

**1. はじめに** 近年、河岸に存在するワンドは河川利用を目的とした場を提供したり、水生生物の生息域として保全されたりすることから、人工的につくる取り組みがなされている。しかし、その目的からして、どのような流量に対してもワンド内では流速が小さく、堆積が発生する宿命である。特に出水時には、土砂堆積によってワンドが埋没し機能を失うという問題が起こる。矢田川に施工された人工ワンドと福井の足羽川に施工された人工ワンドの例を列挙する。前者は度々の出水により、掃流砂の堆積が進行し、最終的に閉塞に至った。後者は、主に浮遊砂としてシルト、粘土などの粒径の細かい土砂が堆積し、閉塞に至っている。このような事例から、河岸凹部での土砂堆積は、浮遊砂、掃流砂の両者の影響に依るものであることが分かる。そこで本研究では、一般的な土砂堆積軽減策として、粒径の異なる珪砂を用いて、それぞれ、掃流砂、浮遊砂が卓越する条件で行う。さらに土砂堆積対策案としてワンド内に引き込み流を起こせるよう本川に水制を設置し、水制がワンドの流れ構造と土砂堆積に与える影響を検討する。

**2. 実験条件** 実験水路は長さ 6m、幅 30cm、勾配 1/1000 のアクリル製長方形断面水路を用いた。水路左岸に幅 10.0cm、高さ 7.5cm の塩ビ板を設置し、上流から 3m の位置に開口部長さ 30cm、上流 45 度、下流 45 度、奥行 10cm の台形型開放区を設け、ワンド域とした。水深は 4.5cm となるよう流量および下流の堰で調節した。実験条件については表-1 に示す。

また図-1 に水制設置図を示す。水制モデルのスケールは、長さ  $l$  を 2cm、3cm と変化させ、幅は 1cm として実験を行った。水制距離  $a$  に関しては、ワンド開口部上流端から 3cm、4cm、5cm となるよう設置した。表-2 に実験ケースを示す。ケースの命名については、I2 a3 45 に関して例を挙げると、水制長 2cm、水制距離 3cm、水制角度 45 度のケースを指す。土砂堆積実験では、浮遊砂・掃流砂混在となる平均粒径 0.03cm (8号砂)、掃流砂主体となる 0.13cm (6号砂) の珪砂を用い、貯水槽に 250l の水と 6kg の砂を入れ攪拌した状態でポンプにより 2 時間循環させた。堆積過程を 30 秒のインターバル撮影における写真、堆積形状をレーザー変位計により計測し、さらにワンド内の流砂堆積量を測定した。

**3. 電磁流速計と数値計算** 数値解析と電磁流速計による実験値を比較し精度を検証する。電磁流速計による流速計測として、2 成分電磁流速計 (東京計測器) を使用し、底面から 1.5cm の 1 断面を計測した。サン

表-1 実験条件

	$Q$ (l/s)	$h$ (cm)	$B$ (cm)	$U_m$ (cm/s)	$U^*c$ (cm/s)	$Fr$	$I$
8号砂	3.5	4.5	20.0	39.0	1.38	0.59	1/1000
6号砂					1.59		

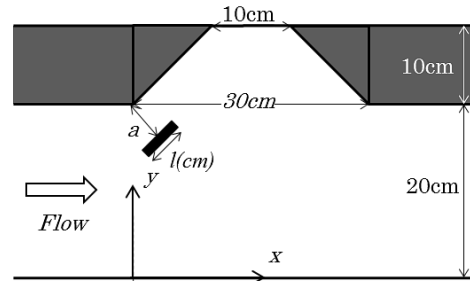


図-1 水制配置図

表-2 実験ケース

case	水制長 $l$ (cm)	水制距離 $a$ (cm)	水制角度
non			
I2a3	2	3	45.90
I2a4		4	45.90
I2a5		5	45.90
I3a3	3	3	45.90
I3a4		4	45.90
I3a5		5	45.90

