

砂礫床河川に設置された人工わんど周辺の河床変動

BED DEFORMATION AROUND AN ARTIFICIAL EMBAYMENT IN A FLUVIAL RIVER

富永 晃宏*・榊 卓也**

Akihiro TOMINAGA and Takuya SAKAKI

*正会員 工博 名古屋工業大学院教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

The mechanism of bed deformation around an embayment was investigated in a straight fluvial river. The embayment makes abrupt expansion of width and then it causes sand deposition of the bed load material. A large sand bar was generated behind a deflector by repeated flood events. The transition process of bed configuration was observed and velocity distribution was measured in the river with deformed bed configuration. The effects of a deflector on the flow structure and sediment transport were investigated experimentally. A deflector placed at the upstream point near the embayment entrance line caused strong deflecting flow into the embayment and generated a wide range of deposition behind the deflector. A numerical simulation was performed to examine the sediment transport mechanism. The features were well predicted by the depth-averaged k- ϵ model.

Key Words : *artificial embayment, field measurement sediment transport, bed deformation,*

1. 序論

近年、治水対策により直線的で単調な流れとなった都市河川に、河道の多様性や生物生息環境を創出しようとする多自然川づくりが実施されている。わんどもその一つであり、流速低下の効果があることから、稚魚の生育場所や出水時における魚類の避難場所としての効果が期待されている。その反面、わんど内の水質の悪化や浮遊砂によるわんどの埋没といった問題があり、わんど内の渦構造や主流域と死水域の水交換に焦点が当てられてきた。これまでに水制群による死水域内及び主流域との境界における流れ構造に関して様々な実験的研究が行われてきた^{1), 2), 3), 4)}。一方、側岸の凹部としてのわんどを有する開水路における流れ構造と水交換についての実験的研究が行われている^{5), 6), 7), 8)}。また、側岸に凹部を有する流れ構造に関する数値的研究が行われている^{9), 10), 11)}。

一般にわんどにおいては浮遊砂の堆積が問題となるが、掃流砂輸送が活発な河川においてわんどを施工した場合は、拡幅による流速低下により掃流砂がわんどに堆積し閉塞することが懸念される。この場合は浮遊砂堆積に関わる流れ構造とは異なるメカニズムに支配されていると考えられる。しかし、この問題についてはあまり研究されておらず、現地データも少ない。ち

ょうど愛知県の矢田川では高水敷を掘削して人工わんどが新たに建設されたばかりであり、建設後わんど開口部付近に大規模な砂礫の堆積が発生した。そこで、本研究では、矢田川の人工わんど周辺の河床変動の様子や河床材料の変化、流れ構造を現地観測により調査した。また、現地観測により明らかになった問題を詳細に検討するため、現地形状を再現した実験および数値計算を実施し、わんどにおける掃流砂問題について検討した。また、ここではわんど開口部に置き石工が設置されており、これが土砂輸送に及ぼす効果についても検討した。

2. 現地観測

2.1 現地観測場所の概要

現地観測は名古屋市内を流れる矢田川に2008年3月に施工された人工わんど周辺で実施した。設置箇所はほぼ直線区間であり、低水路の右岸高水敷を掘削して、図-1に示すような形状のわんどを施工した。観測は流れ方向160m 区間、河道横断方向65m 区間を対象とした。施工された人工わんどの側岸は傾斜を有しており、低水時は開口部100m、奥行き25m、高水時は開口部140m、奥行き35mの台形型である。また、 $x=65m$ 、 $y=45m$ には、わんど内に流れを呼び込むために、長さ10m、幅

5m, 高さ0.8m の碎石を用いた透過性ひし形置石工が設置されている。低水路の幅は約30m, 平均河床勾配は1/800である。現地調査として、河床形状、河床材料粒径分布および流速の計測を行った。河床形状の調査は、2008年7月16, 17日, 9月16, 17日, 11月6日および2009年4月28日に実施し、トータルステーションを用いて流れ方向10m, 河道横断方向3m 間隔で河床形状の測量を行った。河床材料については、2008年8月, 11月および2009年4月に図-1中の番号の地点において、河床表面から10cm 程度までを採取し、ふるい分け試験により粒径分布を調べた。

