水工学論文集,第57巻,2013年2月

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-

RIVER MOUTH SANDBAR AND BED VARIATION ANALYSIS DURING LARGE FLOOD: JULY 2011 FLOOD IN THE AGANO RIVER

立山政樹[1]・内田龍彦[2]・福岡捷二[3]・田部成幸[4]
Masaki TATEYAMA, Tatsuhiko UCHIDA, Shoji FUKUOKA and Nariyuki TANABE

[1]学生会員　中央大学大学院　理工学研究科　土木工学専攻（〒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准教授（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
[3]フェロー　工博 Ph.D　中央大学研究開発機構教授（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
[4]国土交通省　北陸地方整備局　阿賀野川河川事務所　所長(〒956-0032 新潟県新潟市秋葉区南町14-28)

In the Agano River estuary flowing into Japan Sea, bars at the mouth are developed from both river banks. The bar causes the river discharge capacity to decrease and the water level to rise. Therefore, it is important to understand mechanism of river mouth bar flushing during a flood event. One of the authors has shown that flow and bed variation during a flood event may be explained by means of a suitable numerical analysis method using temporal changes in observed water surface profiles effected by various events in the river. The objective of this paper is to clarify flushing at river mouth bar during a large flood by temporal observed water surface profiles and the numerical analysis.

Key Words : *Quasi-3D analysis, Bed variation, River mouth bar, Flood flow, Agano river*

１．序論

阿賀野川河口部には，両岸に河口砂州が発達しているが，既往最大規模の出水となったH23.7洪水では河口砂州が大きく開口した．河口砂州は洪水時に水位上昇を引き起こし，その影響は河川の上流方向の長い区間に及ぶことが多い．一方，洪水時の河口砂州のフラッシュは砂州周辺で大きな河床変動を引き起こす．洪水流と河口砂州の相互作用を定量的に明らかにすることは砂州が発達した河口を有する河川の管理において重要な課題となっている．このため，H23.7阿賀野川洪水のような大規模の洪水時に河口部周辺でどのような現象が生じたのかを解析することが求められている．

一般に，潮位変動の大きい河川での洪水時の河口付近やその上流の水位は，洪水時の潮位や河口砂州の影響を強く受けて時間的に変化するため，洪水痕跡水位が最大流量流下時の水位を示すとは限らず，痕跡水位を用いる解析方法は，洪水中に起きた現象を十分に説明することができないことが明らかにされている．福岡[1),2)]は，洪水時に生じる様々な現象の影響は水面形に現れることから，水面形の時間変化データと適切な数値解析法により，洪水時の現象解明が可能になることを示している．例えば，岡村ら[3)]は，洪水時の河床変動や潮位の影響等が水面形の時間変化に現れると考え，観測水面形の時間変化を用いた準三次元洪水流・河床変動解析法を石狩川河口部に適用し，この解析法が様々な影響を受け複雑な水面形の時間変化をする河口部の水理現象の解明に有用な方法であることを示した．洪水流による河口砂州フラッシュの再現に関する既往の研究では，細山田ら[4)]は阿賀野川H14洪水，佐川ら[5)]は新潟県の荒川H16洪水，桑原ら[6)]は名取川S61洪水を対象に，平面二次元解析法を用いて検討している．しかし，河口砂州近傍では流れの幅が縮小し，流線が大きく曲げられることによって，三次元性が強い流れとなる．平面二次元解析法では，流れの鉛直構造によって変化する河床に作用するせん断応力(底面流速)や圧力分布を評価できないため，河口砂州近傍の河床変動や河口砂州の抵抗を適切に評価できないと考えられる．三次元解析法を洪水時の河床変動解析に適用することは，極めて計算負荷が大きいことから，三次元性を伴う流れ場において，河床に作用する力を実用的に評価する解析法が求められている．近年，内田・福岡[7)]は，浅水流の仮定をせずに底面流速と底面圧力を評価できる準三次元解析法（一般底面流速解析法）を開発し，構造物周辺の局所的な三次元性が強く影響する流れ場の流速

