

1. はじめに

近年、海洋におけるプラスチックゴミの問題が注目され、その排出源の八割が陸域とされる。出水後、河川敷に多量の浮遊ゴミが堆積する状況が見られ、河川経由で海洋に流入する。治水に悪影響を与える流木の問題もさることながら、浮遊ゴミの海洋への流出を防ぐ対策も重要と考えられる。名古屋市 の堀川では、浮遊ゴミが潮汐によって行き来している状況が見られたが、堀川の上流端に凹部を有する構造では浮遊ゴミが蓄積していることが観察された。岡本らの流木捕捉システムに関する研究において、誘導壁の角度が重要であることを示唆した¹⁾。また、以前の研究より水制を側岸で設置することで凹部内の流れ構造がかなり異なることが示された²⁾。ただし、河岸凹部の存在は河道の急拡大をもたらす、流速の低下や循環渦の発生によって土砂の堆積が顕著になったり、死水域の形成により水質の悪化を招いたりする恐れがある³⁾。以上の背景より、凹部の対岸に水制を設けて浮遊ゴミを凹部内へ誘導する方法について、本研究では凹部上流側の誘導壁の勾配、水制の形状と位置の効果に焦点を当てて PIV 実験、数値計算及び浮遊物捕捉実験を行った。

2. 長方形断面水制を用いた PIV 計測実験

(1) PIV 実験

実験水路は長さ 7.5m、幅 0.3m、水路勾配 $I=1/1000$ の長方形断面可変勾配開水路を使用した。水理条件については表-1 に示し、実験水路は図-1 に示すように、水路左岸に幅 15cm、高さ 6.5cm の塩ビ版と長さ 50cm、幅 15cm の凹部を設置し、主水路幅を 15cm とした。水制と凹部の境界条件を表-2 に示した通り、誘導壁勾配を 4 パターン、水制位置を 6 パターンとし合計 24 ケースの実験を行った。x 座標の原点は凹部上流壁の開始地点、y 座標の原点は右岸、z 座標の原点は x 座標と y 座標の交わる点の水路底とした。

PIV 計測の流れの可視化には直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にしたグリーンレーザー光を水平断面に照射しビデオ撮影した。1 回の撮影では全体をカバーできないため、上流と下流の 2 回に分けて撮影し合成した。

レーザー光の照射位置は、水面付近($z=5.0\text{cm}$)とした。この可視化画像は高速度カメラ (Ditect HAS-U1) を用いて 1024×1024 (pixel) の画像を 1/200s で撮影し、画像計測には FlowExpert (カトウ光研) PIV 解析ソフトを用いて流速ベクトル計測を行った。相互相関法に

表-1 PIV 実験水理条件

流量 $Q(L/s)$	下流端水深 $h(cm)$	主流域流速 $U_m(cm/s)$	レイノルズ数 $Re(U_m h/\nu)$	フルード数 Fr	河床勾配 I
1.51	6.0	16.8	10258	0.22	1/1000

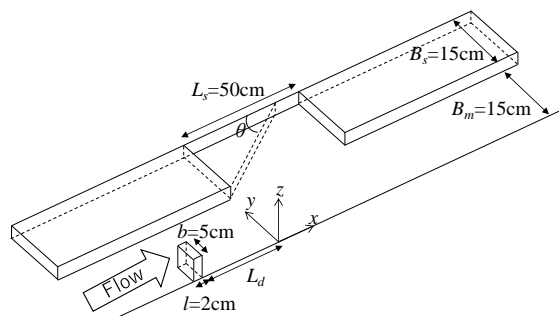


図-1 PIV 実験水路条件

表-2 水制と凹部の境界条件

主流域幅 $B_c(cm)$	塩ビ版幅 $B_m(cm)$	凹部長さ $L_s(cm)$	水制長 $l(cm)$	水制幅 $b(cm)$	水制高 $h(cm)$	水制形態	誘導壁勾配	誘導壁角度 θ	水制位置 $L_d(cm)$	水制番号
15.0	15.0	50.0	2.0	5.0	10.0	非越流	なし	-	-20	なし
									-10	①
									0	②
									10	③
									20	④
									20	⑤
							1:1	45.0	-20	なし
									-10	①
									0	②
									10	③
									20	④
									20	⑤
1:2	26.6	-20	なし							
		-10	①							
		0	②							
		10	③							
		20	④							
		20	⑤							
1:3	18.4	-20	なし							
		-10	①							
		0	②							
		10	③							
		20	④							
		20	⑤							