河床形状の観測の間には何回かの出水があった。観測地点から約1.5km 上流の瀬古観測所の水位記録を図-2に示す。国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所の水位・流量曲線によれば、1.8m で流量が約50m³/s であり、これ以上の出水は2008年3月から7月の第1回観測前までに12回あった。8月末には水位4.37m の大規模な出水があり、これは流量627m³/s に相当し、高水敷高さ2.8m を大きく越える出水であった。

2.2 河床変動と河床材料

図-3に4回の河床高計測結果を示す。2008年7月期の河床形状はわんど開口部中央に砂州が広がっている状態である。これに至るまでの経緯は計測を行っていないが、写真による観測から判断すると、まず菱形置き石工の後方に堆積が発生し、これがしだいに下流側およびわんど側へ発達していった経緯が認められる。7月の河床形状の形成には、河道の急拡による影響とともに、置き石工の影響が大きいものと推測される。平水時に水面に出る砂州形状は、平水時の水深を考慮し、図では河床高が1.0m 以上とみなせる。わんど開口部の上流側は瀬になっており、下流域は淵を形成している。9月期では、8月末の大規模な出水により7月に観測されたわんど開口部の瀬に土砂がさらに堆積した。その結果、右岸と砂州がつながり、わんど開口部の上流側が閉塞した。この閉塞に伴い左岸側の上, 中流での河床が低下し、淵が創出されている。11月期では、9月期からの大きな変化は見られないが、若干の砂州の拡大が確認された。2009年4月期では上流部左岸で河床が浅く

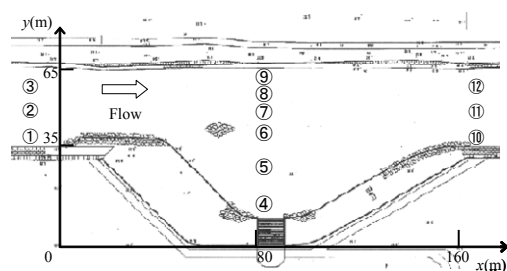


図-1 矢田川わんどの平面図

なっている。砂州については、全体的にわんど方向に移動しており、わんど領域が狭くなっている。図-4に河床高計測結果をもとに概算した高さ-2m 以上の砂州域の体積の時系列変化を示す。堆積量は施工後から9月までは急な増加を示し、ここから翌年4月までは緩やかな増加を示している。図-2からもわかるように、9

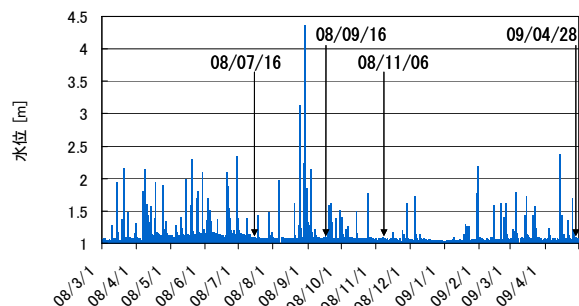
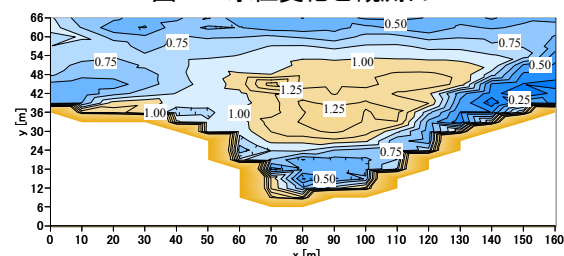
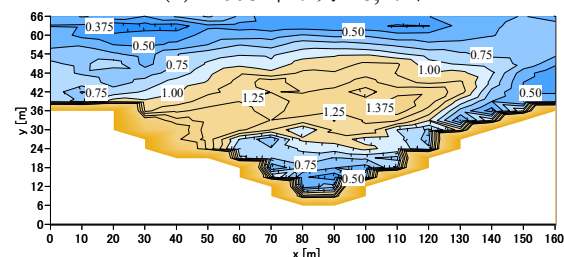


