Aganogawa River. The calculation results provided a good explanations for process of the deformations and flushing of the Aganogawa River mouth sandbars in 2011 flood.