プリング周波数 100Hz で約 40 秒間計測した。電磁流速計により得られた non, I2a345, I2a390, I3a345 の時間平均流速ベクトル図を図-1 に示す。数値解析は、水深平均の  $k-\epsilon$  モデルによる計算を試みた。本研究で用いた水深平均の連続式及び開水路浅水流支配方程式は以下の通りである。数値解法は有限体積法に SIMPLE 法を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hUV}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (3)$$

ここに、 $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$  は各方向の底面せん断応力で、これは Manning 式により与えられ、 $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yy}$  はレイノルズ応力であり、渦動粘性モデルで与えられる。

数値計算により得られた電磁流速計と同ケースのベクトル図を図-2 に示す。精度検証においては両者の流れ構造の定性的な比較にとどめる。結果として、水制配置に応じた凹部内の渦構造は概ね一致し、凹部奥に水流が達するか否かで大別ができた。しかし、I2a3 45, I2a4 90 において凹部内渦構造に違いが見られたが、この二ケースについての考察は、後述する。また、電磁流速計による凹部内の渦構造は数値計算で得られたよ

うな凹部奥の渦や、水制背後の渦が確認されなかったため凹部内流れに関しては、数値計算結果を採用し以後考察を行う。

#### 4. 数値計算結果による流れ構造の把握

non, l2a345, l2a390, l3a345 の凹部内の流れ関数 $\Psi$ を等値線で示した図(流線)をそれぞれ図-2, 図-3に示す。ただし、 $\Psi$ は、以下の計算式で与える。

$$\Psi(x, y) = \int_{y_0}^y U(x, y) d\eta \quad (4)$$

ここに、 $y_0$ は凹部壁面とした。水制なしのケースの(a)nonは流れ構造として、主流域から凹部域内へ開口部中央付近( $x=15\text{cm}$ )から下流端付近にかけて流入している。凹部内には反時計回りの平面渦が発生している。これは、流れ関数は中心渦と同じ位置で最小値を持つことが確認できる。凹部内壁面では壁面に沿った流れが見られ、凹部下流側境界面では水はねが見られる。(b)l2a3 45では、水制により縮流状態になった水流が凹部内に流れ込んでいる。しかし、流れは凹部奥には達せず、凹部奥では反時計回りの小規模の渦が発生している。流線を見ても、負の領域が $y=25\text{cm}\sim 30\text{cm}$ に広がり凹部に水制による流れが誘導できていない様子が見て取れる。(c)l2a3 90では、水制角度45度の(b)のケースと異なり水制による凹部内に引き込む流れが凹部奥まで達している。その後、水流は、凹部から主流に流れ出る流れと、水制背後に回り込む流れに分岐している。後者の水流により凹部内には中心が $x=15\text{cm}$ ,  $y=23\text{cm}$ となる時計回りの渦が形成されている。これは、流線でも確認でき、その領域が流線の最大値となっている。(d)l3a3 45のケースでは、(b)l2a3 45のケースと異なり、流れが凹部奥に達している。渦構造に関しては水制設置により主流側に剝離した水流が $x=20\text{cm}$ 付近で凹部内に流入し、水制背後に反時計回りの水平渦が生じている。また、凹部中にも渦が生じているが、これは流線から分かるように、水制により縮流状態となって凹部内に侵入した流れによって生じている。

**5. 土砂堆積と流れ構造の関係に関する検討** 水制設置における土砂堆積形状のメカニズムを、数値計算結果を用いて解明する。数値計算結果の解析として式(5)で定義された底面せん断応力 $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$ を用いる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (5)$$

ここに水の密度 $\rho$  ( $\text{g/cm}^3$ ),  $U$ : 平均主流速 ( $\text{cm/s}$ ),  $V$ : 平均横断流速 ( $\text{cm/s}$ ),  $n$ : マニングの粗度係数である。

図-4に $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$ を $x=-5.75\text{cm}$ における $\tau_{bx}$ の平均値