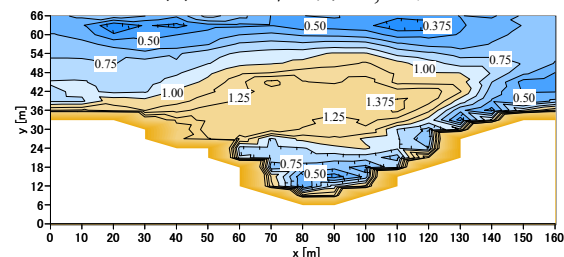
図-2 水位変化と観測日



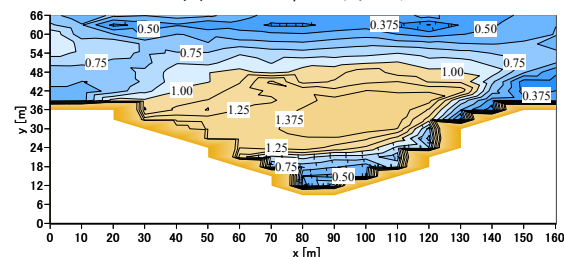
(a) 2008年7月16,17日



(b) 2008年9月16,17日



(c) 2008年11月6日



(d) 2009年4月28日

図-3 河床形状の変化

月までは比較的大きな出水が頻繁に発生しており、出水の度に堆積量が増加してきたと考えられる。8月末には高水敷を越える大規模出水があり、9月の計測では大きく増加し、特にわんどの上流部での堆積が顕著であった。その後4月までは出水頻度が小さくなったため増加速度は小さくなっているものの、出水によって堆積量は増加し続けていることがわかる。この段階では砂州高さの増大とわんど側への延伸がみられる。

8月と11月における河床材料の粒径分布の計測結果を図-5に示す。ふるい分け試験は最大15mm までしか行っていないが、最大粒径は3~5cm 程度の礫であった。8月の粒度分布は左岸側の No.3, 8, 12において礫分が多く、1mm 以下の砂分がほとんどない。一方、河道中央部のわんど域上流および下流の No.2, 11では1mm 以下の砂分が大半を占めている。右岸側線上の No.1, 10および砂州中央の No.6では粒径が細砂から礫まで広い範囲にわたって分布している。No.4のわんど内では0.2mm 以下の細砂からシルト分がほとんどを占めており、ここでは浮遊砂の堆積が顕著であることがわかる。11月の粒度分布では8月ほど明確な場所的な分布の違いは見られなくなった。左岸側のわんど中央から下流側の No.8, 12においては流水の集中の結果5mm 以下の砂が減少し礫分の割合が増加している。右岸側線上と砂州中央および砂州下流の No.11については8月と大きな差はなかった。わんど上流の No.2については8月よりも砂分の割合が減少したが、これは上流域の変化によるものである。また、わんど奥の No.4においては8月から変化し、表面に砂が堆積したと考えられる。

2.3 流速計測

流速計測は2008年7月16日、11月5,6日に超音波ドップラー流速計 (Nortek 社製 ADV) を用いて行った。計測条件はサンプリング周波数20Hz、サンプリング数4096で205秒間計測している。7月の計測では、鉛直方向には、1点法または2点法により平均流速を求めた。計測された流速ベクトルを図-6に示す。7月期はわんど上流部が閉塞していないことから、流れは砂州を回り込むように流れている。わんどの上流部は平瀬状で右岸から左岸の深場へ曲がりながら流れている。わんど入りの右岸側は早瀬となりわんど内へ流れているが、わんどの下流では水深が深く流速が低下している。

11月には掃流砂輸送と数値計算における摩擦速度と粗度の算定を目的として $x=0, 80, 160\text{m}$ において横断方向に約5箇所鉛直分布を詳細に計測した。摩擦速度の算定方法として、対数則分布、レイノルズ応力分布、乱れ強度の普遍分布を用いて算定した¹²⁾。それぞれの方法による摩擦速度 u_* , u_{*t} , u_{*r} は次式で表される。

