

# 導流工越流時における台形ワンドの土砂堆積制御に関する研究

指導教員 富永 晃宏教授

東芦谷 謙

**1. はじめに** ワンドは多自然川づくりの一つの手法として人工的に多く作られており、今回研究の対象とする足羽川の九十九橋直上流左岸の船着き場として利用されている水面利用施設もこの一つである。ワンドは出水時において土砂が多く堆積しその機能を失うことが問題となっている。先行研究<sup>1)</sup>においては、このようなワンドの土砂堆積抑制策として非越流条件で導流工を設置し主流からの引き込み流を作りワンド内の土砂を吐き出すという実験が行われている。

今回の研究においては、導流工を越流する条件において実験を行い、出水時においてもワンドの機能を維持するような引き込み流をもたらす、土砂堆積制御を得ることができる導流工提案を目的とし、土砂堆積と流れ構造について検討を行っていく。

**2. 実験条件** 本研究では土砂堆積実験と PIV 実験の二種類の実験を行った。

土砂堆積実験について、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 10cm、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。詳細な実験条件については表 1 に示す。また図 1 に導流工設置図を示す。導流工モデルのスケールは長さ 1 を 3cm、幅を 1cm、導流工高さ  $h$  を 1.5, 2, 3cm と変化させた。導流工距離  $a$  に関しては、ワンド開口部上流端から 3, 4, 5cm となるように設置した。実験ケースを表 3 に示す。浮遊砂・掃流砂混在となる平均粒径 0.3mm (6 号砂)、掃流砂主体となる 0.13mm (8 号砂) の珪砂を用い、貯水槽に 250l の水と 6kg の各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。また堆積過程の把握のため 60 秒毎のインターバル撮影、通水後の台形ワンド内の堆積形状をレーザー変位計により計測した。

PIV 実験について、実験水路は長さ 7.5m、全幅 0.3m の可変勾配開水路を用いた。側面はガラス張り、レーザーによる光の反射を防ぐために、全水路底及び設置構造物に黒く塗装した塩化ビニル板を使用している。土砂堆積実験と同様の塩ビ板を用い、上流から 3.8m の位置に設置しワンド域とした。詳細な実験条件については表 2 に示す。導流工の配置は土砂堆積実験と同様にした。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 のシート状にしたアルゴンレーザー光を開水路水平断面に照射した。レーザ

ーシートの照射位置は、水平断面に 5mm 間隔で 7 断面 ( $z=0.5\sim 3.5\text{cm}$ ) 設定した。この可視化画像は高速度カメラ(ライブラリー)を用いて 1/200s で撮影した。FlowExpert(カトウ光研)PIV 解析ソフトを用いて相互相関法により画像を解析し、3200 データ 16 秒間平均値を流速ベクトルデータとした。

表 1 実験条件(土砂堆積実験)

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

表 2 実験条件 (PIV 実験)

$Q(\text{l/s})$	$h(\text{cm})$	$B(\text{cm})$	$U_m(\text{cm/s})$	$Fr$	$I$
3.05	4.3	20	36.0	0.55	1/1000

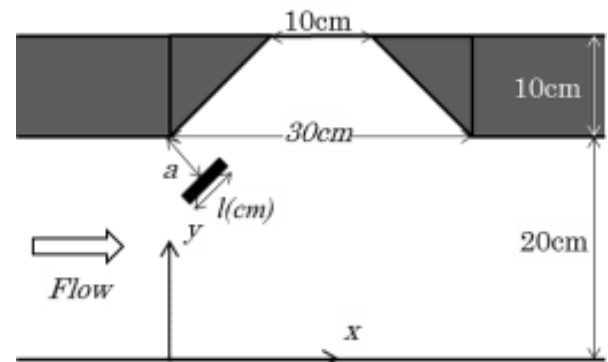


図 1 導流工配置図

表 3 実験ケース (土砂堆積実験)

case	導流工高さ $h(\text{cm})$	導流工長さ $l(\text{cm})$	導流工距離 $a(\text{cm})$	導流工角度
Non				
h2a345	2.0	3.0	3.0	45
h2a445	2.0	3.0	4.0	45
h2a545	2.0	3.0	5.0	45
h2a390	2.0	3.0	3.0	90
h2a490	2.0	3.0	4.0	90
h2a590	2.0	3.0	5.0	90
h3a345	3.0	3.0	3.0	45
h3a445	3.0	3.0	4.0	45
h3a545	3.0	3.0	5.0	45
h3a390	3.0	3.0	3.0	90
h3a490	3.0	3.0	4.0	90
h3a590	3.0	3.0	5.0	90

