

# 洪水中の砂州の変形と河川構造物周辺の局所洗掘

## SANDBAR TRANSFORMATION AND LOCAL SCOURING AROUND RIVER STRUCTURES

忠津哲也<sup>1</sup>・内田龍彦<sup>2</sup>・石川武彦<sup>3</sup>・福岡捷二<sup>4</sup>

Tetsuya TADATSU, Tatsuhiko UCHIDA, Takehiko ISHIKAWA and Shoji FUKUOKA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所調査課長  
(〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)

<sup>4</sup>フェロー Ph.D 工博 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)

Bed protection works upstream of the Nikaryo Shukugawara weir were damaged due to local scouring during the 2007 flood. For maintenance and management of the structure, detailed survey on river bed profiles is required to understand a risk of failure and to reduce a damage of the structure against local scouring. This paper examined sandbars deformation and local scour development over time just upstream of the Nikaryo Shukugawara weir using surveying data. We demonstrated bed variation analysis by quasi-3D flow model with observed water levels which captured the characteristics of measured data. And the mechanism of local scouring with developing sandbar and discussion for maintenance and management of river structures were presented.

**Key Words :** *Nikaryo shukugawara weir , bed protection works, sandbar deformation , local scour development , bed variation analysis*

### 1. 序論

河川構造物周辺における局所洗掘は、構造物の基礎を晒し、流れを構造物近傍に集中させるため、構造物の機能や安全性を低下させ被災を引き起こす要因となる。河川構造物の維持管理において構造物周辺での洪水流による河床形状の変化を調べ、局所洗掘の発達機構を把握することは、洪水時に構造物が被災する危険性を軽減し、また被災危険性の少ない構造物を検討する際の重要な基礎資料となる<sup>1), 2)</sup>。

多摩川では平成19年9月に表-1に示すような近年の洪水の中で特に大きい洪水が発生し、石原観測所(27.8km)では戦後2番目に高い水位を観測した。この洪水により二ヶ領宿河原堰の上流護床工が流失し、巨石護岸が崩落、流出した<sup>3)</sup>。図-1は洪水期間中に撮影された二ヶ領宿河原堰近くのCCTV映像と巨石護岸の崩落の様子を示している。CCTV映像より護床工は洪水ピーク付近の9月7日7:00頃(図-4の水位ハイドログラフを参照)にめくれ上がって被災したことが確認できる<sup>3)</sup>。図-2に二ヶ領宿河原堰、巨石護岸の設置範囲と被災位置を示す。堰上流の河道は湾曲しており、砂州が形成されている。洪水後の調査から護

床工の被災範囲は右岸側に偏っており、被災範囲の直上流では深掘れが発達し、河床高が護床工敷高より低くなっていたことが分かっている。また、河道湾曲部外岸の根固め工の上やその前面に設置されていた巨石護岸では、下流部の水衝部で巨石が崩落し、流出した。護床工に被災をもたらした深掘れの発達については、洪水時に流下した砂州が堰直上流の湾曲と堰の影響を受けて変形・発達したことに起因すると考えられる<sup>2)</sup>。このため、河川横断構造物の局所洗掘による被災の危険性を把握するためには、洪水期間中における河道線形や構造物の影響を受けた砂州の流下特性の変化とそれに伴う深掘れの発達を明らかにすることが重要となる。

本研究では、平成19年9月洪水による二ヶ領宿河原堰の上流護床工の被災要因の一つである砂州の変形による堰直上流の深掘れの発達機構を明らかにすることを目的とする。まず、実測データにより、堰上流の砂州が経年的にどのように移動してきたのかを調べる。次に、河床変動解析により平成19年9月洪水中において二ヶ領宿河原堰の影響を受ける砂州の移動形態と、堰直上流の深掘れの発達機構について検討する。そして、河川構造物の維持管理のために、検討すべき事項について考察する。

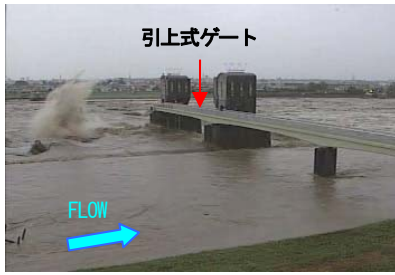


図-1 護床工被災の瞬間(平成19年9月7日6:54頃、左)と巨石護岸の流出(右)<sup>3)</sup>

表-1 石原観測所における近年の主要な観測流量

年	月	横断測量データ	航空写真	観測流量 [m <sup>3</sup> /s]
平成16年	3月	○		2337
	10月			1548
平成17年	5月		○	1646
	8月			1646
平成18年	3月	○		1034
	10月			4088
平成19年	9月			4088
	10月		○	
平成20年	2月	○		
平均年最大流量 (平成10年～平成19年)				2099