より画像を 24×24 (pixel) の検査領域で解析して、3200 個 16 秒間平均値の平面流速ベクトルデータを得た。

(2) 浮遊ゴミを捕捉する判断基準

PIV 法による計測した結果を利用し、以下の二点に関して考察を行う：

① 流速ベクトル

流速ベクトルは、水の流れ方向や循環渦、淀み域の規模などを肉眼で判断することができる。ここで、上流端の水を明らかに凹部内に誘導しないケースを除外する。また、循環渦と淀み域が大きい場合、凹部内の水交換が悪くなり、低速域や死水域の形成により水質が悪化するため、環境面上では除外する。

② 凹部と主流域との境界における横断流速 V

凹部下流端と主流域との境界で透過メッシュを設置することで浮遊ゴミを収集するため、そこでの横断流速 V は水が凹部への流入流出を最も直感的に表す値である。凹部出口付近での横断流速 V について、値が正となる場合は循環渦が主流域と凹部との境まで循環渦を生じていることを裏付け、ゴミの捕捉ができなくなる。そこで本研究では、 $x=15\text{cm}\sim 45\text{cm}$, $y=15.5\text{cm}$

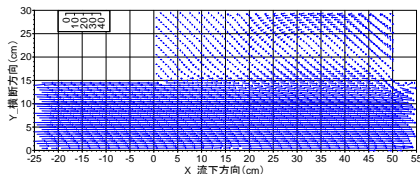


図-2 誘導壁なし水制なし

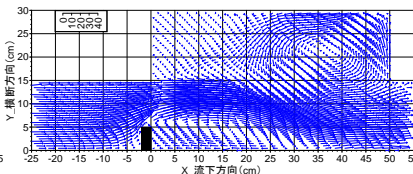


図-3 誘導壁なし水制位置③

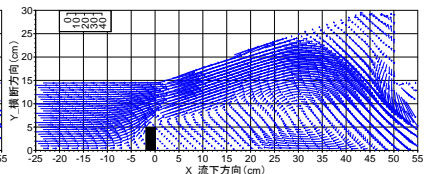


図-4 誘導壁勾配 1:3 水制位置③

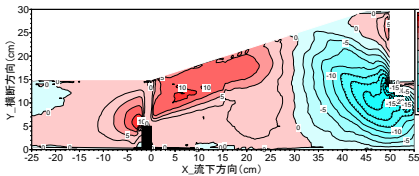


図-5 誘導壁勾配 1:3 水制位置③

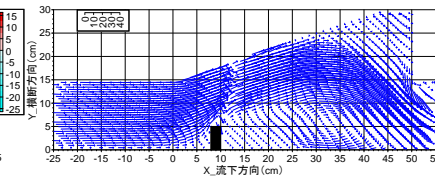


図-6 誘導壁勾配 1:3 水制位置④

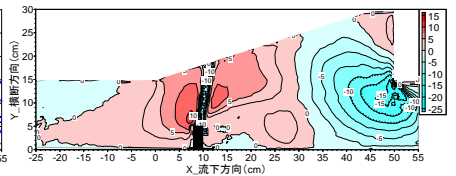


図-7 誘導壁勾配 1:3 水制位置④

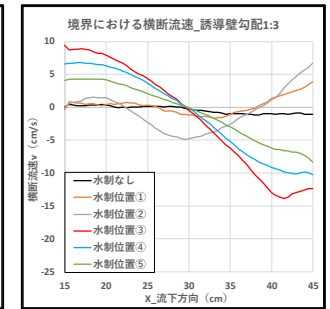
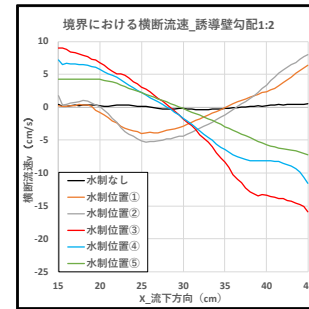
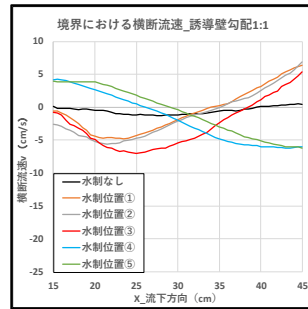
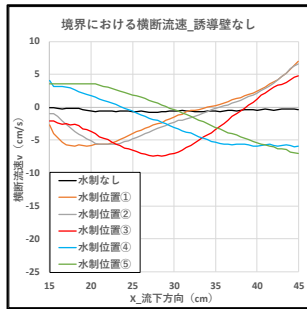