**3. 実験結果（土砂堆積実験）** 図2に6号砂の堆積形状を示す．図3に8号砂の堆積形状を示す．それぞれの堆積形状について考察を行っていく．導流工無設置の時のケースは両砂ともワンド内に広く堆積する形状となった．

導流工高さが2cm，角度が90度の時はh2a390において大きく違いが現れた．6号砂においては， $x=87\sim 95\text{cm}$ ， $y=6\sim 10\text{cm}$ の範囲において堆積がほとんど見られなかった．堆積のピーク点は $x=84\text{cm}$ ， $y=9\text{cm}$ ， $x=97\text{cm}$ ， $y=4.5\text{cm}$ と2箇所に分かれている．8号砂において，6号砂で堆積しない範囲において堆積は生じているが，堆積のピーク点が $x=86\text{cm}$ ， $y=9.5\text{cm}$ ， $x=95\text{cm}$ ， $y=8\text{cm}$ と2箇所に分かれている．このことからh2a390のケースでは，凹部奥中心部分において強い三次元的な循環渦が生じていると推察することができる．両砂とも距離が3cmから4cmに変わる段階で大きく堆積形状も異なる結果となった．また，これまでと同様に距離が大きくなるにつれて開口部上流端付近で堆積していない範囲は小さくなっていった．導流工高さが3cm，角度が90度の時はケース群として最も堆積しない結果となった．6号砂においては，h3a390，h3a490で凹部内の上流側でほとんど堆積しておらず，8号砂においても，h3a490のケースで同じ結果が得られた．このことから凹部に流入する流れは凹部奥まで達しているということが分かる．導流工高さが2cm，角度が45度の時は6，8号砂が同様の堆積形状となった．導流工距離が大きくなるにつれて，開口部上流端付近における堆積していない範囲が小さく，凹部中心側に移動していることから引き込み流による影響が小さくなっていることが分かる．導流工高さが3cm，角度が45度の時はh245のケース群とほぼ同様の堆積形状を示す結果となった．距離による影響もh245の傾向と一緒にあった．

次に，表2に示したケース以外の実験について考察する．h3a545を対象として出水から平水に戻るような条件を想定し，流量を実験の途中で変更し通水を行った．2時間通水した後に水深を導流工高さの3cmまで下がるように調整し，その後1時間通水を行った．この結果を図4に示す．図4から分かるように図2，3のh3a545と比較すると明らかに凹部内の堆積量は減少していることが分かる．これは実験中の目視でも確認できたが，流量を小さくすることで掃流，浮遊砂ともに動きにくくなり凹部内への土砂流入量は減少したが，流出量は大きくなったということが要因である．このことから出水時から平水時に戻るにあたって凹部内の土砂堆積量は減少することが分かる．