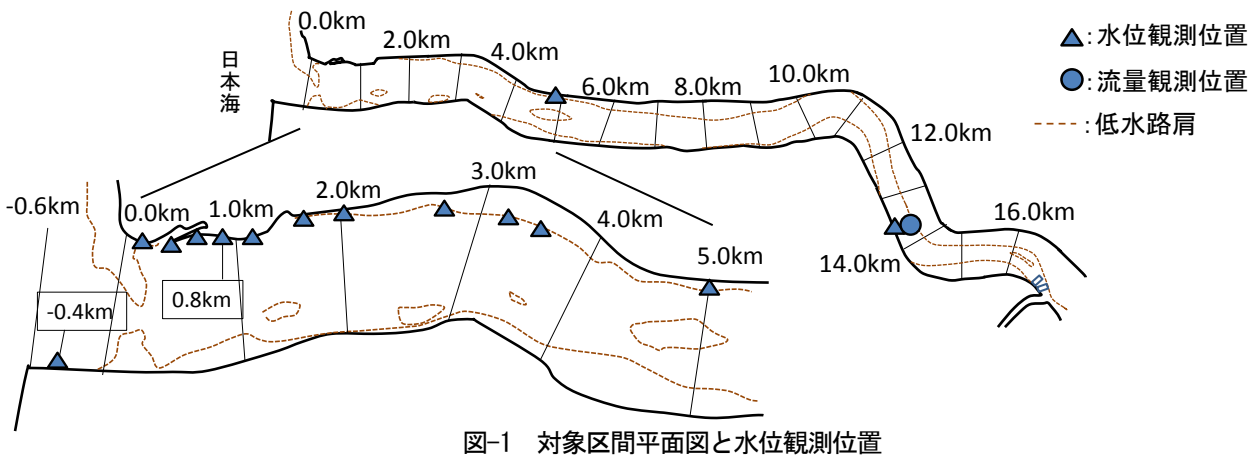

図-1　対象区間平面図と水位観測位置

分布や圧力分布が評価できることを示した．

本研究では，著者らが開発してきた準三次元洪水流・河床変動解析法[3),8)]を浅い流れの仮定を用いない一般底面流速解析法[7)]に拡張し，観測された水面形の時間変化を用いて阿賀野川H23.7洪水を対象として洪水時の河口砂州が洪水流に与える影響とその挙動を把握することを目的としている．本論文では，河口砂州が洪水時の水位上昇に与える影響を明らかにするため，まず洪水後に測量された地形を用いた固定床の解析を行う．次に，移動床の解析を行い，洪水時の河口砂州の変形について明らかにする．

2．対象区間と対象洪水

(1) 対象区間

図-1は，阿賀野川の河口から16.0kmまでの平面形と水位・流量観測位置を示す．0.0km付近では両岸から河口砂州が発達していることがわかる．この区間の河床勾配はおおよそ1/1000から1/10000の非常に緩やかな勾配であり，14.0kmまで塩水遡上が確認されている[9)]．このような緩勾配河川では，下流部での河口砂州による水位上昇の影響が上流方向に長い区間伝わる．阿賀野川河口部では洪水時の河口砂州による水位上昇と河口砂州挙動を明らかにするため，松ヶ崎観測所(1.2km)，胡桃山外水水位観測所(5.0km)及び多数の圧力式簡易水位計により，縦断的に密な水位観測体制が整備され，今回の大出水時の水面形の時間変化データを取得することが出来た．

(2) 対象洪水

平成23年7月新潟・福島豪雨では，前線性豪雨により福島県只見町で観測総雨量が観測史上最大の711mmを記録するなど記録的な豪雨となった．このため，阿賀野川本川では，外水氾濫には至らなかったものの堤防の漏水や裏法崩れ，護岸崩壊等の被害が多数確認され，横越流量観測所(13.5km)地点のピーク流量は，計画高水流量13,100m^3/sに対して，約11,000m^3/sを記録した大洪水となった．**図-2**は，横越(13.5km)水位観測所で観測された