図-8 各ケースの境界における横断流速

における横断流速 V に着目する。

(3) PIV 実験結果

表-2 に示した実験ケースの結果の一部を抜粋し、水面付近の流速ベクトルを図-2～図-4 と図-6 に、横断方向流速のコンターを図-5 と図-7 に示す。誘導壁なし水制なしの水面付近流速ベクトルは図-2 に示すように、主流域の水は凹部の下流壁に沿って凹部内に流入して循環渦を形成している。その中心位置は x 方向には凹部長さの約 7 割下流側で y 方向には凹部幅のちょうど中心にあり、この循環渦より上流の凹部内では淀み域となっている。

上述のケースと比べ、水制を凹部上流壁の対岸に置く場合は図-3 に示す。凹部内の循環渦の形状には大きな差異が見られず、循環渦と上流の淀み域の割合のみが若干異なることが確認される。水制付近では主流域の水がやや凹部内まで誘導されるが、凹部の循環渦と相殺し凹部内への流入は期待できない。

誘導壁勾配 1:3、水制位置③の場合(図-4)では、上流側の水がほとんど凹部に誘導され、凹部内の淀み域は完全に消え、循環渦の規模も誘導壁なしのケースより約 8 割縮小した。また、図-5 の横断方向流速のコンターより、水制直前から $x=30\text{cm}$ までの水路では横断流速が正となると凹部に流れ込み、それ以後は負の値となり凹部から出ていく傾向を示す。このことより、 $x=30\text{cm}$ より下流の凹部境界に捕捉網を設置することで浮遊ゴミの捕捉が可能となる。

誘導壁勾配 1:3、水制位置④の場合(図-6)について、水制位置③のケースと類似な流れ構造を示しているが、図-7 の横断流速 V の分布図を見てみると、横断流速の増幅が水制位置③より弱いことが確認された。

各ケースの $x=15\text{cm}\sim 45\text{cm}$ 、 $y=15.5\text{cm}$ における横断流速 V の分布を図-8 に示す。ここでは、横断流速の正の値は凹部への流入を表している。結果として、水制を④と⑤に設置する場合、横断流速 V の線形近似曲線の勾配は全て負の値となっているが、水制位置⑤のケースにおいて、凹部内の淀み域と循環渦の規模が大きく死水域を形成する恐れがある。また、誘導壁勾配が 1:2 と 1:3 の場合、横断流速 V の線形近似曲線の勾配値について水制位置③の方が最も小さいとなり、その次は水制位置④のケースとなることが確認された。横断流速 V の最小値のケースは誘導壁勾配 1:2、水制位置③のケースとなるが、水制の直後における流れは凹部に向かってそれほど偏流していないことが見られるため、浮遊ゴミを捕捉する効率が疑われる。

以上の結果から、水制を凹部の対岸かそのやや下流に設置し、誘導壁の勾配を緩やかに設定する必要があることが示された。

3. 異なる断面形状の水制を用いた PIV 計測実験

前節の結論を参考にし、誘導壁の勾配を 1:3、水制位置を③、④にすることを境界条件として、捕捉率に影響を及ぼす要因として水制の断面を異なる形状にし、追加実験を行った。実験条件は長方形断面水制と同様で、水制の断面形状条件は表-3 に示す。

(1) 異なる直角勾配を有する三角水制

水制断面形状が直角勾配 1:1 三角形、直角勾配 1:2 三角形と直角勾配 1:3 三角形の異なる直角勾配をもつ水制における境界横断流速のうち、 $x=15\text{cm}\sim 45\text{cm}$ 、 $y=15.5\text{cm}$ での横断流速を抽出し、図-9 に示す。各曲線に線形近似曲線とその傾きを求め、横断流速が正