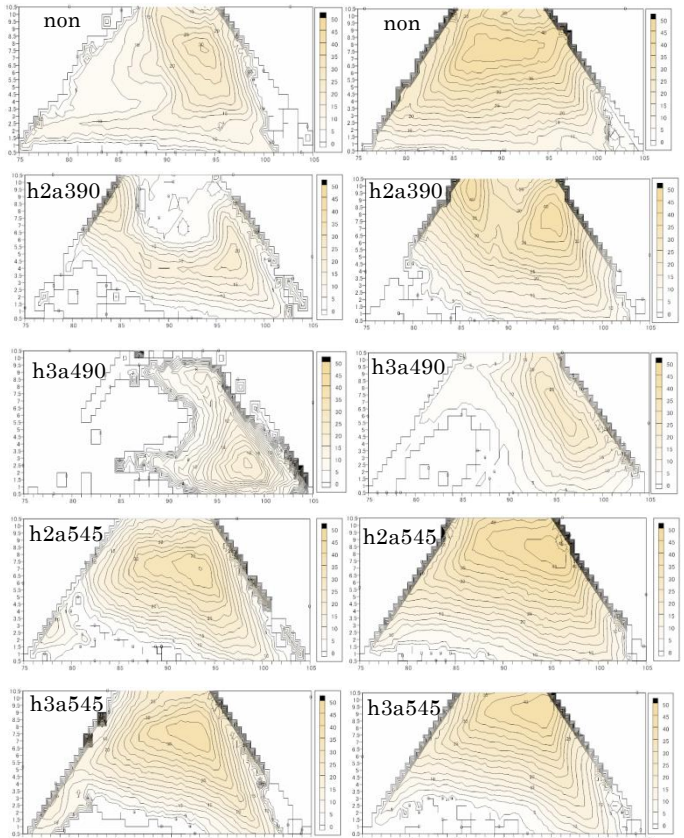


図2 堆積形状（6号砂） 図3 堆積形状（8号砂）

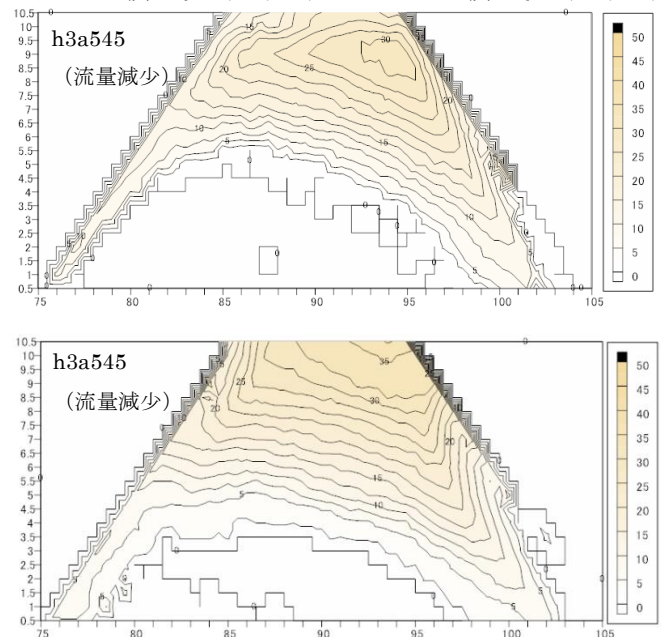


図4 堆積形状（上：6号砂，下：8号砂）

次に堆積量について考察を行っていく．今回の実験においては，相対堆積量によって検討した．6，8号砂それぞれの導流工無設置時の土砂堆積量で各ケースの土砂堆積量を割ったものを相対堆積量と定義する．図5に導流工角度が90度の時，図6に導流工角度が45度の時，図7に流量減少を行なったh3a545のそれぞれの相対堆積量をまとめたものを示す．

図5を見ると6号砂においてはh2a490, h2a590の2ケースで無設置の時より堆積量は多くなった。8号砂においては、全ケースで無設置の時より堆積量は減少した。高さが2cmの時は距離に比例して堆積量は増加しているが、3cmの時は比例関係が見られなかった。図6を見ると、6号砂においては全てのケースで無設置の時より堆積量が多くなった。8号砂においては、全ケースで無設置の時より堆積量は減少した。しかし6号砂においてはこの傾向が逆転している。図7を見ると、6号砂において、通常のケースでは導流工無設置の堆積量より多くなったが、流量減少させた場合導流工無設置の約0.8倍となっており、8号砂においても流量減少させると堆積量は少なくなるということが分かる。

まとめると8号砂においては、全ケースで堆積抑制効果があることが分かる。h3a490は6,8号砂ともに堆積量は最小となり堆積抑制に最適なケースであることが分かる。図5と図6を比較すると、導流工の高さ、距離、角度と堆積量の間には一様な関係が存在しないことが分かる。また45度のケースでは堆積形状は全て似たようなものになったが、90度においては特殊なケースも確認された。堆積量においても90度の方がケースごとにおける傾向がなく結果にバラツキが多い。これらのことから90度のケースの方が凹部内の流れ構造の三次元性が高いということが推察される。

**4. 実験結果 (PIV 実験)** 図8にPIV実験により計測した水平7断面を水深平均した流速ベクトル図を示す。(a)nonでは凹部内に平面渦が生じており、こちらの部分で堆積が生じる。(b)h2a390では平面渦が生じている部分での堆積が確認されない。(b)では導流工による引き込み流が凹部奥まで達していないことが分かる。(c)h3a345では(a),(b)と異なり引き込み流が凹部奥まで達していることが分かる。導流工背後に低速域が確認されるがこの部分において堆積はほとんど生じなかった。先行研究<sup>1)</sup>においては、凹部奥まで流れが達するケースにおいては堆積がほとんど生じない結果であったがh3a345においては凹部奥においても堆積が生じている。(d)h3a490では(c)と同様に流れが凹部奥まで達している。このケースでは堆積量は最小となり台形ワンド上流側での堆積はほとんど生じなかった。

(b),(c),(d)の図から導流工による引き込み流が凹部奥に達するか否かで流れ構造の大別は行うことができるが、これと堆積量の間には相関性がないことが分かる。非越流条件の先行研究<sup>1)</sup>の結果とは異なり、導流工を越流する条件においては凹部内の流れ構造は三次元性が非常に大きく複雑な流れが起きていることが推察できる。