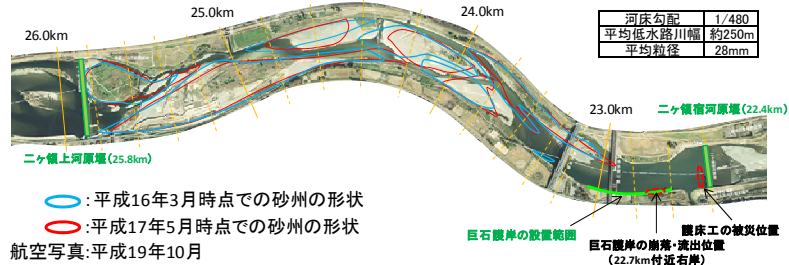


図-2 二ヶ領河原堰上流の様子と近年の砂州の移動・変形

## 2. 二ヶ領河原堰の上流部の砂州と直上流の

### 局所洗掘の経時変化

図-2は二ヶ領河原堰上流における平成16年3月、平成17年5月、平成19年10月の航空写真から作成した砂州形状の経時変化である。図-2の写真は平成19年10月である。各期間の主な洪水は表-1に示す通りである。24.8kmより上流の砂州では樹木が繁茂しており、砂州の移動や変形は見られない。一方で、24.8kmより下流の砂州は移動や変形をしている。例えば、24.6kmの左岸に形成されている砂州は平成17年5月と平成19年10月の砂州前縁線を比較することで約100m下流へ移動していることが分かる。このことから、二ヶ領河原堰上流では洪水流によって砂州が流下・変形し、堰直上流部に土砂を輸送している。

堰直上流について、横断測量データを基に検討する。

図-3は堰直上流における標高コンターを示している。被災した護床工の敷高はA.P.+17.0mである。用いたデータは平成16年3月に測量された22.45km～23.2km、平成18年3月、20年2月に測量された22.5km～23.2kmである。表-1に横断測量年月と主要な洪水を示す。護床工が被災する前の平成18年の河床は、平成16年以降の洪水により上流から輸送された土砂が堰や河道形状の影響を受け左岸側で堆積し、その高さや堆積範囲を拡大させている。右岸側では左岸側の土砂堆積に伴い、洗掘範囲は縮小しているが、洗掘深は深くなっている。その後、この深掘れは平成19年9月洪水により砂州の移動・変形に伴って流下し、堰直上流に達している。そのため、この深掘れが洪水時に移動・発達し護床工に被災を及ぼしたと考えられる。

次に二ヶ領河原堰上流を対象に河床変動解析を用いて、洪水期間中における砂州や深掘れの挙動を再現し、

護床工が被災した洪水ピーク時での堰直上流の河床形状とその形成過程について考察する。

## 3. 河床変動解析方法

平成19年9月洪水中に堰上流に流下した砂州が二ヶ領河原堰の影響を受けどのように変形し、堰直上流の深掘れを発達させたのかを河床変動解析により検討する。このような洪水中の河床高の時間変化特性を明らかにするためには、洪水による流れ場の時間変化を適切に評価する必要があることから、上下流の境界条件に観測水位を用いて河床変動解析を行う<sup>4)</sup>。また、砂州の河道湾曲、下流横断構造物による変形や水衝部における深掘れを解析するため、流れの解析には渦度方程式を用いた準三次元解析法<sup>5)6)</sup>を用いる。この解析法では、流れの加速・減速や曲がりによる流速鉛直分布の変形を静水圧分布の近似をせずに評価できる。

### (1) 流れの解析方法

水深平均流速場の基礎方程式には、一般座標系における物理成分で記述された浅水流方程式を用いる<sup>1)7)</sup>。ただし、水平応力項には、水深平均流速からの偏差流速成分の二次相関項が付加されている。流速鉛直分布は、水深平均流速、水表面と底面流速差を用いた二次曲線で表わされている。水表面と底面流速差は水深積分渦度で表し、水深積分渦度は水深積分された渦度方程式によって解かれる。詳細については、文献<sup>5)</sup>を参照されたい。本研究では、一般座標系で表示された渦度方程式(1)を用いる<sup>6)</sup>。

$$\frac{\partial Jh\Omega_i}{\partial t} + \frac{\partial h\Delta\eta(F_{i\xi} + D_{i\xi})}{\partial \xi} + \frac{\partial h\Delta\xi(F_{i\eta} + D_{i\eta})}{\partial \eta} = J(ER_{zi} + P_{oi}) \quad (1)$$