から負になるときの x 座標を表-4にまとめた。

各横断流速分布の近似曲線には相関係数 R^2 が全て 0.95 以上であると非常に相関性が高いため、近似曲線の傾きは境界における横断流速の変動の強さを示す指標ともいえる。図-10 に示す横断流出速度最大値を比較すると、異なる直角勾配を有する水制に対して水制位置③の値が常に水制位置④より大きく、水制位置③の凹部への流入流出速度を水制位置④の場合より大きいことが分かった。また、水制間に比較し、横断流出速度の大きい順で並べると、直角勾配 1:1>1:2>1:3 との結果になった。横断流速が 0 になる x 座標について、水制の勾配が緩やかにすることにより、0 点が上流域に移ることが確認された。

(2) 異なる斜面曲率を有する断面水制

本節では前節と同様に考察を行い、 $x=15\text{cm}\sim 45\text{cm}$, $y=15.5\text{cm}$ での横断流速分布を図-11 に示し、各曲線における線形近似曲線の傾きを表-5 にまとめた。傾きの値と横断流速最小値の変化傾向について、図-12 に横断流出速度最大値の比較を示した。近似曲線の傾きと横断流出速度最大値との相関性、水制位置が与える影響は前述の実験と同様な結果を得た。横断流出速度最大値の大きい順で並べると、四分の一円弧>特殊型直角三角形>直角勾配 1:1 三角形との結果になった。横断流速が 0 になる座標について、6 ケースともほぼ 29.5cm にあると大きな差異が見られなかった。

4. PIV 実験を再現する数値計算

PIV 実験の計測値と比較し、数値予測の可能性を検討するため数値計算を行った。計算には河川シミュレーションソフト iRIC の平面二次元計算モデルである Nays2DH を用い、乱流モデルには二次元非線形モデル $k-\epsilon$ モデルを用いた。実験条件及びケースは PIV 実験の条件と同様である。PIV 実験に用いた水路を模擬する格子は x 方向に 800 個、 y 方向に 60 個とし、計算条件は表-6 に示す。

図-13 と図-14 に図-4、図-5 と同条件の誘導壁勾配 1:3、水制位置③の水面付近流速ベクトルと横断流速分布を示す。流速ベクトルについて、両者とも類似な流れ構造をしており、上流端の水はほとんど誘導壁に沿って凹部まで誘導されることが見られる。水制下流にある循環渦について数値計算の結果は PIV の実験結果より規模がやや小さい点が見えるが、横断流速コンターをしてみると、両者の結果に大きな差は見られなかった。また、本研究の着目点である境界における横断流速は図-15 に示している通り、数値計算の結果は実験結果と若干ずれているが、傾向としてほぼ同様であり再現性が良いため、水面の流れ構造を概ね予測することが可能であると考えられる。

表-3 追加水制の断面形状

断面形状	長さ (cm)	幅 (cm)	高さ (cm)	水制位置	誘導壁勾配
直角勾配1:1三角形	5.0	5.0	10.0	③	1:3
直角勾配1:2三角形	10.0			④	
直角勾配1:3三角形	15.0			③	
				④	
特殊型直角三角形	5.0			③	
		④			
四分の一円弧	5.0			③	
				④	

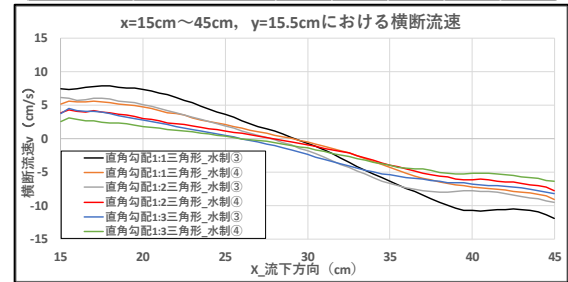


図-9 凹部と主流域との境界での横断流速(勾配)

表-4 近似曲線の傾き及び横断流速の特徴(勾配)

断面形状	直角勾配1:1三角形_水制③	直角勾配1:1三角形_水制④	直角勾配1:2三角形_水制③	直角勾配1:2三角形_水制④	直角勾配1:3三角形_水制③	直角勾配1:3三角形_水制④
近似曲線の傾き	-0.792	-0.552	-0.616	-0.435	-0.465	-0.342
相関係数 R^2	0.972	0.985	0.969	0.988	0.983	0.985
横断流速が0になるx座標	29.5	29.0	28.0	28.0	26.0	26.0
横断流出速度最大値	-12.0	-9.1	-9.6	-7.8	-8.2	-6.4