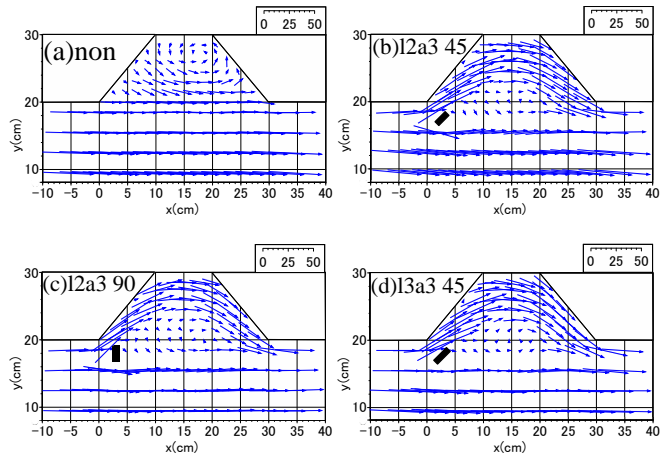


図-1 流速ベクトル(実験値)

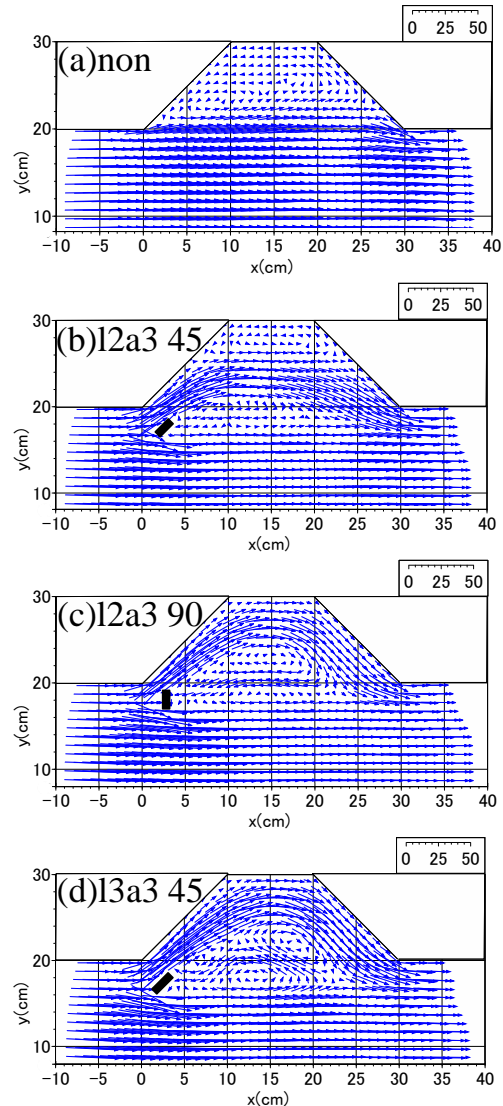


図-2 時間平均流速ベクトル(数値計算)

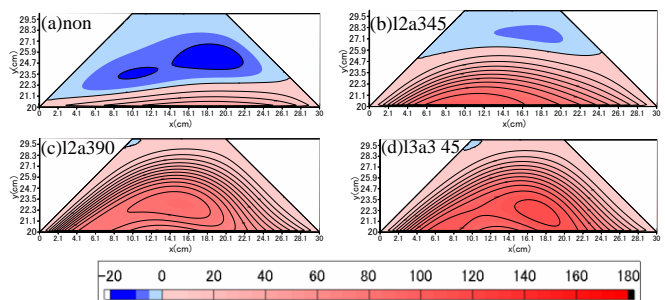


図-3 凹部内流れ関数 $\Psi$ (数値計算)

