

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

STUDY ON THE NEW ANALYSIS METHOD FLUSHING OF THE RIVER MOUTH SANDBARS BY THE FLOOD FLOW

立山政樹¹・山崎友子²・田部成幸²・内田龍彦³・福岡捷二⁴
Masaki TATEYAMA, Tomoko Yamazaki, Tatsuhiko UCHIDA,
Nariyuki TANABE and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 博士課程前期課程
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²非会員 国土交通省北陸地方整備局 阿賀野川河川事務所

³正会員 博(工) 中央大学研究開発機構(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The river mouth bars in the Aganogawa River estuary extend toward the center of river from both banks. The sandbar causes the discharge capacity to decrease and the water level to rise. Therefore, it is important to understand flushing mechanism of river mouth sandbar during a flood event. The authors' studies on river floods showed that the flow and bed variation during a flood could be explained by means of a suitable numerical analysis method using temporal changes in observed water surface profiles and. The objective this paper is to clarify the extension process of channel through the river mouth by the quasi-three dimensional analysis coupled with bed variation analysis, which is capable of estimating the bottom velocity and the non-hydrostatic pressure distributions of flows.

Key Words : *BVC method, River mouth sandbar, Bed variation, Flood flow, Aganogawa River*

1. 序論

河口に発達した砂州を有し一部河口閉塞がある河川では、海からの塩水遡上や波浪侵入の強度が弱まる一方で、洪水時には、河口砂州によって洪水流下が妨げられ、河口から上流に向かって河道内水位が上昇し、河川への内水の流れ込みが困難となり河口周辺の氾濫や浸水被害の危険性が高まる。洪水時、河口砂州を越流する流れが発生すると、河口砂州は一部フラッシュされ、河口砂州による流れの抵抗は大きく減じる。このような背景から、河口砂州が発達する河道では、洪水時の河口砂州地形の変動と河口砂州の洪水流に対する抵抗変化を把握することが重要な課題となっている。

福岡は、洪水時の様々な現象は水面形に現れることから、観測水面形の時間変化データと適切な解析法により、洪水時の水理現象を説明出来ることを示している¹⁾。例えば、岡村ら²⁾は、利根川の河口部を対象に観測水面形の時間変化を用いた洪水流河床変動解析を行い、実現象を良好に再現している。このことから、同様な解析法を砂州のある河口部の洪水流解析に用いることは有効であ

ると考えられる。洪水流による河口砂州フラッシュの既往研究には、桑原ら³⁾、細山田ら⁴⁾、佐川ら⁵⁾によってそれぞれ、名取川、阿賀野川、熊野川を対象に平面二次元洪水流河床変動解析が行われたものがある。しかし、複雑な形状を有する河口砂州は、洪水流によって大きな変形を受け、同様に洪水流の流線が平面方向、鉛直方向に大きく曲げられることによって、三次元性の強い流れ場となる。このような流れ場において、平面二次元解析法は流れの鉛直成分を考慮できないため、河口砂州近傍の流れの三次元性による底面の流速や圧力を正しく評価できない。また、同解析法では川底を構成する河床、河岸斜面上の底面流速を正しく評価できないため、河床洗掘と河岸浸食に分けて、計算することが行われている。河床面は河底から河岸までゆるやかに連続した境界を構成しており、これを区別して別々に計算することは、河口砂州フラッシュの本質的な解析法と成り得ないとする。立山ら⁶⁾は、内田・福岡によって開発された浅い流れの仮定を用いずに底面の流速と圧力分布が評価でき、河岸も緩やかな斜面からなる河床の一部と考えることで河岸と河床を区別せず、底面流速を求め、一体的に底面せん