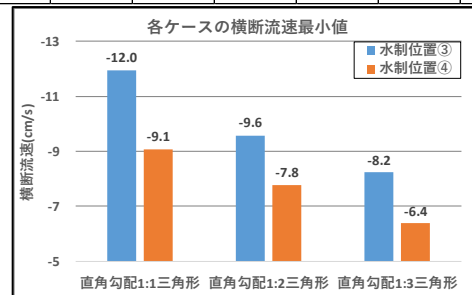


図-10 横断流速最小値(勾配)

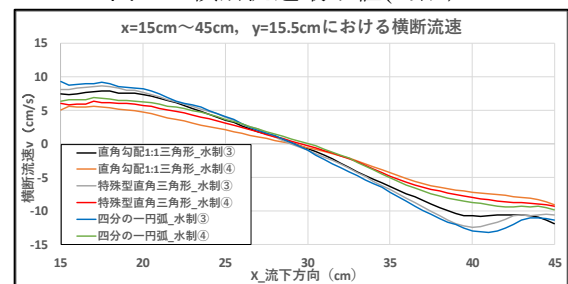


図-11 凹部と主流域との境界での横断流速(曲率)

表-5 近似曲線の傾き及び横断流速の特徴(曲率)

断面形状	直角勾配1:1三角形_水制③	直角勾配1:1三角形_水制④	特殊型直角三角形_水制③	特殊型直角三角形_水制④	四分の一円弧_水制③	四分の一円弧_水制④
近似曲線の傾き	-0.792	-0.552	-0.842	-0.623	-0.893	-0.679
相関係数 R^2	0.972	0.985	0.958	0.975	0.963	0.968
横断流速が0になるx座標	29.5	29.0	29.0	30.0	29.5	30.5
横断流出速度最大値	-12.0	-9.1	-12.5	-9.3	-13.2	-9.9

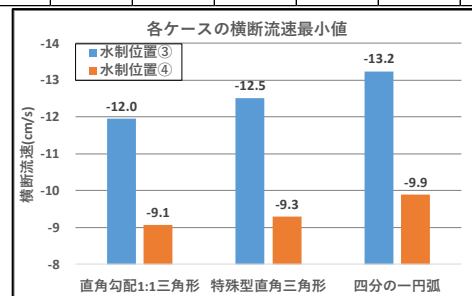


図-12 横断流速最小値(曲率)

5. 浮遊物捕捉実験

浮遊ゴミの実際の捕捉率と PIV 実験における評価基準とどのような関係をもつか究明するため、浮遊ゴミのモデルとして、直径 1.3cm、比重 0.91 のスーパーボールを用いて捕捉実験を行った。断面透過率が 75%、1cm 間隔の透過捕捉メッシュを凹部と主流域との境界における $x=30\text{cm}\sim 50\text{cm}$ に沿って設定した。実験条件とケースは PIV 実験と同様であり、捕捉率を計算するために、各ケースで 100 個のスーパーボールを水路の上流端水路の中央から投入した。

図-16 には長方形断面水制を用いたケースの捕捉率を示す。誘導壁勾配が 1:2 と 1:3 の場合では、水制位置③と水制位置④のケースは高い捕捉率を示しているが、誘導壁勾配 1:2 水制位置③の場合では捕捉率が 10%未満で非常に低いことがわかった。このケースは横断流速 V が最小値を示していたが、水制のすぐ直後の流れ構造が浮遊物の捕捉には適さないものと推定される。以上をもって、長方形断面水制を用いた場合、誘導壁勾配 1:3、水制位置③のケースは高い捕捉率を得ることが期待される。

図-17 に異なる断面形状の水制を用いた場合の捕捉率を示す。直角三角形断面水制を用いる場合、捕捉率は直角勾配の増加とともに増加する。特殊型直角三角形と四分の一円弧の場合では非常に高い捕捉率を示しており、長方形断面水制を用いた場合の最大値とほぼ同様である。結果として、スーパーボールの捕捉率は凹部下流端が主流域との境界における横断流出速度と同様な傾向を示すことが確認された。この発見は、PIV 実験で浮遊ゴミを捕捉するために設定された基準が妥当であることを示しているが、流れ構造などその他の要因も考慮する必要がある。