ここに、 $J$ : ヤコビアン(計算格子の面積),  $\Delta\xi, \Delta\eta$ :  $\xi, \eta$  方向の計算格子間隔,  $\Omega_i$ :  $i$ 方向の水深平均渦度,  $P_{\alpha i}$ :  $i$ 方向の水深平均渦度の生産項である. また,  $F_{i\xi}, F_{i\eta}$ :  $\xi, \eta$  方向の移流, 回転・伸縮による $i$ 方向の水深平均渦度のフラックス,  $D_{i\xi}, D_{i\eta}$ :  $\xi, \eta$ 方向の乱流拡散による $i$ 方向の水深平均渦度のフラックス,  $ER_{zi}$ :  $i$ 方向の水深平均渦度に関する鉛直方向の渦度の回転項であり, それぞれ以下のように定義される.

$$\begin{cases} F_{i\xi} = (\Omega_i U^\xi - \Omega^\xi U_i) + (\Omega_i \delta u^\xi - \Omega^\xi \delta u_i) / 6 \\ F_{i\eta} = (\Omega_i U^\eta - \Omega^\eta U_i) + (\Omega_i \delta u^\eta - \Omega^\eta \delta u_i) / 6 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} D_{i\xi} = -\frac{v_i}{\sigma_\omega} \left( \frac{\partial \Omega_i}{\partial \tilde{\xi}} - \cos \theta^{\eta\xi} \frac{\partial \Omega_i}{\partial \tilde{\eta}} \right) \\ D_{i\eta} = -\frac{v_i}{\sigma_\omega} \left( \frac{\partial \Omega_i}{\partial \tilde{\eta}} - \cos \theta^{\eta\xi} \frac{\partial \Omega_i}{\partial \tilde{\xi}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$ER_{zi} = u_{si} \omega_{s\sigma} - u_{bi} \omega_{b\sigma} \quad (4)$$

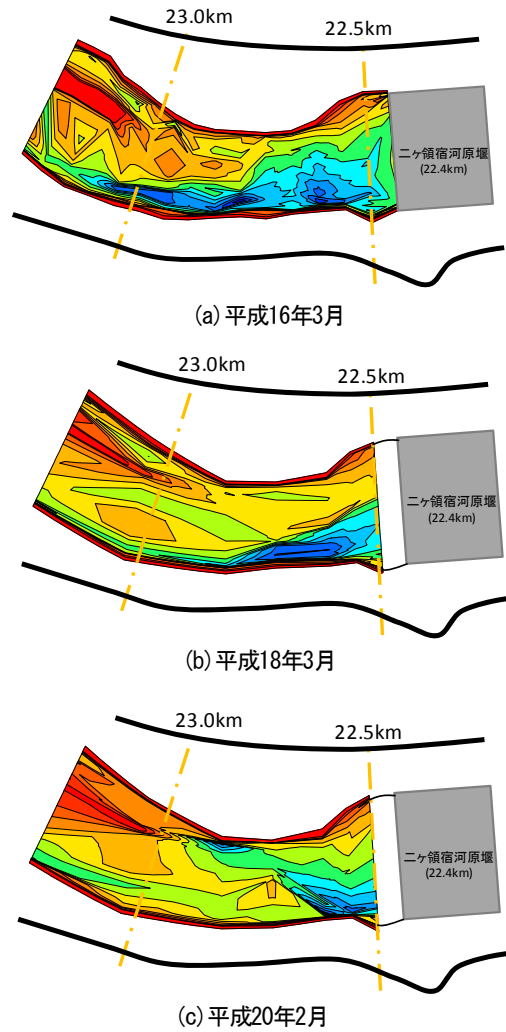
ここに、 $U^\xi, U^\eta$ :  $\xi, \eta$ 方向の水深平均流速の物理成分,  $\Omega^\xi, \Omega^\eta$ :  $\xi, \eta$ 方向の水深平均渦度の物理成分,  $\delta u_i$ :  $i$ 方向の流速の水面と河床面流速差,  $\delta u^\xi, \delta u^\eta$ : 水面と河床面流速差の $\xi, \eta$ 方向の物理成分,  $u_{si}, u_{bi}$ : 水面と河床面の $i$ 方向流速,  $\omega_{s\sigma}, \omega_{b\sigma}$ :  $u_{si}, u_{bi}$ の回転である. 一般座標系に関する諸量は渡邊・福岡ら<sup>1),7)</sup>の定義に基づいている. 渦動粘性係数 $\nu_t$ については, 乱れの輸送方程式<sup>5)</sup>を解かず, 鉛直方向流速分布による乱れの局所平衡を仮定して計算する.