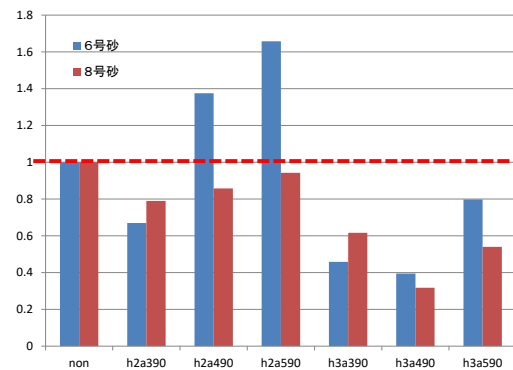


図5 相対堆積量(90度)

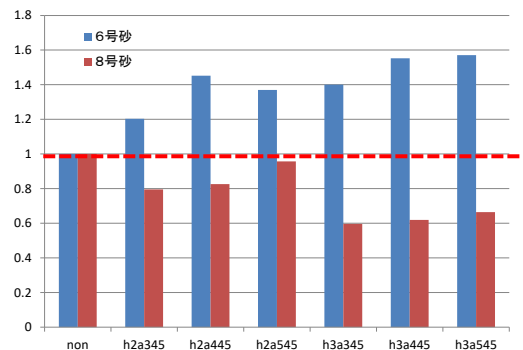


図6 相対堆積量(45度)

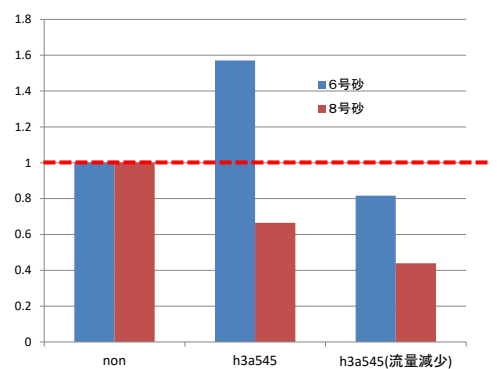


図7 相対堆積量(流量減少)

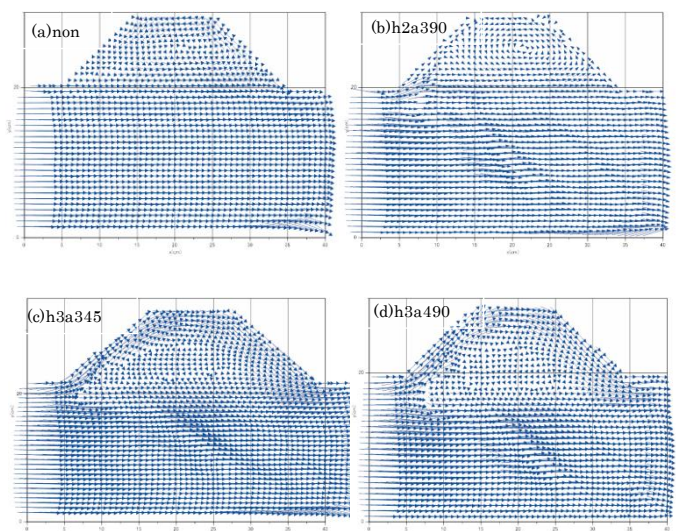


図8 流速ベクトル図(水深平均)

次に、水深平均した流速データから凹部内合成平均流速、流入流速、流入角度について考察を行っていく。凹部内平均合成流速  $U_a$  は以下の計算式で表す。

$$U_a = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (1)$$

ここで、 $U$ :時間平均主流速 (cm/s),  $V$ :時間平均横断流速 (cm/s) である。 $U_a$  を断面平均流速  $U_m$  で割り無次元化したものと相対堆積量を図 9 に示す。流入流速と流入角度については、 $x=5\sim 10\text{cm}$ ,  $y=20, 25, 21$  のデータを抽出し平均した。流入流速と相対堆積量を図 10, 流入角度と相対堆積量を図 11 に示す。

図 9 を見ると、 $U_a$  は h2a390, h2a590 は non のケースより小さくなった。また堆積量との相関は低いことが分かる。図 10 を見ると、流入流速は non のケースより全て大きくなっていることが分かる。このことから、凹部内への引き込み流は起きているということが分かる。しかし堆積量との相関は弱い。図 11 を見ると、水流が凹部奥に達している h3a345 よりも達していない h2a390 の方が大きくなった。堆積量と相関が強いことが分かる。

まとめると、凹部内流入角度は堆積量と相関が強く先行研究<sup>1)</sup>の結果も同様となることから、堆積量を評価する重要なパラメータであるということが言える。また流入流速が導流工を設置した際に大きくなっていることから引き込み流は起きているが引き込み流によって凹部内の平均流速は大きくなるわけではない、このことから導流工を設置した際においても凹部内が静穏域となるような条件は出水時においても作ることができるといえる。