6. まとめ

本研究では水制と河岸凹部内の誘導壁の勾配に着目して実験を行った結果、適切な水制位置と誘導壁の勾配を設置することにより、水面の流れ構造を変え、浮遊ゴミを凹部の下流端で効率よく捕捉できることが明らかとなった。本研究で得られた知見から、以下のようなゴミの捕捉に効率向上の方策が推測される。

- 1) 凹部内の誘導壁の勾配を緩やかにし、凹部上流壁の対岸の直前かやや下流に水制を設置する。
- 2) 水制断面の曲率は横断流速が 0 となる座標に影響がないことが分かったが、凹部への流入速度には影響を及ぼすため、流木など比重の大きい浮遊ゴミを対象として収集する場合は、水制断面をなるべく円滑に設置するべきである。
- 3) 水制断面が三角形の場合、流れ方向となす角度をある程度大きく設定する必要がある。

表-6 数値計算に用いるパラメータと条件

項目	値	項目	値
水路長さ(m)	4.0	マニング粗度	0.01
x方向格子(個)	800	乱流モデル	k-εモデル
水路幅(m)	0.3	下流端水深(m)	0.06
y方向格子(個)	60	上流端流量(m^3/s)	0.00151
水路勾配	0.001	水の密度(kg/m^3)	1000

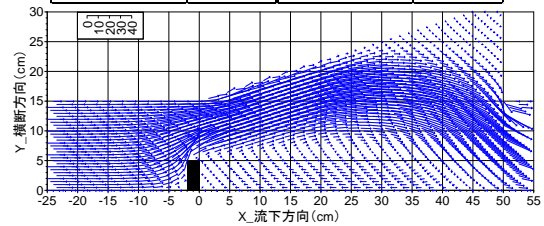


図-13 勾配 1:3 水制③の水面付近流速ベクトル(計算)

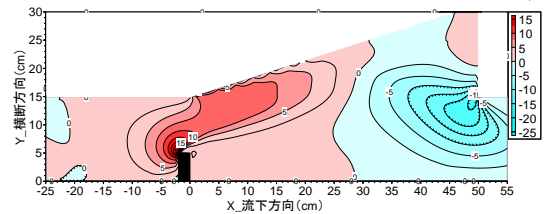


図-14 勾配 1:3 水制③の水面付近横断流速分布(計算)

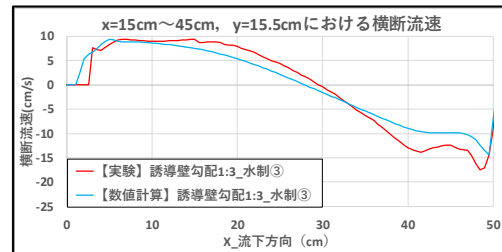


図-15 横断流速(誘導壁勾配 1:3, 水制位置③)

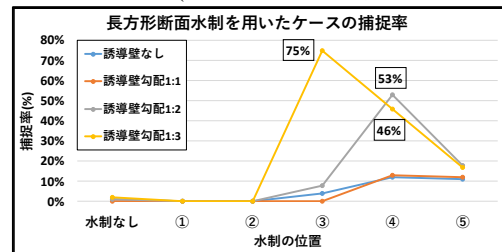


図-16 長方形断面水制を用いた場合の捕捉率

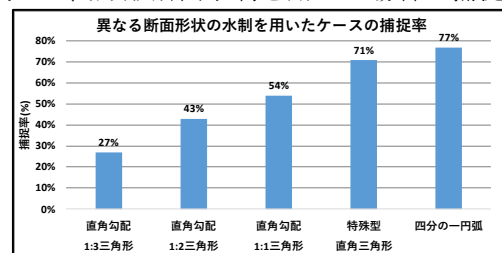


図-17 異なる断面形状の水制を用いた場合の捕捉率

参考文献

- 1) 岡本隆明, 山上路生, 榎原義信: 遊水域を利用したアクティブな流木捕捉システムに関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I_673-I_678, 2018.
- 2) 加藤智道: 水制設置による台形ワンドの土砂体積抑制に関する研究, 名古屋工業大学修士論文, 2015.
- 3) 富永晃宏, 小島直也, 市川亜也佳: 開水路側岸凹部の流れ構造に及ぼす対岸水制の影響, 土木学会論文集 A2(応用力学) Vol.69, No.2(応用力学論文集 Vol.16), I_519-I_528, 2013.