## (2) 河床変動の解析方法と計算条件

河床変動解析には, 流砂の連続式, 平衡流砂量式を用いる. 平衡流砂量は, 斜面上の限界掃流力と重力による付加掃流力を考慮し<sup>8)</sup>, 芦田・道上式<sup>9)</sup>を用いて計算する. 本研究では砂州の流下・変形過程とそれに伴う洗掘の発達過程に与える河道湾曲や堰の影響を検討するため, 河床材料粒径は一様粒径とし, ニヶ領宿河原堰からニヶ領上河原堰区間における現地観測(平成17年度)より得られた平均粒径 $d_m=0.028\text{m}$ を用いる. しかし, 混合粒径の影響によって砂州の移動形態が変化することも考えられるため, この点については今後さらなる検討が必要である.

解析範囲はニヶ領上河原堰上流の28.0km~ニヶ領宿河原堰下流の20.4kmとしている. 上下流端の境界条件は洪水時に観測された25.0kmと21.6kmの水位観測値と解析の水位が一致するように与えている<sup>1),4),7)</sup>. 図-4にニヶ領宿河原堰上流の22.5kmにおける解析と実測による水位ハイドログラフと, 上流境界条件(25.0km)の解析流量とその上流に位置する27.8kmの観測流量の流量ハイドログラフを示す. 解析は, 9月6日0時~9月8日0時に行っている.

計算格子の横断方向については, 低水路を20分割, 左右の高水敷をそれぞれ10分割し, 縦断方向については, ニヶ領宿河原堰からニヶ領上河原堰区間で約10mと細か



護床工敷高 A.P.+17.0m 14 15 16 17 18 19 20 [A.P.m]

図-3 ニヶ領宿河原堰直上流の河床形状コンター

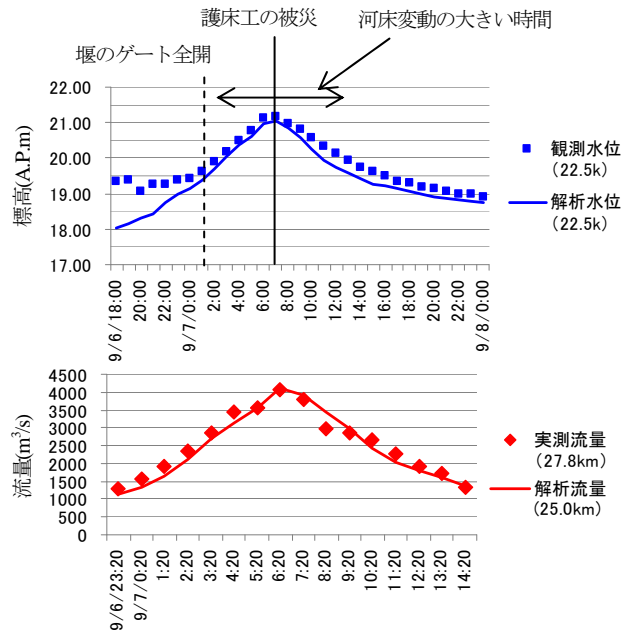
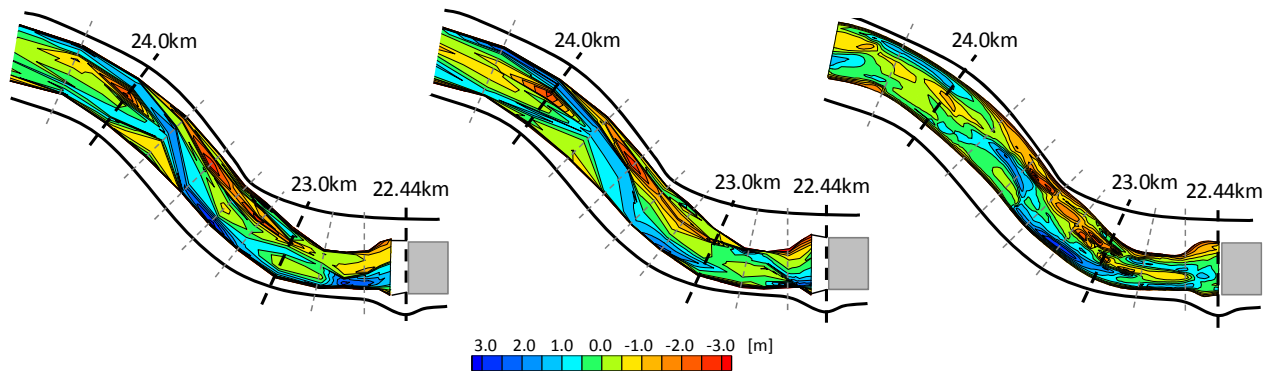