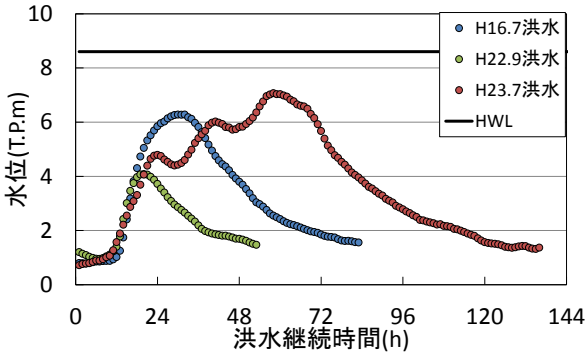

図-2 横越(13.5km)水位観測所での水位観測値

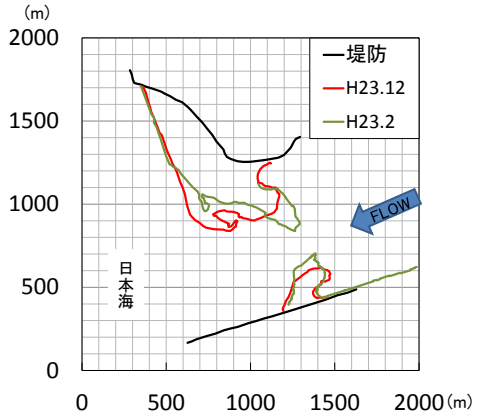

図-3 洪水前後での河口砂州の形状

洪水水位である．比較のため，これまでの観測最高水位を記録したH16.7洪水を示す．　H23.7洪水は最大水位，継続時間ともにH16.7洪水を上回り，H.W.Lに1.6mまで迫った大規模な洪水であったことが分かる．本洪水は3つのピーク波形を持つ．本論文では，この3ピークに対して発生時間順に“Peak1”，“Peak2”，“Peak3”とする．**図-3**に洪水前，洪水の5ヶ月後に測量された河口砂州上の汀線(標高0.5m等高線)形状を示す．5ヶ月後の測量のために砂州の開口部が縮小した可能性が大きいが，それでも，両岸からの河口砂州がフラッシュされ，特に右岸砂州の変形が顕著であったことが分かる．

3．解析方法

(1) 洪水流解析（一般底面流速解析法）

洪水時の河口砂州が存在することによる水位上昇と流線が大きく曲げられる場での河口砂州のフラッシュ現象を解析するためには，河口砂州周辺の三次元的な流れによる河床に作用するせん断応力と圧力の分布を適切に評価する必要がある．そこで本研究では著者らが開発してきた準三次元洪水流・河床変動解析法[3),8)]を静水圧分布の仮定等の浅い流れの仮定を用いずに底面流速と底面圧力を評価できる一般底面流速解析法[7)]に拡張する．一般底面流速解析法では，流速鉛直分布を三次元解析によって解くことなく，渦度の定義式を水深積分することによって得られる式(1)の底面流速方程式を用いることによって底面流速を半直接的に解くことに特徴がある．

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

ここに，z_s：水位，z_b：河床高，w_s，w_b：水面，底面の鉛直方向流速であり，それぞれ水面，底面の運動学的境界条件を用いて式(2)で表される．

$$w_{(s,b)} = \frac{\partial z_{(s,b)}}{\partial t} + u_i \frac{\partial z_{(s,b)}}{\partial x_i} \qquad (2)$$

式(1)を用いて底面流速を評価するために，本解析法では通常の平面二次元解析法の未知量である，水深h，水深平均流速U_iに加え，水深平均渦度Ω_i，水表面流速u_{si}，及び水深平均鉛直方向流速Wに関する方程式を解く．また，圧力分布を評価するため，底面の圧力偏差dp_bの方程式を解く．本研究では河川流へ適用するため，基礎方程式を一般座標系に変換して解く．水深平均流速U_iに関する基礎方程式は，通常の平面二次元に用いられる運動方程式に流速鉛直分布による水平応力項と静水圧分布からの偏差圧力項を加えたものである． 水深平均渦度Ω_i，水表面流速u_{si}に関する方程式については既往の文献[8)]を参照されたい．

水深平均鉛直方向流速Wに関する方程式は，式(1)と連続式を連立することによって得られる[7)]．一般座標系では，式(3),(4)で表される．

$$\frac{\partial \Delta\eta \cdot h^2 \phi_\xi}{J\partial\xi} + \frac{\partial \Delta\xi \cdot h^2 \phi_\eta}{J\partial\eta} + \frac{\phi^P - \phi}{k_1} = 0 \qquad (3)$$

$$\left(\phi_\xi, \phi_\eta\right) = \left(\frac{\partial\phi}{\partial\tilde{\xi}} + \cos\theta^{\eta\xi}\frac{\partial\phi}{\partial\tilde{\eta}}, \frac{\partial\phi}{\partial\tilde{\eta}} + \cos\theta^{\eta\xi}\frac{\partial\phi}{\partial\tilde{\xi}} \right) \qquad (4)$$

ここに，$\phi = (Wh)^{n+1} - (Wh)^n$，$\phi^P = (Wh)^P - (Wh)^n$，$k_1 = 1/20$，$(Wh)^P$：$\delta u_i^P$を用いた流速鉛直分布を用いて連続式から計算した鉛直方向流速の水深積分値，δu_i^P：$(Wh)^{n+1}$を用いて式(1)から計算される水表面流速u_{si}と底面流速u_{bi}の差である．δu_i，Whは格子中央に定義し，式(1),(3),(4)をコロケート格子の場合のSMAC法による圧力解析法と同様の方法で解いている．本研究では一般座標系で解析が行われるが，計算方法はデカルト座標系の既往研究[7)]と同様であり，詳細は文献[7)]を参照されたい．