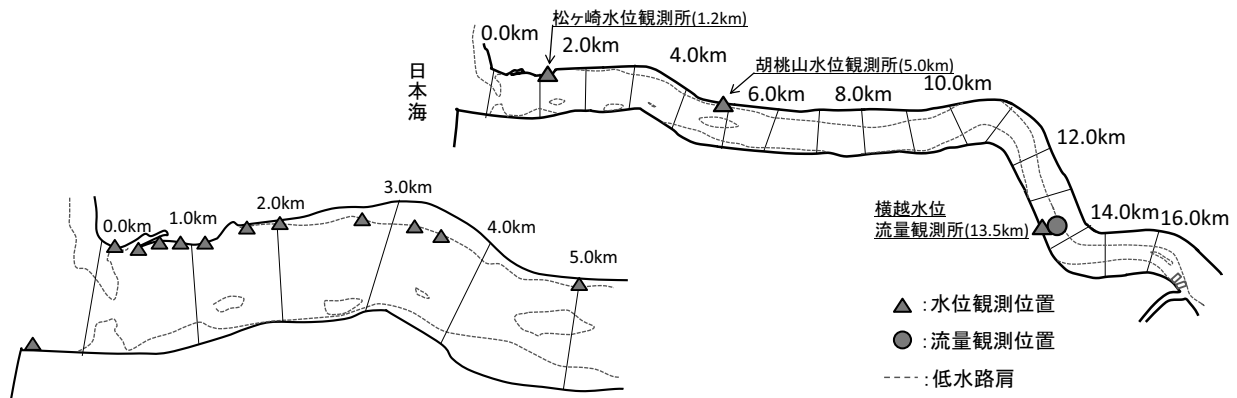


図-1 対象区間平面図と水位流量観測位置⁶⁾一部加筆

断力を評価し得るBVC法(底面流速解析法)⁷⁾を一般座標系に拡張し、H23.7阿賀野川大洪水に適用することで、洪水時の河口砂州の挙動と洪水流への影響を検討した。しかし、この研究では、河口周辺の地形を十分に再現することはできなかった。これは河口砂州の変形を支配する砂州上の越流に関して、河口砂州高さと砂州近傍の水位の精査が不十分であったことと、計算格子が大きく河口砂州近傍の流れの三次元性が評価できなかったこと等が主要な原因として挙げられた。本論文では、新たに得られた洪水時のCCTVビデオカメラ画像を詳細に調べ、砂州上を越える流れと河口砂州の形状や砂州上の水位関係を明らかにし、さらには、砂州近傍の三次元流計算ができるように水深程度の細かなメッシュを用いることにより、H23.7阿賀野川大洪水による砂州の変形についてより精度の高い解析を行う。

2. H23.7阿賀野川大洪水における河口砂州を越える流れの状況

(1) 対象区間と対象洪水の概況

図-1には、対象とする阿賀野川の河口から16.0kmまでの平面図を示している。河口砂州は両岸より大きく発達し開口部幅は約200mであり、堤間幅約1000mに対し、流路を大幅に狭めている河口部の河床材料は、ほぼ一様であり、代表粒径 d_{50} は0.5mmである⁶⁾。

対象とするH23.7阿賀野川大洪水は、横越観測所(13.5km)において観測史上最大でピーク流量約11,000 m^3/s (計画高水流量13,100 m^3/s)の大洪水となった。この洪水により河口砂州開口部は約450mまで広がり、特に右岸砂州の浸食が顕著であった⁶⁾。

阿賀野川では、河口域に縦断的に密に簡易水位計を設置し、河口砂州が大きく変形したH23.7洪水の水面形の時間変化を観測した。

(2) 洪水時における河口砂州拡幅の挙動

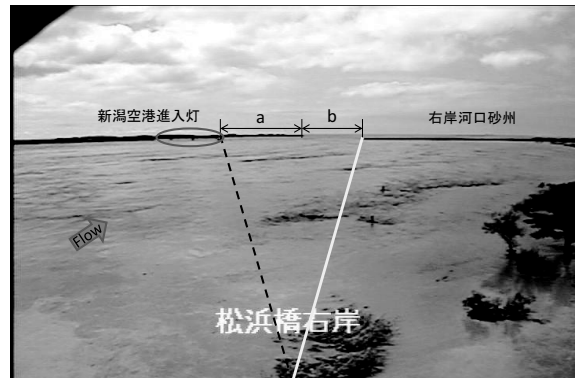


図-2 松ヶ崎橋右岸CCTVカメラ画像(H23/7/30 14:00撮影)