である $\overline{\tau_{bx}}$ により無次元化した $\tau_{bx}/\overline{\tau_{bx}}$  (以後 $\tau_{bx}'$ とする),  $\tau_{by}/\overline{\tau_{bx}}$  (以後 $\tau_{by}'$ とする)の等値線を示す. 土砂堆積形状に関しては, 粒径の違いによる堆積形状は堆積頂点の変化, 堆積範囲の増大が確認できたが, 大きな違いはほとんどのケースで確認できなかった. よって, 8号砂堆積形状を図-5に示す. 形状の考察として図-2, 図-3, 図-4を用いる. (a)nonでは凹部の全域に土砂堆積が起こっている.  $x=13\text{cm}\sim 17\text{cm}$ ,  $y=27.5\text{cm}$ を頂点とする山ができ, 流線の負の最小値と同じ形状の土砂堆積が起こっていることが分かる. また凹部奥の負の領域の $\tau_{bx}'$ により, 凹部境界部から河床波の移動に伴って砂が流入し, 凹部上流側に移動して堆積が形成されたことが推察される. 凹部境界部付近下流側では負の $\tau_{by}'$ の影響で土砂堆積が見られない. (b)l2a345では, 堆積は流線の負の領域に主に堆積し, 流線の負の最大値とほぼ一致していると言える. また堆積は凹部内下流側まで伸びる形状となっている. (c)l2a390では, 堆積形状は水制背後から伸び流線の正の最大値付近で堆積が起こっている. 水制により加速された水流により凹部内に土砂が浮遊砂として堆積していることが推察される. (d)l3a345のケースも(c)のケースと同様 $\tau_{bx}'$ の負の領域で堆積している. 流線と正の最大の箇所と堆積している箇所が概ね一致している様子が見て取れる. また凹部上流側壁面の $\tau_{bx}'$ の正の値の小さい箇所でも微小に堆積が起きている.

まとめとして, 主に堆積形状は凹部奥まで流れが達するか否かで大きく異なる. また, インターバル撮影における土砂堆積の時系列変化について, 凹部奥に達しないl2a345, l2a490, l3a445の3ケースのみで周期的な流れにより堆積してしており, 土砂が押し流される様子が確認できた. また, このケースは, 先述した電磁流速計の結果において, 凹部内渦構造に数値計算との差異が認められたケースである.

### 6. 土砂堆積に関する検討

水制設置における土砂堆積制御の評価のため, 図-6に凹部内に堆積した土砂量を水制無設置のケースの堆積量で除した値を8号砂, 6号砂それぞれについて示す. 8号砂では, すべてのケースで水制無設置のケースよりも土砂堆積が抑制されていることが見て取れる. 6号砂では, 水制を設置することでほとんどのケースで土砂堆積抑制効果は得られたが, l2a445, l2a545, l2a590, l3a545では水制無設置のケースより堆積量が返って増大した. これは共通して凹部奥まで流れが達していないケースであり, また水制距離がより長く, 水制角度が45度で凹部内に流れがより届かなくなるケースである. また, 粒径に関係なく水制長が長いケースで堆積抑制が確認できる. 粒径の違いによる堆積量の違いについては, 6号砂の方が, 堆積の相対量が8

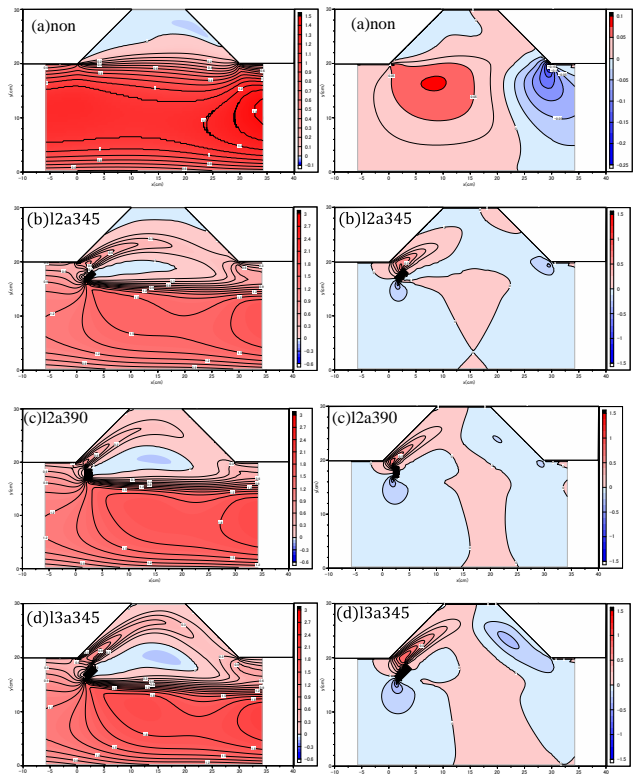


図-4 無次元底面せん断力図 (左:  $\tau_{bx}/\overline{\tau_{bx}}$ , 右:  $\tau_{by}/\overline{\tau_{bx}}$ )