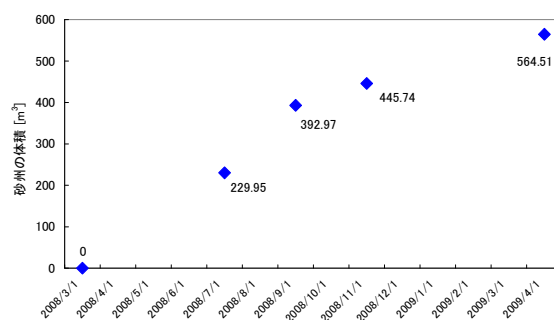
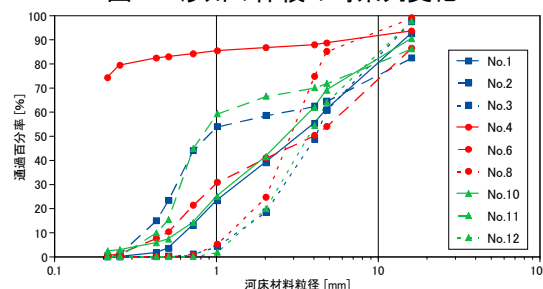
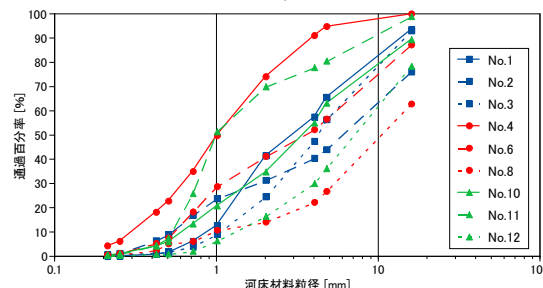


図-4 砂州の体積の時系列変化

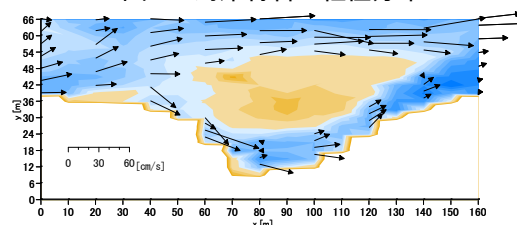


(a) 2008年8月11日



(b) 2008年11月13日

図-5 河床材料の粒径分布



$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} + 8.5 \quad (1)$$

$$-\overline{uw} = u_{*t}^2 \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (2)$$

$$\frac{u'}{u_{*r}} = 2.3 \exp \left(-\frac{z}{h} \right) \quad (3)$$

表-1に摩擦速度の算定例を示す。表には対数則より得られた摩擦速度を用いて次式から計算されたマニングの粗度係数を示している。

$$n = \frac{h^{1/6}}{\sqrt{g}} \left(\frac{u_*}{u} \right) \quad (4)$$

3通りの方法による摩擦速度の算定結果はほぼ一致しており、算定値は妥当な値であると考えられる¹³⁾。また、対数則より算定した $x=80\text{m}$ での摩擦速度の平均値は $u_* = 3.25\text{cm/s}$ であり、この摩擦速度で流される砂の

表-1 摩擦速度の算定例

x [m]	0	0	80	160	160
y [m]	40.4	55.4	59.2	45.3	60.3
u_* [cm/s]	2.55	3.07	4.21	0.91	3.01
u_{*i} [cm/s]	2.43	3.02	2.94	0.95	2.34
u_{*r} [cm/s]	2.98	3.21	4.11	1.47	3.04
d_{50} [mm]	3.07	4.22	11.94	3.51	8.41
u_{*c} [cm/s]	4.98	7.44	9.83	2.26	8.25
n	0.041	0.041	0.040	0.029	0.032

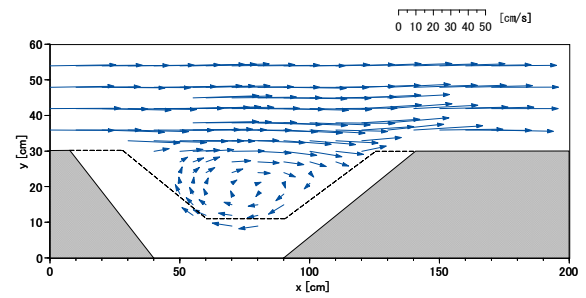
粒径は岩垣の式より $d=1.60\text{mm}$ 以下と推定される。ここで11月の河床材料の粒度分布 (No.7, 8, 9) より、中流で $d=1.60\text{mm}$ 以下の粒径の割合が10~20%である。この $d=1.60\text{mm}$ 以下の砂は平水時にも下流の砂州後方に流され、この地点での摩擦速度が $u_*=0.91\text{cm/s}$ で移動限界粒径が $d=0.69\text{mm}$ と推定されることから、砂州後方には中流で流出した砂が堆積すると考えられる。砂州後方の粒度分布 (No.11) では、 $d=1.60\text{mm}$ 以下の砂の割合が約65%である。以上より、摩擦速度の値の信頼性は高いと考えられる。