図-4 実測と解析による水位ハイドログラフ(22.5km, 上)と流量ハイドログラフ(実測27.8km, 解析25.0km, 下)



(a) 洪水前の河床形状(平成18年3月測量) (b) 洪水後の河床形状(平成20年2月測量) (c) 解析終了時の河床形状

図-5 実測と解析による河床形状の比較

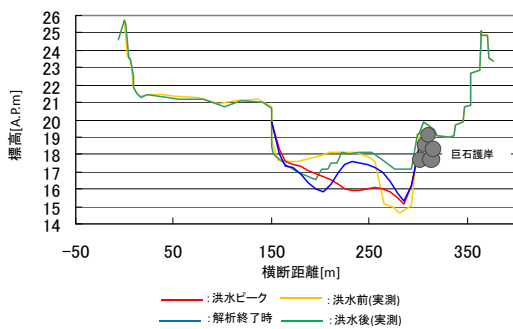


図-6 実測と解析による巨石護岸近傍の横断面形(22.7km)

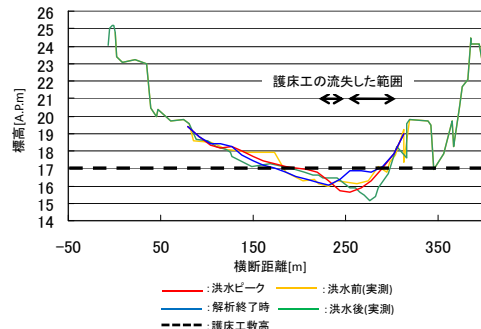


図-7 実測と解析による護床工直上流の横断面形(22.5km)

くし、その他の区間では20~50mとしている。初期河床形状には洪水前の平成18年3月の横断測量データを用いる。河川横断構造物区間(護床工、堰)では敷高を与えている。構造物区間の河床変動解析においては河床高が敷高以下にならないように各格子からの土砂の流出量を制限している。

#### 4. 解析結果と考察

##### (1) 実測と解析結果の比較

図-4に示すように二ヶ領宿河原堰直上流の22.5kmにおいて、実測による水位ハイドログラフと解析結果が洪水前から初期に合っていない。これは本解析において二ヶ領宿河原堰のゲート操作の影響を考えていないことが主な原因である。(ゲートは右岸側から引上式ゲート1門、起伏式ゲート5門で構成されており、9/6/4:00~9/7/1:00にかけて水位を調節しながらゲートを開放している。)しかし、土砂移動が開始し、河床変動が生じる時間帯には堰は全開であり、この時間帯において解析水位は実測と概ね一致している。洪水減衰期に解析水位が実測水位よりもやや低いのは、洪水ピーク付近で護床工が被災し、流出した護床工ブロックの散乱による流れの抵抗について本解析で考慮していないことが要因の1つとして考えられる。また、図-4から観測流量と解析流量は概ね再現されていることが分かる。

図-5に洪水前後の実測データ(平成18年3月、平成20年2

月)と解析終了時による低水路河床形状コンターを示す。コンターは各横断面の標高から低水路平均河床高を引いた値である。解析結果と実測を比較すると砂州や濡筋の移動が良く再現されている。例えば、洪水前の23.0km付近の低水路中央部の砂州が22.7km付近まで流下している。また、洪水前の23.8km付近の右岸に形成されていた砂州が流下し、それに伴って砂州下流の深掘れ部が23.2km付近に達している。堰直上流に着目すると左岸の砂州は概ね再現されているが、実測の22.6km右岸の洗掘部や22.8km付近の湾曲内岸から外岸にかけての洗掘部は解析終了時には見られなくなっている。