図-3 洪水時における右岸河口砂州拡幅量の算定

図-2に示すような洪水時の右岸河口砂州の写真が0.8km付近に設置されたCCTVカメラにより断続的に得られた。CCTVカメラ設置位置は図-3に示している。このCCTVカメラ画像より河口砂州の水没していない先端の位置を調べ、洪水時における河口砂州拡幅の検討を行う。検討方法の概要を図-2に示す洪水時撮影画像を例に説明する。まず、新潟空港進入灯、左岸先端、右岸砂州先端に着目し、図内の様にa, bを定める。次に図-3に示すように距離Lをaと対応するように決定する。画像のひずみを無視し、 $a:b=L:x$ の関係からxを求め、xの先端とカメラ位置を結び、河口砂州幅算定位置と交わる位置を写真撮影時の砂州先端とする。そして、洪水前の河口砂州先端から写真撮影時の砂州先端までの後退距離を本研究では

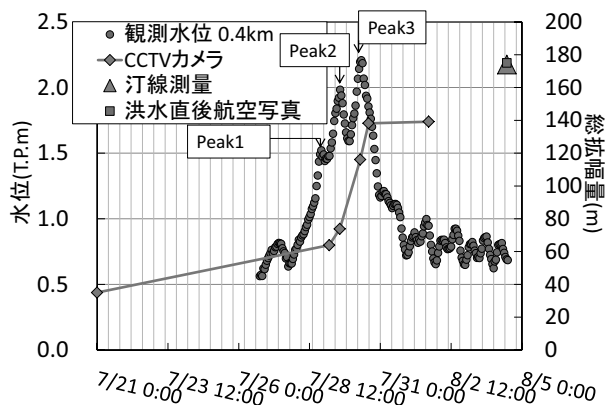


図-4 洪水時の右岸河口砂州拡幅量と0.4km観測水位

拡幅量と定義する。図-4には検討で得られた拡幅量の時間変化と0.4km地点における一時間毎の観測水位との関係を示す。0.4km観測水位ハイドログラフの3つのPeak値をそれぞれ順番にPeak1, Peak2, Peak3と命名した。この手法により求めた洪水後の拡幅量は洪水後の汀線測量結果⁶⁾や写真-1に示す洪水直後航空写真から読み取れるものよりやや小さく見積もられている。これはa, bを決定する際に遠近補正を行わなかったことが原因として考えられるがその差はあまり大きくなく実用可能な範囲で洪水時における河口砂州の拡幅量を得ることが出来たと考えている。この検討より洪水時の河口砂州はPeak2の後からPeak3の後にかけて急激に拡幅が進行し、減水期の右岸砂州の拡幅がそれほど大きくないことが明らかとなった。また、右岸砂州は洪水ピーク直後に少なくとも140mから最大175mまで拡幅されていたことがわかった。

(3) 洪水時写真(図-5)を用いた河口砂州地形の推定

洪水時に撮影された映像と観測水位から河口砂州地形を推定し、水位と地盤高の相対関係を明らかにすることで、洪水時の河口砂州の挙動について検討を行う。図-5は、洪水ピーク時にラジコンヘリコプターを用いて撮影された河口砂州周辺の斜め写真をオルソ変換した画像である。図-5が撮影された時刻の0.4km地点観測水位は2.22mであるため、写真中の右岸砂州の非水没域上流面の標高は2.22m以上の高さであると推定される。この推定された地形情報を3.(2)に記すよう、解析の初期地形として用いた。