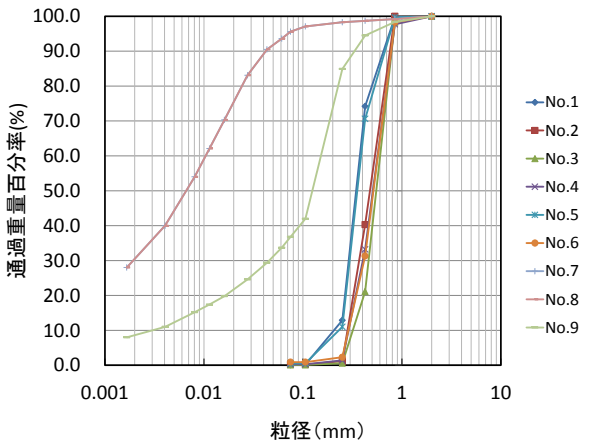

図-4　阿賀野川河口部の粒度分布

底面圧力の方程式は鉛直方向運動方程式を水深積分することによって得られる[7)]．本解析では，非定常項と水平せん断応力項を省略し，一般座標系に変換された式(5)で計算する．

$$\frac{dp_b}{\rho} = \tilde{U}^\xi h \frac{\partial W}{\partial\tilde{\xi}} + \tilde{U}^\eta h \frac{\partial W}{\partial\tilde{\eta}} + \tilde{\tau}_{b\xi}\frac{\partial z_b}{\partial\tilde{\xi}} + \tilde{\tau}_{b\eta}\frac{\partial z_b}{\partial\tilde{\eta}} \qquad (5)$$

ここに，$\tilde{\tau}_{b\xi}, \tilde{\tau}_{b\eta}$：底面せん断応力の$\xi,\eta$方向反変物理成分である．水深平均水平方向運動方程式の非静水圧分布項及び水表面流速方程式の水面の圧力鉛直勾配を評価するため，圧力偏差成分dpの鉛直分布は直線分布とした．

(2) 河床変動解析

図-4に阿賀野川河口部で調査された粒度分布を示す．No. 1～No. 6は河口砂州表層土砂，No. 7～No. 9は船上より河道中央部表層土砂をサンプルしたものである．河床材料の大半が中砂から細砂の小さな粒径で構成されている．粒径の小さい河口部の土砂移動を検討する際には浮遊砂を考慮することが重要である[3),6)]．このため，本研究では，掃流砂と浮遊砂を考慮した河床変動解析を行う．また，河床材料粒径分布に粒径のばらつきがあまり見られないことから，河床材料はd_{50}にあたる0.5mmの一様砂として扱う．河床変動解析は以下に示す式により行う．河床変動量は，流砂の連続式より求める．限界掃流力は，芦田・道上による修正Egiazaroff式[10)]，掃流砂量は芦田・道上式[10)]で計算する．浮遊砂については浮上量を板倉・岸式[10)]，鉛直浮遊砂濃度分布をLane-Kalinskeの式[10)]，沈降速度をRubeyの式[10)]により評価し平面二次元移流拡散方程式を解いている．

(3) 解析条件

解析条件を**表-1**に示す．**図-5**に河道下流部(0.8km)，河口(-0.4km)（**図-1**），新潟西港で観測された平水時水位を示す．3つの位相はほぼ同じであるが，新潟西港潮位

は他に比べて0.25m低くなっている．この理由は不明である．対象洪水時に-0.4kmの簡易水位計が欠測であったため，下流端境界条件は，新潟西港潮位を0.25m高くした水位を与えることとした．河床抵抗は，相当粗度k_sを用いて評価する．上流側13.5km横越流量観測所での流量と主としてPeak2,3の水面形が再現できるように相当粗度係数を～5.0km,9.0km～の2区間で設定した．なお，5.0km～9.0kmの低水路粗度係数は，上流と下流を直線的に補間した値を用いている．河口砂州の変動解析においては初期地形データを適切に与えることが重要である．本研究では，200m間隔の横断図に加え，-0.6km以降の区間はH20.3に観測された等深線図，-0.6kmから1.0kmはH23.2に観測された標高0.5m以下の等深線図を用いる．更に河口砂州高さについて，洪水中(Peak3の30分前)撮影された空中写真から河口砂州の冠水しない水際線を読み取り，同時刻に簡易水位計(0.2km)にて計測された水位を用いて水際線位置の地盤高を設定した．洪水後の地形は**表-1**に示すデータを用いて作成した．