図-6は被災した巨石護岸近傍(22.7km)の横断面形状の実測値と解析値の比較である。解析結果では洪水前の低水路右岸側に形成されていた深掘れが埋め戻され、一方で低水路左岸側では深掘れが進行し、解析終了時の低水路横断形状は中央部が盛り上がった形をしている。この傾向は概ね実測結果を捉えていると言える。図-7は堰直上流(22.5km)の横断面形状の実測値と解析値の比較である。解析結果では初期形状に比べ洪水ピーク時において低水路右岸側で洗掘が発達し、減衰期で埋め戻されている。減衰期では図-4に示したように堰直上流の計算水位が実測値よりも低くなっており、これが解析終了時の河床形状が実測結果と異なった理由の1つと考えられるが、洪水期間中は低水路右岸側で洗掘が発達していることがわかる。次に、洪水期間中における二ヶ領宿河原堰直上流の砂州の変形や局所洗掘の発達について検討する。

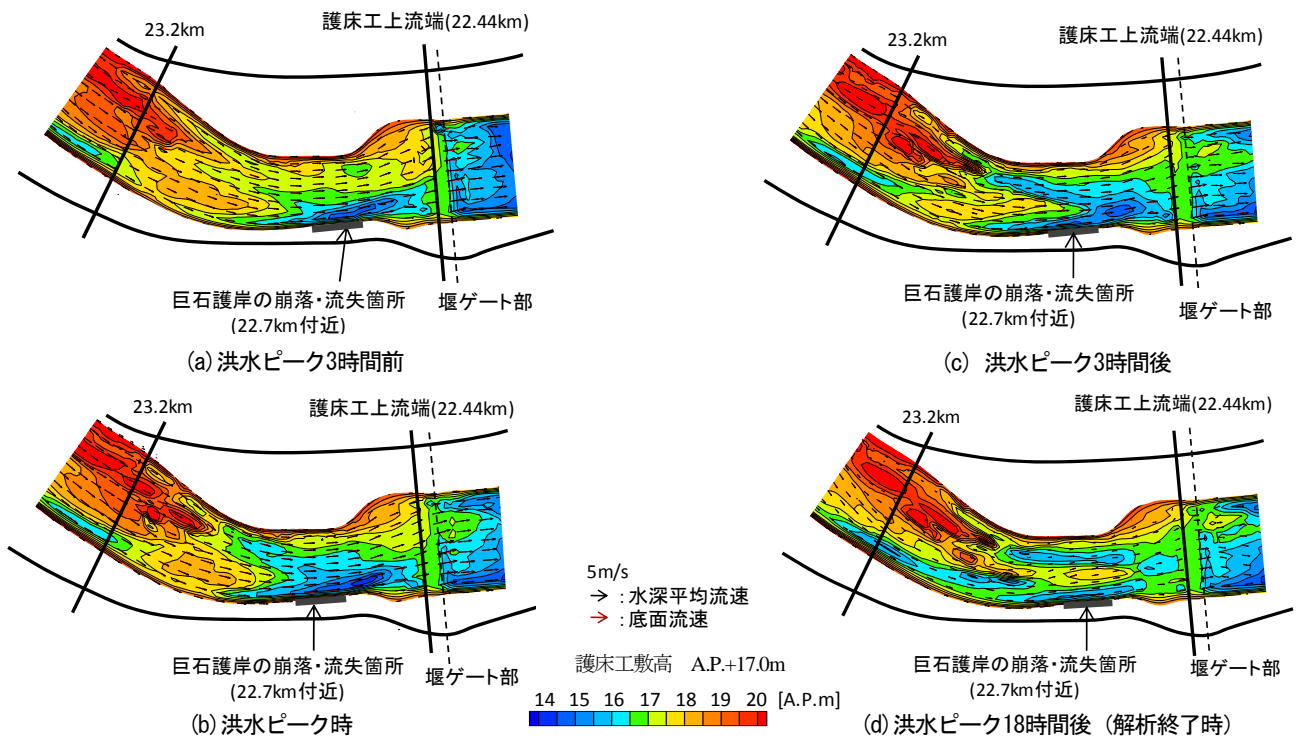


図-8 洪水期間中における河床形状の変化と水深平均、底面流速

(2) 洪水中における堰直上流の深掘れの発達

図-8に洪水期間中における河床高、水深平均流速、底面流速を示す。護床工敷高はA.P. +17.0mである。図-9に洪水期間中における堰直上流の砂州の体積量(22.45～22.6km, 橙実線)と堰直上流の22.5km(青実線), 巨石護岸の被災個所の周辺(22.6～22.8km, 緑破線)における最深河床高の経時変化を示す。図-8より堰直上流の左岸側では河道の湾曲と堰の影響を受け固定砂州が22.45km～26.0kmで形成されている。本研究では、この縦断区間において護床工敷高以上を砂州とした。