3. 河口砂州形状の阿賀野川H23.7洪水時の変動解析

(1) 基礎方程式の概要

河口砂州の存在が洪水流下を阻害することによって、流線が大きく曲げられ、流れの三次元性が強くなる。このような河口砂州及び近傍の河床変動解析を行うために



写真-1 洪水直後(8/4)撮影 阿賀野川河口部航空写真

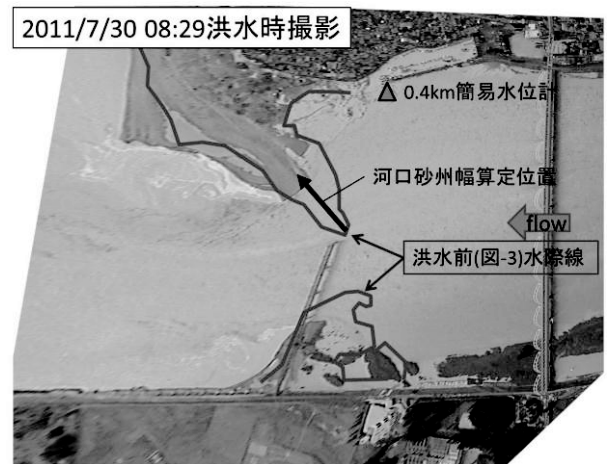


図-5 オルソ変換した洪水時ラジコンヘリコプター写真

は、三次元流れに起因する底面圧力を考慮し、底面流速を精度よく求め、河床面から砂州斜面上に連続する河床境界面の土砂移動を一体的に解く必要がある。そこで本研究では、底面の流速と圧力分布が評価できるBVC法(一般底面流速解析法)⁷⁾を一般座標系に拡張したモデル⁶⁾を用いる。本解析モデルは渦度の定義式を浅い流れの仮定を用いず水深積分することで得られる底面流速方程式(1)と鉛直方向運動方程式を水深積分することで得られる底面圧力方程式(2)によって流れの三次元性を考慮し、底面流速と底面圧力を半直接的に解くことに特徴がある。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \frac{\partial W h}{\partial x_i} + w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{dp_b}{\rho} = \tilde{U}^\xi h \frac{\partial W}{\partial \xi} + \tilde{U}^\eta h \frac{\partial W}{\partial \eta} + \tilde{\tau}_{b\xi} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \tilde{\tau}_{b\eta} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \quad (2)$$

ここに w_s, w_b :水面と底面の鉛直流速, z_s :水位, z_b :河床高, $\tilde{\tau}_{b\xi}, \tilde{\tau}_{b\eta}$:底面せん断応力の ξ, η 方向反変物理成分である。底面流速 u_{bi} , 底面圧力 dp_b を評価するため、水深 h と水深平均流速 U に加え、水表面流速 u_{si} , 水深平均渦度

Ω_j 、水深平均鉛直流速 W に関する方程式が連立して解かれる。河床変動解析には掃流砂と浮遊砂を考慮し、流砂の連続式から河床高を評価する。BVC法⁷⁾は、連続する河床から砂州斜面まで底面流速を評価することが出来る特徴を持つ。本研究では河岸浸食を河床の変動と別の方程式を用いて解くのではなく、河岸は河床と連続する緩やかな斜面とみなして河床と河岸の底面流速場をBVC法で求めている。BVC法により評価された底面流速を河床の縦横断勾配を考慮している福岡・山坂の式¹⁾ (4), (5), に代入することで底面せん断力を求め、このせん断応力を芦田・道上の式⁹⁾に代入し流砂量を計算する。

$$\tau'_* = \tilde{J} \sqrt{\tau'^2_{*\xi} + \tau'^2_{*\eta} + 2\tau'_{*\xi}\tau'_{*\eta} \cos\theta^{n\xi}} \quad (4)$$

$$\tau'_{*\xi} = \tau_{*\xi} - \frac{\tau_{*c0}}{\nu_s} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} \quad (5)$$

$$\tau'_{*\eta} = \tau_{*\eta} - \frac{\tau_{*c0}}{\nu_s} \frac{\partial z_b}{\partial \eta}$$

ここに、 τ'_* :斜面上無次元掃流力、 $\tilde{J}$:座標変換行列、

$\tau'_{*\xi}, \tau'_{*\eta}$: ξ, η 方向の斜面上無次元掃流力、 $\tau_{*\xi}, \tau_{*\eta}$: ξ, η

方向の平坦河床の無次元掃流力、 τ_{*c0} :斜面上の無次元

限界掃流力、 ν_s :河床の静止摩擦係数である。

浮遊砂については浮上量を板倉・岸の式⁹⁾、鉛直浮遊砂濃度分布をLane-Kalinskeの式⁹⁾、沈降速度をRubeyの式⁹⁾により評価し平面二次元移流拡散方程式を解いている。河床変動は掃流砂と浮遊砂を合わせた河床変動式(6)を用いて求める。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)J} \left(\frac{\partial \Delta \eta \cdot q_{B\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Delta \xi \cdot q_{B\eta}}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{(1-\lambda)} (c_b w_0 - q_{su}) = 0 \quad (6)$$