4．河口砂州周辺の洪水流と河床変動解析

(1) 固定床解析による河口砂州が洪水流に与えた影響の考察

洪水後測量された地形を用いた固定床解析により河口砂州の挙動及び影響を検討する．洪水後地形は，河口砂州がフラッシュされている形状であることから，この条件での解析では河口砂州による洪水位の上昇量が少ない水面形が計算される．一方，観測水面形には洪水中の河口砂州フラッシュの程度が反映して，時間と共に水位が変化する．このことから，観測水面形と固定床解析の水面形を比較することによって，河口砂州が水面形に与える影響がわかる．**図-6**に，固定床解析と観測による水面形の比較を示す．Peak1の時間帯では，1.0km以降で解析値が観測値を0.5m近く下回っていることから，水位上昇量は大きく，河口砂州は相当程度残存していたことが推定される．Peak2の時間帯では，先ほどと比べ解析値と観測値の水位差が小さくなっているが，依然として解析値は観測値よりも低く，この時点で河口砂州は完全にフラッシュはされていないと考えられる． Peak3の時間帯では，解析水面形が観測水面形を上回る結果となった．これは，洪水後の河道形状データには洪水後の埋め戻しが含まれているため，河積がピーク時と比べ小さかったことが推定される．したがって，固定床解析からPeak2とPeak3の間で砂州の開口部断面積が最大となっていたと推定できる．

(2) 河口砂州を有する河道の洪水流と河床変動解析

図-7は，Peak1・Peak2・Peak3時の河床変動解析水面形と観測水位を示す． Peak1では全体的に解析水位が観測水位よりやや高い．これは，Peak3での水位・流量を

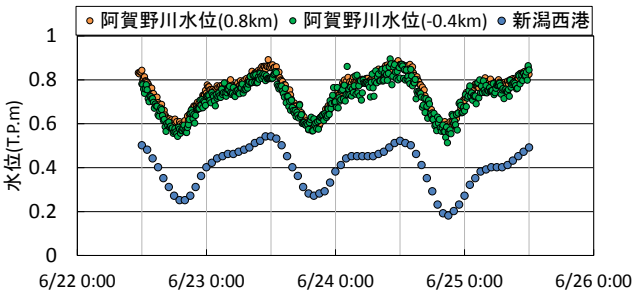

図-5　平水時観測水位・潮位

表-1　解析条件

		固定床解析	移動床解析
検討区間		海～6.0km	海～16.0km
境界条件	上流端:	胡桃山外水水位観測所(5.0km)	横越水位流量観測所(13.5km)
	下流端:	新潟西港実績潮位+0.25m	
メッシュサイズ		30m×30m	
初期河床データ		海底地形:H20.3測量等深線図	
		H23.12測量横断図	-0.6km～1.0km:H23.2測量等深線図(0.5T.P.m以下)＋H21.7測量横断図(0.5T.P.m以上)
			1.2km～16.0km:H21.7測量横断図
相当粗度ks(m)		ヨシ:2.97　樹木:0.6+樹木群透過係数　グラウンド・畑:0.2　高水敷:0.6	
		低水路:(～6.0km)0.005	低水路:(～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	