図-9の解析終了時と洪水後の実測結果を比較すると、22.5kmの最深河床高は前述のように洪水後の埋め戻しによって解析結果が実測結果よりも高くなっているが洪水期間中は洗掘が発達している。巨石護岸周辺においては、両者に差はあるものの、洪水後に最深河床高が高くなる傾向は捉えている。堰直上流左岸の体積量については概ね洪水後の実測結果を再現している。体積量は洪水ピーク4時間前で最大値となっており、その後、急激に減少している。低水路内で砂州の領域が広がると洗掘部が小さくなり、流れが集中しやすくなると考えられる。図-8の洪水期間中の砂州の領域に着目すると、図-3に示す洪水前の大きな砂州領域が、洪水ピーク付近まで維持されている。これは堰上流に形成されている砂州が洪水中に流下し、堰直上流の固定砂州に土砂を供給するためと考えられる。また、洪水ピーク付近で砂州の体積量は減少しているが、砂州領域は小さくなっておらず、洗掘部では流れが集中しやすい状態であったと考えられる。即ち、洪水期間中に上流から流下してくる砂州の影響を受け、

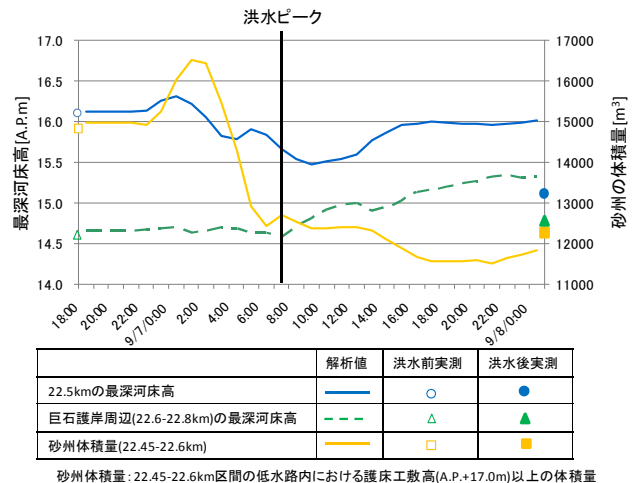


図-9 堰直上流の土砂体積量と護床工上流、巨石護岸周辺の最深河床高の時間変化

堰直上流の左岸側の砂州の発達に伴って右岸側で洗掘が発達したと考えられる。図-9に示すように本解析の結果では、22.5kmの最深河床高は洪水ピーク2時間後で最も発達しており、巨石護岸周辺では初期の洗掘深さが洪水ピークまで維持されている。一方、堰直上流左岸の砂州が流下することによって堰ゲートの下流部では、洪水ピーク付近から左岸側で土砂が堆積している。洪水後の観測においてもこの土砂堆積は確認されている<sup>3)</sup>。

図-10に洪水ピーク時と22.5kmで最も洗掘された時(洪水ピーク2時間後)の底面流速のコンターを示す。底面流速は洪水ピーク時の方が大きく、護床工の直上流では最大値が3.9m/sである。さらに、巨石護岸が崩落した22.7km周辺では護床工の直上流よりも大きく4.4 m/sの流速が