ここに、 λ :間隙比、 $q_{B\xi}, q_{B\eta}$: ξ, η 方向物理成分掃流砂量、 c_b :鉛直方向浮遊砂濃度、 w_0 :沈降速度、 q_{su} :浮遊砂量である。

基礎方程式の詳細は文献⁶⁾を参照されたい。

(2)解析条件について

表-1に解析の条件を示す。16.0kmから3.2kmまでと-1kmより海側では浅い流れの仮定をした底面流速解析法⁸⁾を用い、3.2kmから-1kmの間では、浅い流れの仮定をしない底面流速解析法⁶⁾をともに一般座標系に変換し用いている。河床抵抗の評価には相当粗度 $ks(m)$ を用いる。9.0kmより上流の区間は横越水位流量観測所(13.5km)における洪水ピーク時の水位と流量を説明する値として $ks=0.074(m)$ を設定し、9.0kmから5.0kmは上下流を滑ら

表-1 解析条件

検討区間	海～16.0km(ただし、浅水流の仮定を用いない区間は-1.0km～3.2km)
境界条件	上流端: 横越水位流量観測所(13.5km) 下流端: 新潟西港実績潮位
メッシュサイズ	5m×5m
初期河床データ	海底地形:H20.3測量等深線図 -0.6km～1.0km:H23.3測量等深線図(0.5T.P.m以下) +H23.2測量横断面図(0.5T.P.m以上) 1.2km～16.0km:H21.7測量横断面図
相当粗度 $ks(m)$	高水期:ヨシ:2.97 樹木:0.6+樹木群透過係数 グラウンド・畑:0.2 高水数:0.6 (～1.2km)[7/30 3:00以前]0.005 [7/30 3:00以降]0.04, 低水期:(1.2km～5.0km)0.005, (5.0km～9.0km)0.005～0.074, (9.0km～)0.074
河床材料	一様粒径:0.5mm

横断測量線(200m毎)の間に追加横断線を設ける
[0.0km～0.4km:25m毎, 0.4km～0.6km:50m毎]

追加横断線と河床等深線図を重ね、交わった点の河床高を読み取り、追加横断線の河床高を決定する(水没部0.5T.P.m以下のみ)

追加横断線と写真を重ね、
平水時の水際線と追加横断線の交点を0.5m、
洪水時非水没域内の水際線と追加横断線の交点を2.5mとした。
(河口砂州高の決定)

全ての横断線を縦断的に繋ぎ合わせ、河床を決定する

図-6 初期河口形状の設定手順

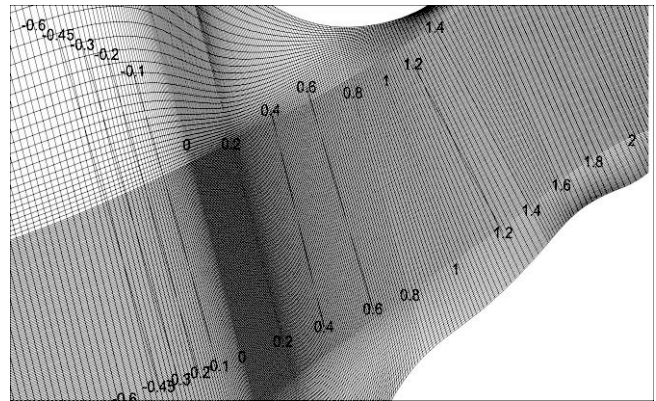


図-7 解析に用いた河口部のメッシュ形状

かに接続するよう ks を設定した。5.0kmから下流の区間では $ks=0.005(m)$ を与えた。7/30 3:00以降のPeak3は1.2kmより下流の区間で、 $ks=0.04(m)$ を用い、5.0kmから1.2km区間で $ks=0.005(m)$ を用いた。初期河口地形は計算結果に大きく影響することから、図-6に示す手順で信頼性が高くなるように河口地形を決定した。横断面図と河床等深線図から読み取れない位置の河口砂州高は、平水時における水際(図-3)の水位としては新潟西港の平均潮位より0.5mを与え、洪水時の水際(図-5)、すなわち非水没域前面の標高として、2.(3)の検討より推定された標高2.33mより高い2.5mとすることで定めた。解析に用いた河口部周辺のメッシュ分割を図-7に示す。河口砂州周辺の0.0kmから0.4kmの間では流れの三次元性を精度よく解くため、水深スケール以下である5mを縦横断方向のメッシュ長さとして設定している。0.4kmより上流区間ではおおそ縦断方向20m、横断方向5mとし、海ではさらに粗いメッシュを設定している。