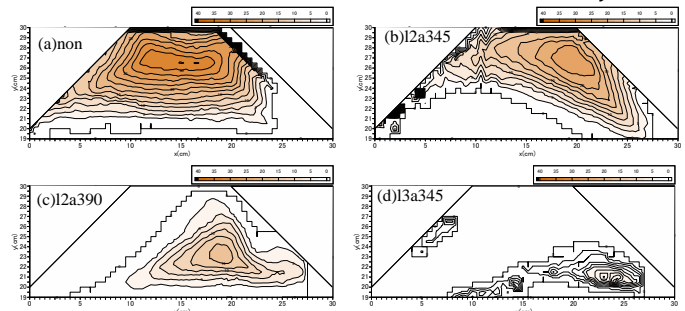


図-5 堆積形状 (8号砂)

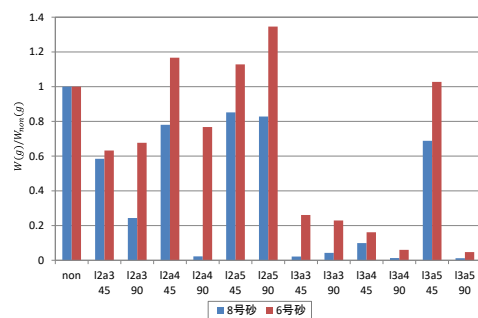


図-6 凹部内相対堆積量

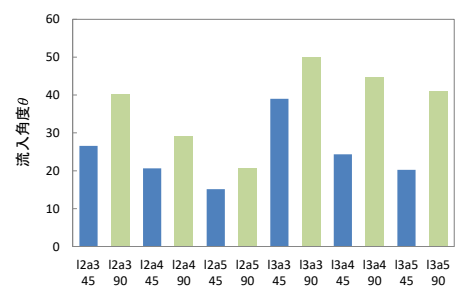


図-7 凹部内流入角度

号砂よりも多くなる事が挙げられる。

ここで、土砂堆積量の支配要因となる指標を提案する。ただし、土砂堆積量と各指標との相関を取るため回帰分析を行う。その際、土砂堆積の堆積過程において、水制による周期的な引き込み流の水塊の流入が確認できるケースであり、流れの周期により堆積形状に影響を与えかねない I2a3 45, I2a4 90, I3a4 45 のケースを除いて分析を行う。指標として、凹部境界面上流部より流入する箇所での流入角度  $\theta$  ( $^{\circ}$ )、凹部内への水流の流入流速  $V_{in}$  (cm/s) を挙げる。

初めに、流入角度と、凹部内流れ構造の関係性の把握のために、各ケースの凹部内流入角度を図-7に示す。水制長さ、距離、角度それぞれの変化に応じて明確な傾向を示す。また、流入角度による流れ構造の変化に関しては、 $\theta < 25^{\circ}$  の時は、凹部に置くまで侵入しない流れ、 $25^{\circ} < \theta < 35^{\circ}$  の場合、凹部内の流れが周期的となり、 $35^{\circ} < \theta$  の場合、凹部奥に達する流れとなると推察される。単位面積堆積質量 (8号砂, 6号砂) と凹部内への流入角度  $\theta$  の関係をそれぞれ図-8, 図-9に示す。8号砂では、 $R^2=0.9187$  と高い相関がみられた。つまり、流入角度が増加するほど、土砂堆積量は減少すると言える。また、周期的な流れが発生するケース I2a3 45, I2a4 90, I3a4 45 において流入角度が 25 度~30 度の箇所と限定的となっている。6号砂では、 $R^2=0.8244$  と比較的高い相関が得られた。8号砂と同様流入角度が増加するほど、土砂堆積量は減少すると言える。