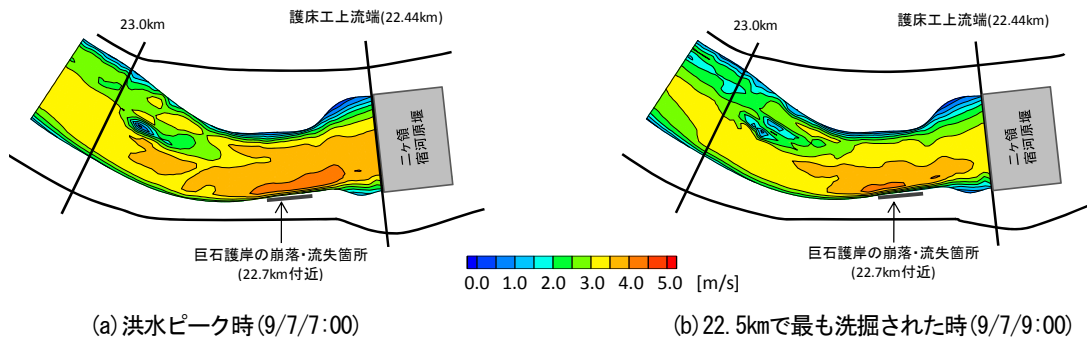


図-10 洪水時の底面流速分布

計算されている。そのため、護床工や巨石護岸に及ぼす外力は洪水ピーク時に最も大きかったことが考えられる。

### (3) 河川構造物の維持管理における考察

河川横断構造物上流では河道特性に応じて洗掘の発達過程が異なると考えられる。砂州河道である二ヶ領宿河原堰直上流では河道形状や堰の影響により右岸側で局所洗掘が発達し易い。このような河道特性や構造物周辺の深掘れの危険性を把握するために、構造物周辺で密に測量を行い、経時的に河床形状を監視し、問題があれば解決策を検討する必要がある。洗掘深やその発生位置は変形する砂州の影響を受けて洪水期間中に変化するため、これを予測することが重要となるが、洪水前後の実測データでは必ずしも十分把握できない。このためには、洪水流の非定常性を考慮した河床変動解析が有効である。本論文で示したように、湾曲部や水衝部の流れや河床変動を表現できる解析モデルと実測洪水を再現するために観測水面形時系列データを用いることによって、洪水期間中に生じた河床変動はかなりの程度説明できる。このように、河川構造物周辺で洪水期間中における河床変動の特性を把握し、被災の危険性を予測するために、出水前後の測量、洪水観測、数値解析を組み合わせることで、局所洗掘による構造物の被災を事前に予防するために重要である。

## 5. 結論

本研究では、平成19年9月洪水による二ヶ領宿河原堰の直上流の深掘れの発達機構を実測データと河床変動解析により検討した。得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 渦度方程式を用いた準三次元解析法と観測水面形時系列データを用いた河床変動解析結果は、河道線形と河川横断構造物による砂州の流下特性と局所洗掘を説明でき、洪水前後の実測データを概ね再現した。
- 2) 堰直上流の左岸側では河道形状や堰の影響を受け砂州が形成、発達し、それに伴って右岸側では洗掘深が

増大する。解析結果から、洪水ピーク付近まで砂州の領域が維持され、洗掘が発生した。一方、堰上流の護床工部において、河床近傍流速の最大値は洪水ピーク時に3.9m/sに達した。そのため、洗掘深と底面流速の増大が護床工の被災を生じさせたと考えられる。

- 3) 砂州河道に設置されている河川構造物の維持管理においては、河床形状を測量し、常に把握、監視することが重要である。洪水期間中における砂州や洗掘の移動・発達は、湾曲部、水衝部の流れや河床変動を表現できる解析モデルと観測水面形時系列データを用いて検討することが、局所洗掘による構造物の被災を事前に予防するために重要である。

### 参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版社，2005。
- 2) 忠津哲也，鈴木研司，内田龍彦，福岡捷二：洪水流による土丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗掘深の増大について，河川技術論文集，第15巻，pp.249-254，2009。
- 3) 第12回多摩川水系河道計画検討委員会資料，国土交通省京浜河川事務所，2007。
- 4) 川口広司，藤堂正樹，福岡捷二：水面形時系列データに基づく交互砂州平均河床高の時間変化及び流量ハイドログラフの解析，水工学論文集，第53巻，pp.751-756，2009。
- 5) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用，水工学論文集，第53巻，pp.1081-1086，2009。
- 6) 岡村誠司，内田龍彦，福岡捷二：一般座標系における渦度方程式を用いた準三次元解析，第36回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，II-1，2009。
- 7) 渡邊明英，福岡捷二，Alex Gorge Mutasingwa，太田勝：複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道貯留の非定常二次元解析，水工学論文集，第46巻，pp.427-432，2002。
- 8) 福岡捷二，山坂昌成：直線流路の交互砂州，第27回水理講演会論文集，pp.703-708，1983。
- 9) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972。

(2009. 9. 30受付)