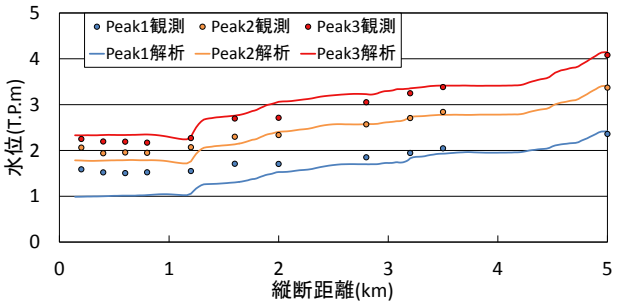

図-6　固定床解析の水面形の時間変化

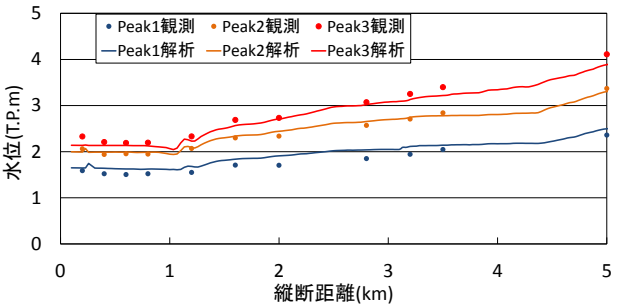

図-7　河床変動解析の水面形と観測水位の比較

説明するよう粗度係数を設定したためであることが考えられる．しかし，Peak2, Peak3の水面形はほぼ再現できている．**図-8**は，Peak1・Peak2・Peak3と解析終了時及び洪水前後で観測された河床高コンター，**図-9**は河口砂州周辺(0.0km・0.2km・0.4km)と河道内(2.2km・3.2km・4.6km) の横断河床形状変動について解析結果と洪水前後の観測結果の比較である．解析後と洪水後観測の平面河床形状を比較すると，3.2km右岸付近と2.4kmの河道中央部付近に堆積すること，2.2km付近の湾曲部洗掘が1.8kmまで延伸することが2.2kmと3.2kmの横断面河床形状を見ても再現されている．一方，4.6km付近では解析結果が実測に比べて洗掘されている．これは，**図-7**の5.0km付近では実測に比べ解析水位がやや低くなっていることから，中州の地形や樹木及び橋脚による抵抗が適切に評価されていないためと考えられる．しかし，下流

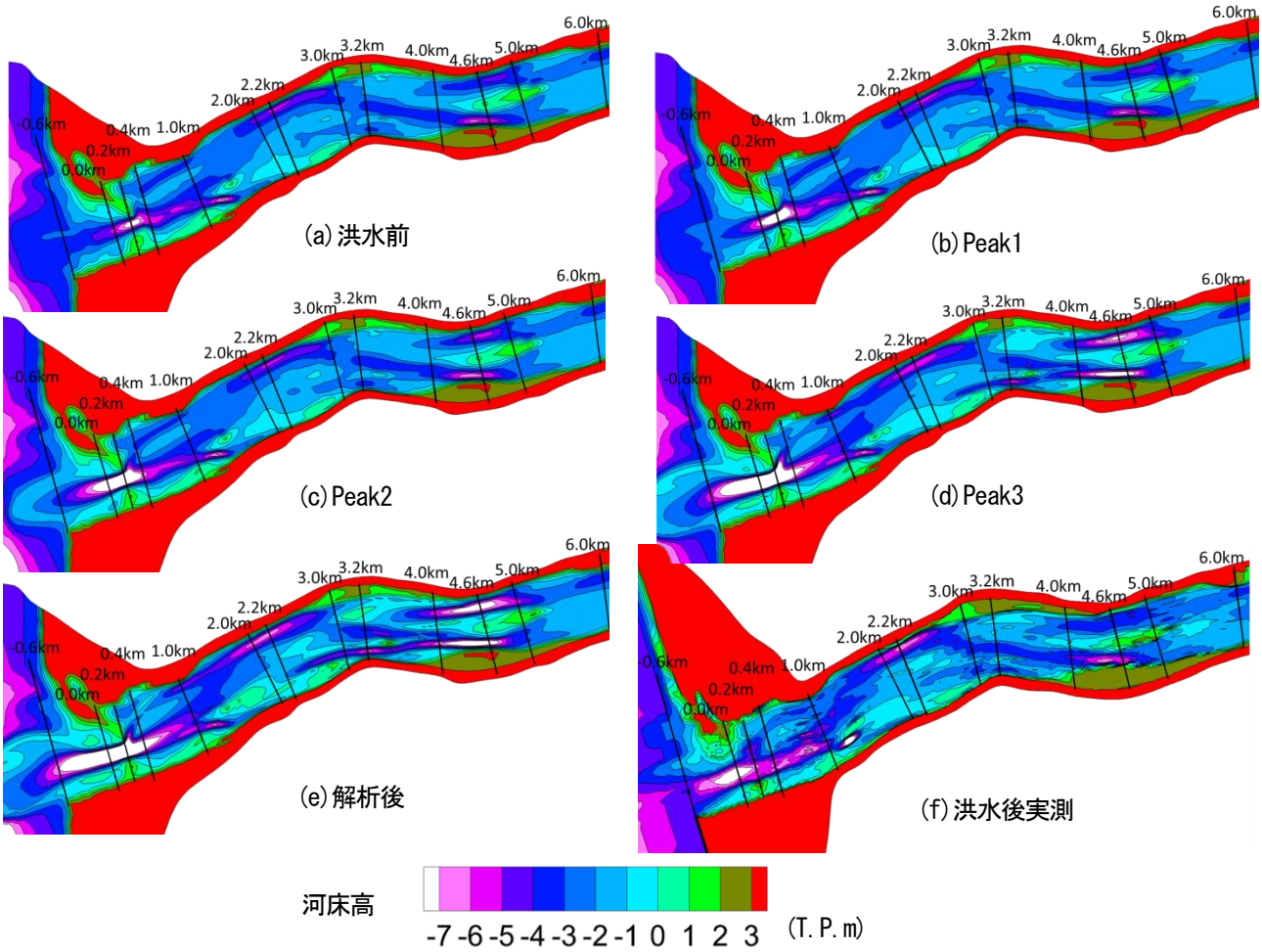

図-8　洪水前後の実測地形と解析後地形及び各ピーク時地形の比較(6.0km～-0.6km)