**5. おわりに** 今回の研究では、導流工を越流する際の凹部内の土砂堆積抑制について検討した。導流工のパラメータと堆積量の間には一様な関係が存在せず、また流れ構造と堆積量の間でも相関性は見られなかった。このことから導流工を越流する場合、凹部内は三次元性が高く複雑な流れ構造であるということがわかる。しかし、凹部内流入角度は導流工越流、非越流時においても堆積量を評価できる重要なパラメータであることは明らかとなった。流入角度が最大の h3a490 のケースで堆積量は最小となり、最も土砂堆積抑制効果が得られたケースとなった。静穏域の確保については、凹部内の合成平均流速が導流工無設置のケースと 1.5cm/s 程度の差であることからワンドの機能を維持できないような流れ場にはなっていないといえる。今回の研究では、凹部内の流れ構造が複雑であるということは分かったが、流れ構造と堆積量との関係を明らかにできていない。今後は、PIV 実験においても  $xy$  断面だけではなく  $zy$  断面での検討や三次元流れのシミュレーションなどから流れ構造と堆積量との関係を明らかにすることが必要であると考えられる。

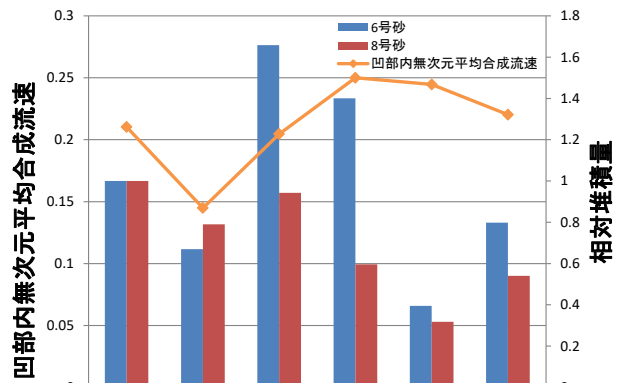


図 9 凹部内無次元平均合成流速と相対堆積量

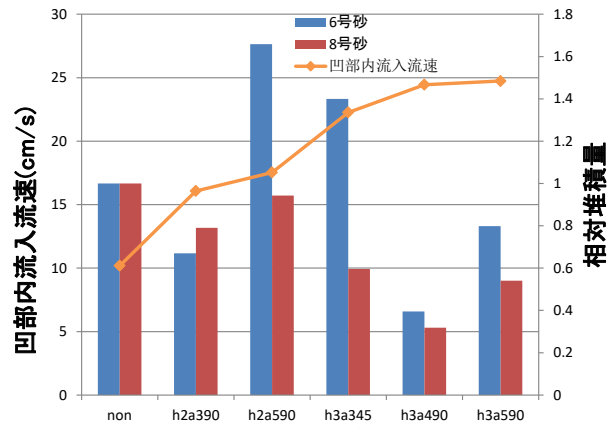


図 10 凹部内流入流速と相対堆積量

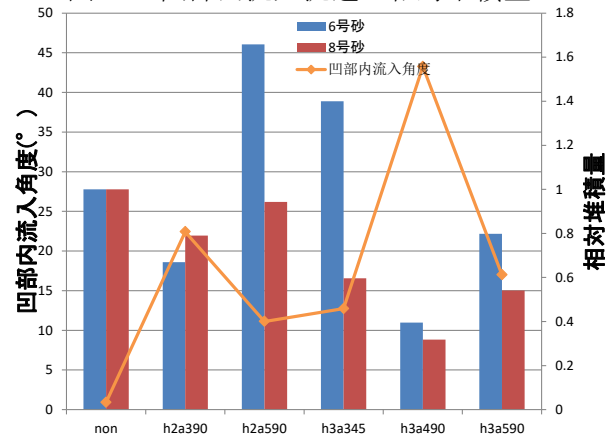


図 11 凹部内流入角度と相対堆積量

#### 参考文献

- 1) 加藤智道:水制設置による台形ワンドの土砂堆積抑制に関する研究 名古屋工業大学修士論文 2015
- 2) 小島直也:上流側水制がわんどの流れ構造と土砂堆積に与える影響に関する研究 名古屋工業大学修士論文 2014
- 3) 田安正茂, 流守博, 田中謙次, 田邊祐真, 廣部英一:足羽川水面利用施設の土砂堆積軽減に関する研究, 河川技術論文集, 第 22 巻, pp481-486 2016