3. 出水時の流れ構造に関する実験

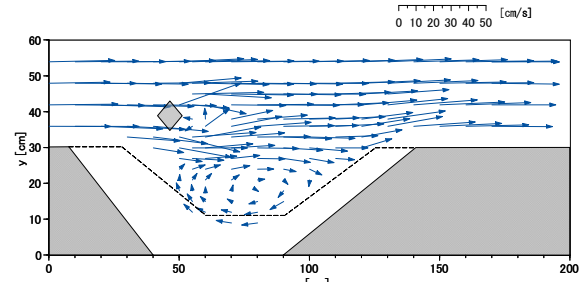
出水時に河床変動が発生すると考えられるが、出水時の現地観測は非常に困難であるため、実験により出水が河床に与える影響について検討した。また砂州の形成に影響を与えたと考えられるひし型置石工の効果についても検討した。実験には全長13m、幅0.6m、高さ0.3mの水路を使用し、フルードの相似則に従い現地形状を再現した歪み模型を作成した。歪み模型の縮尺は水平縮尺1/117、鉛直縮尺1/36である。水路の河床は平坦固定床とし、河床勾配は1/800である。置石工は、長さ10cm、幅8cm、高さ4cmの不透過ひし型柱模型を用い、 $x=45\text{cm}$ 、 $y=38\text{cm}$ に設置した。流量は $Q=0.006\text{m}^3/\text{s}$ 、水深は $h=5.5\text{cm}$ とし、この水理条件は現地河川で低水路満水となる $Q=150\text{m}^3/\text{s}$ 、 $h=2.0\text{m}$ を想定している。

図-7に $z=1.0\text{cm}$ における流速ベクトルを示す。置石工を設置していない場合は、主流部からわんど内に流入する流れは下流部のみで確認される。わんど内では主流部に対する流速の低下、および再循環渦の発生が確認される。またわんど下流部と主流部の境界では、わんどに向かう流れが主流側に方向を変えたとともに、河道幅の減少に伴い加速される。一方、置石工を設置した場合は、置石工の影響により流れが分断され、わんど内に流れが流入している。これに伴ってわんど内では横断方向の幅が縮小した再循環渦が形成されている。また、置石工の背後では流速の低下や置石工の後方に入り込む流れが確認される。

次に、図-8に無次元底面せん断応力 $\tau_{bx}/\overline{\tau_{bx}}$ の分布を

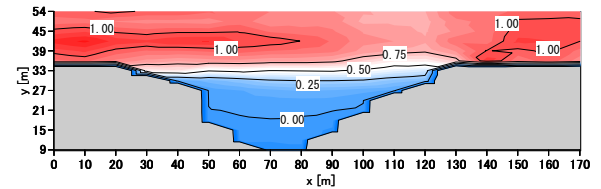


(a) 置石工なし

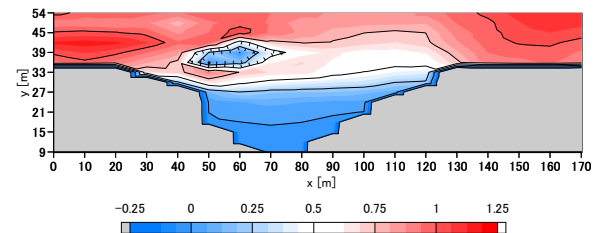


(b) 置石工あり

図-7 流速ベクトル (実験)