の2.2kmでの洗掘は説明できていることから，この問題が河口砂州近傍の河床変動に与える影響はないと考えられる．図-9の河口部横断(0.2km)を見ると，解析結果は時間的に拡幅・洗掘が進行し，断面積はPeak3にほぼ最大となる．しかし，解析後の断面はPeak3に比べ，横断方向へさらに拡幅が進み，開口部の河床がやや埋め戻されている．このことは，洪水後地形を用いた固定床解析においては，Peak3の河口砂州上流の解析水位が観測水位よりも高くなったことに対応している．一方，図-8によって河口部を比較すると解析では，河口砂州の開口部周辺河床が大きく洗掘されている．解析では，河口砂州右岸先端の洗掘は時間経過と共に発達しているが，0.2km横断線まで到達しなかったようである．この原因として解析法の問題にはメッシュが粗いことが考えられる．現在用いているメッシュは，おおよそ30mであり，河口砂州周辺の水深(10m前後)と比較してやや粗く，流れの三次元運動を十分に解析出来ないと考えられる．また，現在の解析では水際も連続する河床として取り扱っており，砂州の非水没部分からの土砂供給が評価できていないと考えられる．解析データの問題には，前章で示したように初期地形データの作成は，できる限り精度を高めたが，航空写真が斜めであることや横断データが洪水直前のものではない等のことから，河口砂州形状が実際とは異なっていたことが考えられる．　洪水後の地形データについても洪水後から5ヶ月後の測量までの期間に波浪等の外力により埋め戻し等の変形が生じているため，より詳細な議論を行うためには，河口砂州周辺の洪水直前・直後の地形データをしっかりと計測していくことが望まれる．

5．結論

本研究では，浅い流れの仮定をせずに底面流速と底面圧力を解くことのできる準三次元洪水流解析法(一般底面流速解析法)を構築し，河口砂州フラッシュの起きた阿賀野川H23.7洪水を対象とし，2つの検討を行った．一つは，洪水後地形を用いた固定床解析，他の1つは移動床河口砂州変動解析を行い流れに及ぼす河口砂州の影響と砂州地形の変動について検討を行い，両者の結果を総合的に考察した．以下には得られた主な結論を示す．

(1)洪水後地形を用いた固定床解析では，解析で得られた水面形と観測値を時間的に比較し，河口砂州はPeak2の方が，Peak1よりも解析と観測の差が少なくなっていたことから，閉塞部断面の拡大が生じ始めたことが推定された．Peak3では，解析水位が観測水位を上回るため，Peak3での砂州形状は洪水後に計測された砂州よりも洗