(3) 解析結果

図-8には対象区間右岸で観測された水面形と解析水面形の比較を示す。洪水時の水面形は概ね再現されており、0.2kmで観測されていた河口砂州近傍で逆勾配となる水面形も再現できている。1.2kmにおける段状の変化は、右岸際の水位を出力しているために河道が直線的でないことから生じている（図-1）。図-9には、河口部の河床

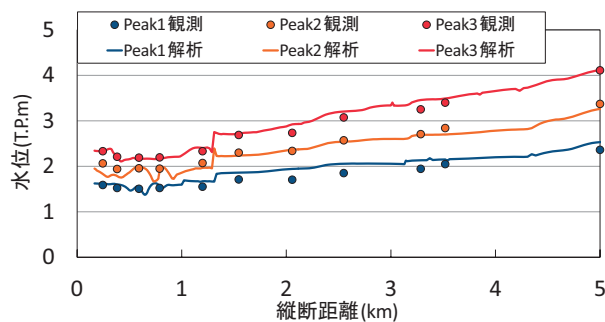


図-8 洪水ピーク時の解析と観測水面形の比較

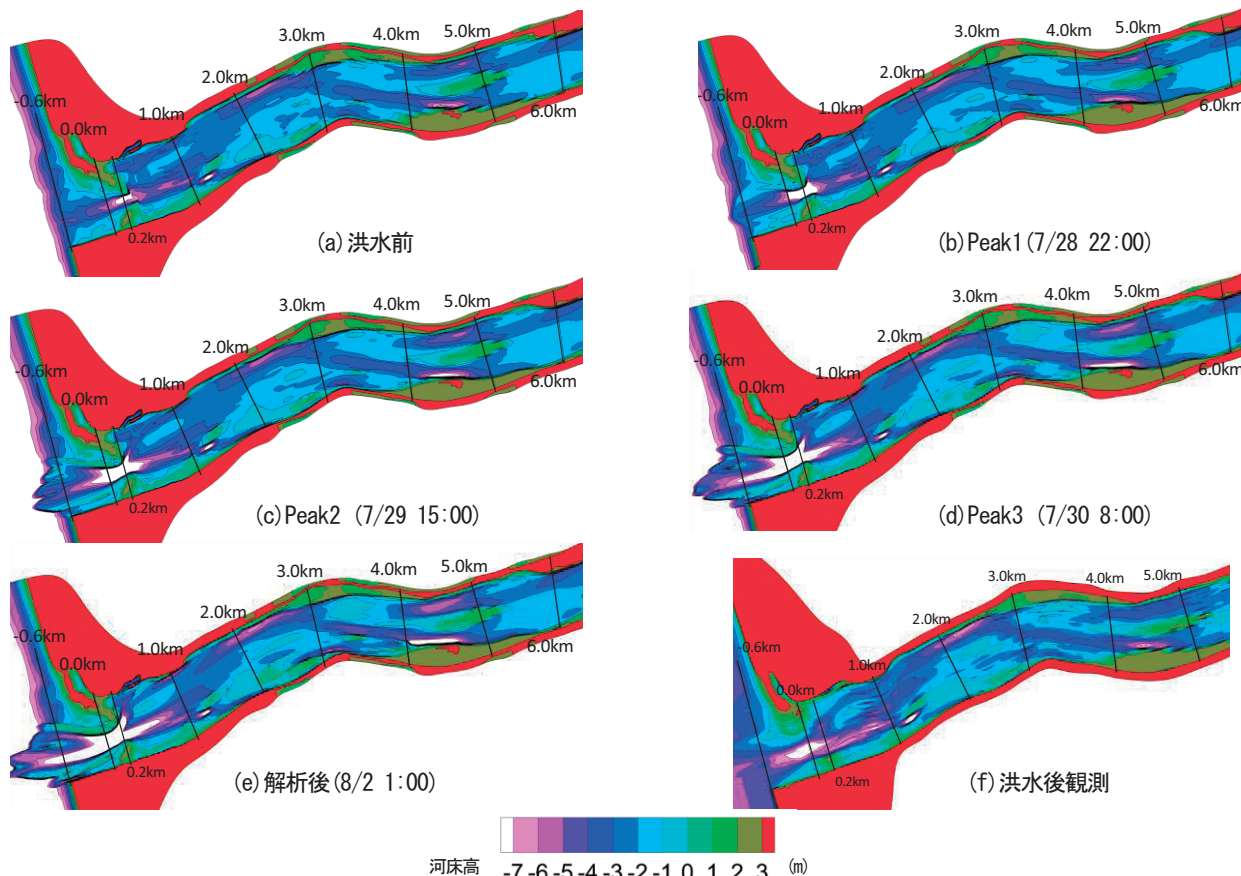


図-9 河口部の河床変動解析結果の時間変化と洪水後観測結果の比較

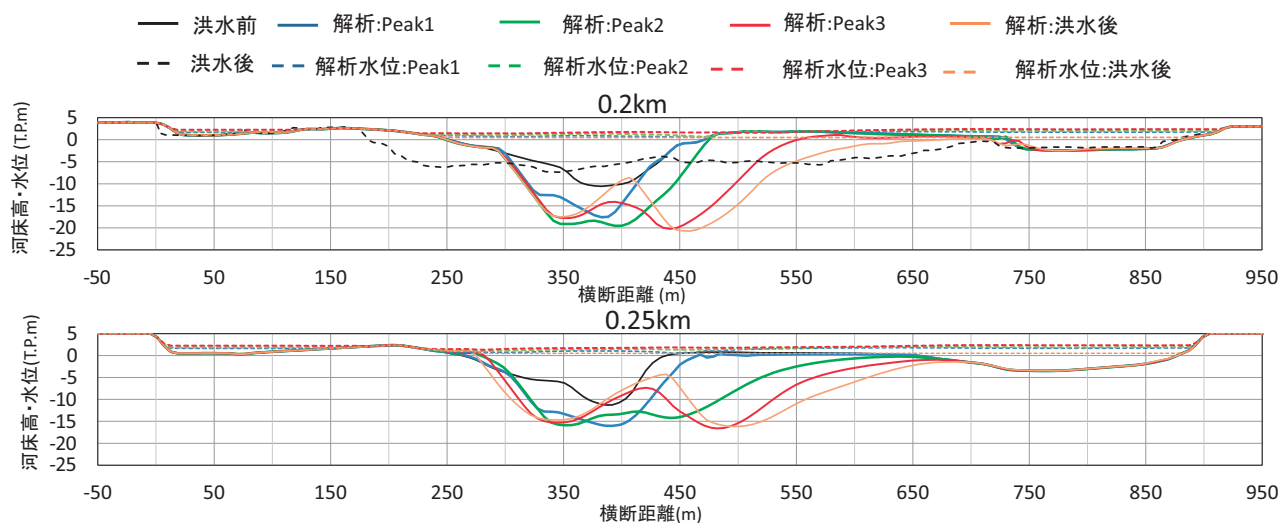


図-10 0.2km, 0.25km横断面河床における解析結果と観測結果の比較

変動解析と洪水後観測結果より得られた河床の平面図を示す。図-10には、0.2kmと0.25km横断面における河床と水面の解析結果の時間変化と観測結果の比較を示す。