(a) 置石工なし



(b) 置石工あり

図-8 無次元底面せん断応力分布

示す。 $\overline{\tau_{bx}}$ は $x=0\text{cm}$ における τ_{bx} の平均値である。底面せん断応力は $z=1.0\text{cm}$ の流速 u_b 、 v_b を用いて次式より推定した。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho C_f}{2} u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (5)$$

ここに、 C_f は摩擦損失係数であり、次式で与えられる。

$$C_f = \frac{2gn^2}{\sqrt[3]{h}} \quad (6)$$

置き石工がない場合、低水路内の底面せん断応力はわんど域の後半部で減少し、下流域で再び増加している。横断方向にはわんど内に向かって急激に減少するため、わんど境界に沿っての掃流力の乱れによる拡散的な掃流砂堆積が予想される。置き石工がある場合、低水路では置き石工から下流のわんど部全体にわたって底面せん断応力が大きく減少している。また、置き石工前面からわんど内へ向かって比較的大きな値が発生して

いる。掃流砂移動が置き石工を回るような流れに沿って移動すると考えると、置き石工下流側およびわんど内にまで掃流砂が堆積しやすいといえる。さらによく見ると、置き石工の前面の右岸よりでは底面せん断応力の低下が見られ、ここにも堆積の傾向が認められる。以上のことは、実際に置き石工の背後の砂州の形成やわんど上流入口付近の早瀬の生成と関係付けられる。

4. 数値計算

出水時の流れが河床に与える影響を数値計算により検討した。数値計算の基礎方程式には水深平均の平面2次元開水路流れの運動方程式および連続式を用いた。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \quad (7)$$

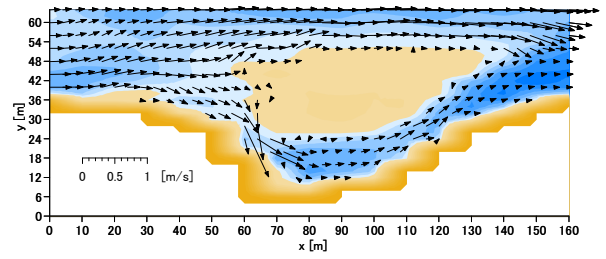
$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

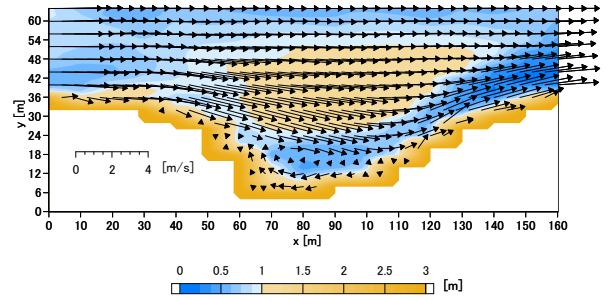
ここに、 τ_{bx} 、 τ_{by} は各方向の底面せん断応力で Manning 式で与えられ、 τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} はレイノルズ応力であり、渦動粘性モデルで与えられる¹⁴⁾。乱流モデルには Rodi らによる水深平均の k-ε モデルを使用した¹⁵⁾。底面摩擦係数については式(6)を用い、Manning の粗度係数としては現地計測の平均値である $n=0.034$ を与えた。まず、平水時において数値モデルの妥当性の検証を行うこととし、観測より得られた7月の河床形状を用いて、流量 $Q=2.4\text{m}^3/\text{s}$ 、下流端水深 $h_0=0.75\text{m}$ として計算を行った。次に、低水路が満水となる出水を想定した計算条件として、流量 $Q=150\text{m}^3/\text{s}$ 、下流端水深 $h_0=2.0\text{m}$ とした。図-9に両ケースの数値計算結果の流速ベクトルを示す。わんど上流入口の早瀬上の流れが過大評価となっているものの、全体としては良好な再現性を示している。

平水時では、観測で確認されたわんど内での流速低下や高速域が上流部右岸から中流部左岸に遷移していく流れが再現されている。一方、出水時は砂州上にも流れが見られ、砂州前半部の流れはわんどに向かう流れ構造になっている。そのため、渦の発生領域はわんど奥部に限られる。また砂州後半部の流れはわんど下流側壁に沿って主流側へ向かい加速されている。