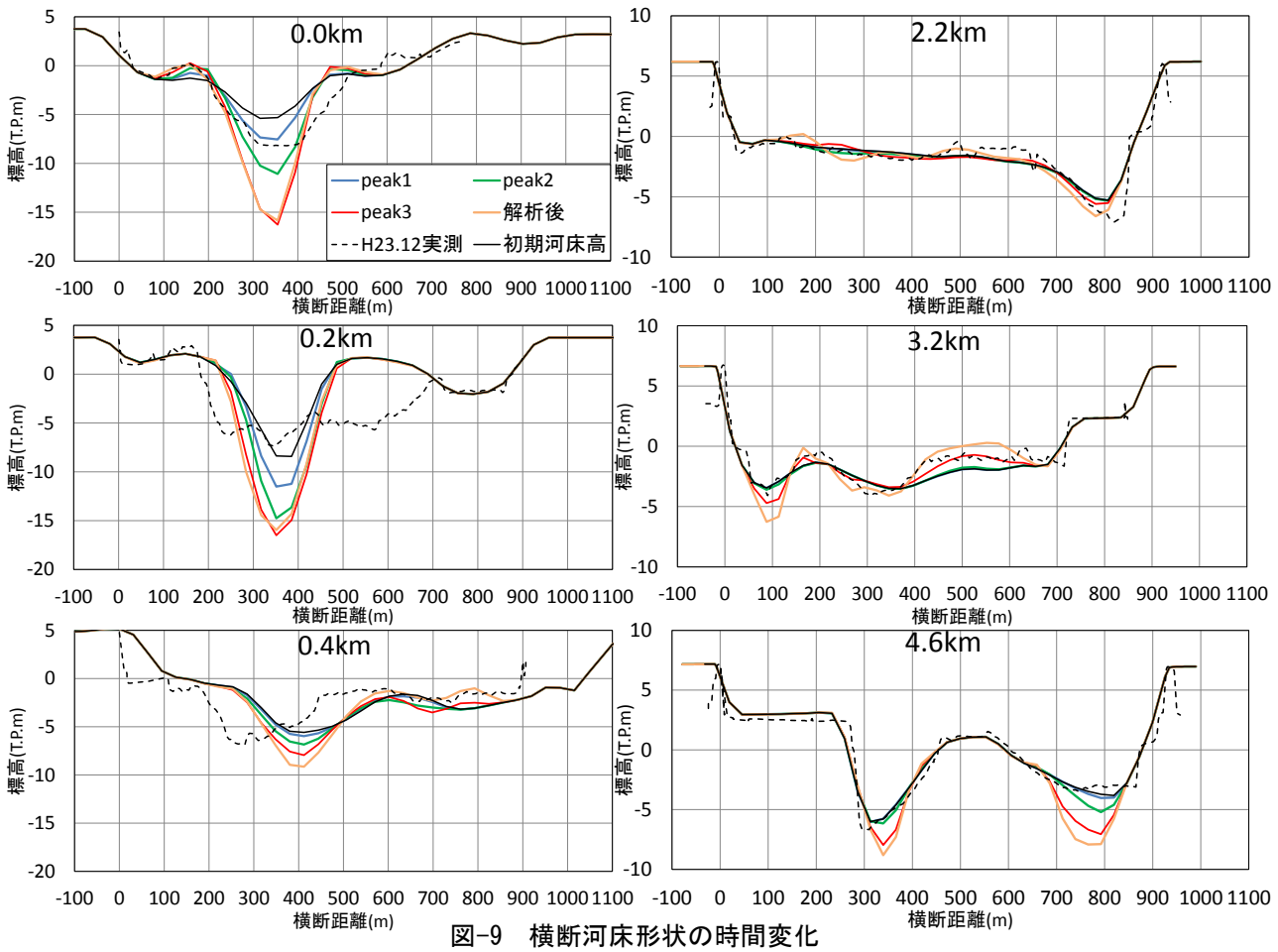

図-9　横断河床形状の時間変化

掘され開口断面が大きくなっており，また，最大開口断面はPeak2とPeak3の間に生じていたと推定された．

(2)河床変動解析では，水面形の時間変化及び河道内と流線が大きく曲がる河口砂州周辺の河床変動の特徴を説明した．また，固定床解析で得られた結果に対して，移動床解析の検討からも洪水ピーク後に0.2km横断面にて堆積が発生することを確認した．ただし，河口砂州近傍の局所的な河床変動量は実測よりも小さく，課題を残した．

(3) 洪水時の河口砂州挙動に関する検討を行うためには，河口砂州周辺の地形データが重要である．このために，洪水時の水面形の観測と定期的横断測量に加え，砂州形状の計測と大きな出水直後に地形を計測することが肝要である．

参考文献

1) 福岡捷二：洪水流の水理と河道の設計法，森北出版，2005.

2) 福岡捷二：河道設計の基本は何か−水面形時系列観測値と洪水流−土砂流を組み合わせた河道水理システムとその見える化，河川技術論文集，Vol.17, pp.83-88, 2011.

3) 岡村誠司，岡部和憲，福岡捷二：川幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式を用いた河床変動解析―石狩川河口部昭和56年8月洪水を例として―，河川技術論文集，Vol17，pp.119-124, 2011.

4) 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.

5)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.

6) 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 ー格子間隔，掃流砂，浮遊砂，二次流の効果についてー，海岸工学論文集，Vol.42, pp.596-600, 1995.

7) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流場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, 2011.

8) 輿石　大，内田龍彦，福岡捷二：水表面流速方程式を付加した底面流速解析法の開発と河川合流部への適用，水工学論文集，Vol.56, I_835-I_840, 2012.

9) 福岡捷二，市村清，加藤信夫，高橋晃，藤田光一，加賀谷均：阿賀野川における塩水遡上の実態，海岸工学講演会論文集，Vol.33, pp.596-600, 1986.

10) 水理公式集[平成11年度版]：土木学会水理委員会，丸善，1999.

(2012. 9. 30受付)