0.2km断面は、Peak1では砂州を越流する流れがなく、横断方向の変動がほとんど生じていないが、Peak3までに幅100m、深さ10m以上フラッシュされている。これは右岸砂州上を越流したためである。相当粗度 k_s の値はこの時間に河床が大きく変動したため変化したと考えられる。そして、洪水後の結果に示されるよう、洪水ピーク後も右岸砂州の拡幅は進行していることが分かる。また、河道中央部では、10m以上の大きな洗掘が起き、その後図-9(d)(e)(f)に示すように、河口直上流の砂州が、洪水ピーク頃から減水期にかけ、下流へと遷移し開口部を大きく埋めている。しかし、洪水での埋め戻し量は小さく洪水後地形を十分には再現できてはいない。このことについては、洪水後地形が5か月後の観測結果であることから海から波で川へと運ばれる土砂の堆積の影響が含まれているため、詳細な議論はできないが、掃流力の算定方法(式(4),(5))に改善の余地があると考えている。一方で、左岸砂州は実測結果では拡幅しているが解析結果では、洪水中にほとんど形状変化が生じていない。これは、左岸砂州を越流する流れが生じなかったためと考えられる。0.2km断面は左岸砂州の海側断面を示しているため、川側断面にあたる0.25km断面を見ると、解析結果は初期地形から変動している。しかし、越流は生じていないように見える。そのため0.2km断面での変動が小さかったと考えられる。右岸砂州の初期地形は、CCTVカメラ画像と砂州近傍で行われた水位観測結果によって、砂州形状を把握でき、越流水位による浸食が生じたが、左岸砂州の初期地形は測定精度が低かったため十分議論が出来なかった。このことから、洪水中CCTVカメラや砂州近傍の水位観測によって砂州形状を把握することは、洪水による河口砂州変動を精度良く解析する上で重要であると言える。

河道内の河床変動は、図-9(e)と(f)を比較すると、河道内の堆積や洗掘の範囲や位置は概ね捉えられている。特に右岸河口砂州上流側は、流線が大きく曲がり三次元性の強い流れ場となるが、周辺の洗掘の傾向を良く捉えており、このような流れ場において水深スケール以下のメッシュを用いたBVC法を用いることは有効であると言える。しかし、1.0km右岸と3.0km左岸に局所的な洗掘が見られる。これは両地点の上流側に透過型水制が設置されており、解析ではこれを考慮していないため、洪水流が集中し、局所洗掘が起きたと考えられる。

本研究では、H23.7阿賀野川大洪水中の河口砂州の変形挙動を検討するため一般底面流速解析法を用い水深スケールの三次元性流れを捉えられるように解析メッシュサイズを水深以下となるよう工夫して河床変動解析を行った。

洪水時撮影されたカメラ映像と解析から、洪水中の右岸河口砂州がPeak2からPeak3にかけて大きくフラッシュされ、減水期にはほとんど拡幅しない砂州挙動が明らかとなった。また、砂州近傍の水位を求め砂州頂点部が水没する水位を正しく求めることで、砂州上の越流による浸食量が大きくなることが推定された。

一般底面流速解析法を用いた検討によって、洪水時における河口部の河床変動の挙動が示された。また、水深以下のメッシュサイズを用い、流れの三次元性を考慮した解析が、河口砂州近傍の河床変動を考える上で重要であり、河口砂州を有する河口部での高精度な解析には、詳細な観測により洪水前後の砂州地形が把握されることが不可欠であることが示された。

参考文献

- 1) 福岡捷二: 洪水流の水利と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 2) 岡村誠司, 福岡捷二, 竹本隆之: 利根川河口部の河床形状と洪水中の河床変動, 水工学論文集, Vol.54, pp. 751-756, 2010.
- 3) 桑原直樹, 田中仁, 佐藤勝弘, 首藤伸夫: 洪水時における河口地形変化の数値計算—格子間隔, 掃流砂, 浮遊砂, 二次流の効果について—, 海岸工学論文集, Vol.42, pp.596-600, 1995.
- 4) 佐川拓也, 大谷靖朗, 市川真吾, 武内慶了, 山下武宣: 河口砂州フラッシュの再現計算と要因分析, 水工学論文集, Vol.51, pp.955-960, 2007.
- 5) 細山田得三, 佐野啓明, 野田猛, 酒井優, 酒匂秀典: 洪水時における阿賀野川河口砂州のフラッシュ現象再現に関する研究, 河川技術論文集, Vol.12, pp.73-78, 2006.
- 6) 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-, 水工学論文集, Vol.57, I_1009-I_1014, 2013.
- 7) 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, 水工学論文集, Vol.56, I_1225-I_1230, 2012.
- 8) 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, pp.16-29, 2011.
- 9) 水理公式集[平成11年度版]:土木学会水理委員会, 丸善, 1999.

4. 結論

(2013. 4. 4受付)