次に、式(5)、(6)より計算された底面せん断応力 τ_{bx} の計算結果を図-10に示す。上流域の右岸では、水深が浅い領域が広がっており τ_{bx} の値が大きく、わんど内へ張り出す形で減少している。わんど内および砂州後半部では小さな値となり、下流出口に沿って再び増大している。計算領域の河床材料の平均粒径は 3.30mm で、限界掃流力 τ_c は岩垣の式より 2.67N/m^2 あることから、河床変動はほぼ全域で発生すると考えられる。上流域



(a) 平水時 ($Q=2.4\text{m}^3/\text{s}$)



(b) 出水時 ($Q=150\text{m}^3/\text{s}$)

図-9 流速ベクトル (数値計算)

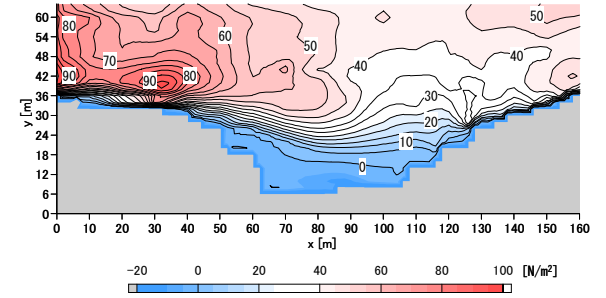


図-10 出水時の底面せん断応力分布 τ_{bx}

で流出した掃流砂が、砂州の右岸側外縁に沿ってわんど側へ輸送され、わんど内で発生している渦構造により堆積すると考えられる。

次に、7月の河床形状を初期条件として2次元河床変動計算を行った。計算には流砂の連続式および流砂量式として Meyer-peter・Müller の式を用いた。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{s}gd^3} = 8(\tau_*' - \tau_{*c})^{1.5} \quad (11)$$

$$q_{Bx} = \frac{U}{\sqrt{U^2 + V^2}} q_B, \quad q_{By} = \frac{V}{\sqrt{U^2 + V^2}} q_B \quad (12)$$

ここに、 q_B は主方向の単位幅流砂量、 q_{Bx} と q_{By} はその x 方向および y 方向成分、 λ は空隙率、 s は砂の水比重、 d は砂の粒径、 τ_*' は有効底面せん断応力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力である。今回の計算では二次流の効果や河床勾配の効果は考慮せず、流砂輸送方向を流速ベクトルの方向と一致させた。出水時の流れの計算と同様の条件で2時間および4時間経過後の河床形状計算結果を図-11に示す。9月の観測で得られた河床形状

と同じように、わんど上流部における砂の堆積が現れ、砂州と右岸がつながり、わんど側へ堆積が進行する過程が再現される。置き石工を配置した場合の初期の砂州形成過程については置き石工の計算条件設定等の問題から数値予測が困難であったため、今後の課題としたい。

5. 結論

本研究では、矢田川に設置された人工わんどにおける現地観測と、実験、数値計算による検討から、直線河道のわんどにおける掃流砂の挙動について検討した。現地観測から、わんど内やひし型置き石工の後方に砂が大規模に堆積する過程が明らかにされた。掃流砂の堆積量については、出水の頻度および規模が関係していることが認められた。

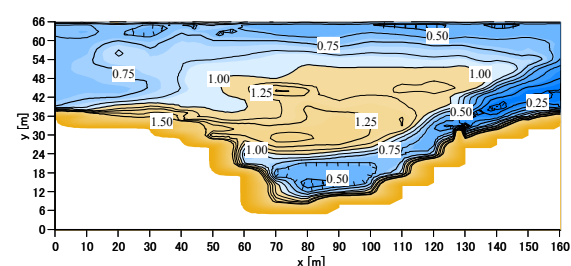
実験では掃流砂が移動すると考えられる出水時の影響を検討した結果、置き石工周辺の底面での流れ構造と無次元底面せん断応力分布より、置き石工の設置が砂州形成に大きな影響を与えたと推測された。

数値計算に関しては、砂州堆積後の形状の上に出水を想定した流れの計算を行い、砂州を乗り越える流れと底面せん断応力分布が詳細に得られ、河床変動計算では、わんど上流部における砂の堆積および砂州と右岸の連結によるわんどの閉塞を再現することができた。