次に、単位面積堆積質量 (8号砂, 6号砂) と凹部内への水流の流入流速  $V_{in}$  を限界摩擦速度  $U_{*c}$  で除した無次元流入速度の関係を図-10に示す。単位面積堆積質量と流入流速の関係は、流入角度の関係と同様の傾向を示した。よって、水制設置パラメータの変化においても同様の傾向が見られる。全ケースを通じて、流入流速  $V_{in}$  が限界摩擦速度  $U_{*c}$  の約 10 倍となる箇所において、凹部内への堆積量の分布傾向の変化点であることが示唆される。

**7. おわりに** 本研究において、水制設置における流れ構造の変化として、凹部奥に達するか否かで大別された。またその傾向は、水制による引き込み流の流入角度に支配要因があると推察できる。土砂堆積形状も、上記による大別ができたが、流入角度がある一定の範囲で、周期的な堆積過程となる領域が存在することが示唆された。堆積形状は粒径によらず共通のパターンを示した。ただし、同じ流れ構造でも粒径によりパターンが異なる場合があった。土砂堆積量抑制効果に関しては、8号砂の場合ほどのケースも得られたが、6号砂の場合は、主に水制距離の長いケースにおいて、得ることができなかった。堆積量相対量としては、6号砂の方が、8号砂よりも卓越する結果となった。今回、流入角度が最も大きい I3a3 90 において、土砂堆積効果

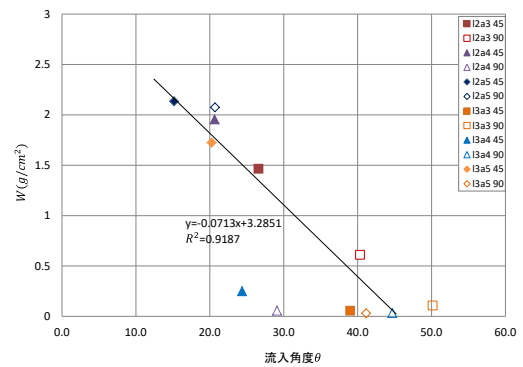


図-8 堆積量と流入角度の関係 (8号砂)

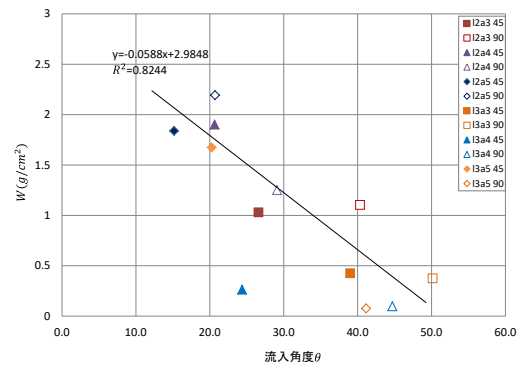


図-9 堆積質量と流入角度の関係 (6号砂)

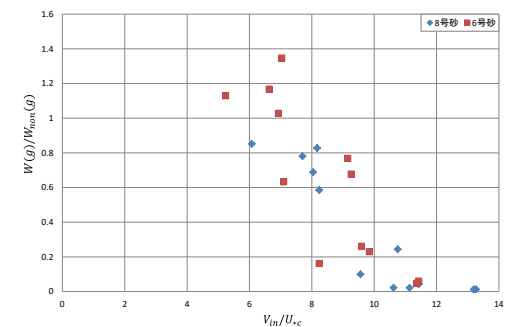


図-10 堆積質量と無次元流入速度の関係 (8号砂, 6号砂)

が最も得られたケースと言える。しかし、今回の研究では、出水時における検討であり、平水時における議論を行っておらず、ワンド内の静穏域を確保することに重きを置いていない。よって、今後は平水時におけるワンド内の静穏化を図るためのさらなる検討が必要となる。

**参考文献**

- 堀部扶実：わんど開口部制御による土砂堆積抑制に関する研究 名古屋工業大学修士論文 2009
- 田邊祐真・田安正茂・廣部英一：足羽川舟着場の土砂堆積抑制に関する模型実験による検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015