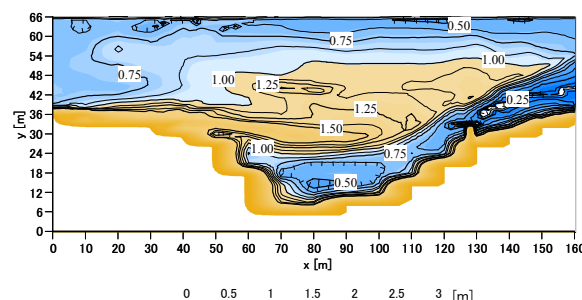
以上より、掃流砂輸送が活発な河川においては、拡幅部による流速低下によって、砂州の形成やわんどの開口部の閉塞、さらにはわんどそのものの埋没といった問題が発生することが示された。また、置き石工のような流れを誘導する構造物の設置が河床変動に与える影響は大きく、慎重な計画が必要であることがわかった。こうした構造物をわんどの形状維持に用いるためには、さらに掃流砂の挙動の解明およびわんど形状や置き石工の設置位置について検討する必要がある。

参考文献

- 1) Uijtewaalt, W. S. J., Lehmann, D. and van Mazijk, A. Exchange process between a river and its groyne fields model experiments, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 127(11), pp.928-936, 2001.
- 2) Yossef, M. F. M. and Vriend, H. J., Mobile-bed experiments on the exchange of sediment between main channel and groin fields, River Flow 2004, Balkema, vol. 1, pp.127-133, 2004.
- 3) Tominaga, A. and Jong, J. Flow structures and sediment deposition in concavity zones of compound open channels, Proceedings of 31th IAHR Congress, C05-7, CD-ROM, 2005
- 4) Weitbrecht, V., Socolofsky, S. A. and Jirka, G. H., Experiments on mass exchange between groin fields and main stream in rivers, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 134(2), pp.173-183, 2007.



(a) $t=2\text{hr}$ における河床高



(b) $t=4\text{hr}$ における河床高

図-11 河床変動数値計算結果

- 5) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介: 開水路わんどモデル内の乱流特性と組織渦, 土木学会論文集 II, 第684巻, II-56号, pp.11-20, 2001.
- 6) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 志和孝: 開水路側壁凹部流れの水面・流速変動特性と開口部形状の効果, 土木学会論文集 II, 712巻, II-60号, pp.1-10, 2002.
- 7) 富永晃宏, 久田陽史: 人工わんどの水交換機構に与えるわんど形状と植生の影響に関する研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.517-522, 2003.
- 8) 富永晃宏, 北村福太郎: わんどの水交換に及ぼす連絡水路形状の影響, 水工学論文集, 第51巻, pp.727-732, 2007.
- 9) Kimura, I. and Hosoda, T., Fundamental properties of flows in open channels with dead zone, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2): 322-347, 1997.
- 10) Hinterberger, C., Fröhlich and Rodi W., Three-dimensional and depth-averaged large eddy simulations of some shallow water flows, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 133(8), pp.857-872, 2007.
- 11) McCoy, A., Constantinescu, G. and Weber L. W., Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes, J. Hydraulic Engineering, ASCE, 134(2), pp.157-172, 2008.
- 12) 富永晃宏, 金田雪雄, 神谷昌文: 河川湾曲部における3次元乱流構造の現地計測と底面せん断応力の評価方法, 水工学論文集, 第38巻, pp.727-732, 1994.
- 13) 富永晃宏, 榊卓也: 川幅急変部を有する砂礫床河川における乱流計測と摩擦速度の評価, 応用力学論文集, Vol.12, pp.673-680, 2009.
- 14) Tominaga, A., Jong, J. and Sakaki, T., Sediment Transport around an Artificial Embayment in a Straight Fluvial River, Proc. of 33rd IAHR Congress, Vancouver, CD-ROM, 2009.
- 15) Rodi, W., Pavlovic, R.N. and Srivatsa, S.K., Prediction of flow and pollutant spreading in rivers, Transport Models for Inland and Coastal Waters, Academic press, pp.63-111, 1981.

(2009. 9. 30受付)