

1. はじめに

熊本県菊池郡菊陽町曲手地内にある鼻ぐり井手は、加藤清正が新田開発のために開削した農業用水路であり、ヨナと呼ばれる阿蘇火山灰が水路底に堆積しないよう、底部に穿孔を有する隔壁付きの開水路となっている。その独特の構造により土砂の掃流力が通常の開水路より強化され、また、水が渦を巻いて流れる様子を見ることができる。今回、研究対象とする名古屋市中村公園内の水路では、土砂や落葉の堆積による景観の悪化が問題となっており、鼻ぐり井手の構造を水路に設置することにより、土砂や落葉の堆積抑制と景観性能向上が期待される。

本研究では、隔壁のパラメータを変化させることによる土砂輸送能力への影響と流れ構造の変化を、土砂堆積実験、PIV実験により検討した。また、数値計算により、PIV実験データとの比較検討を行った。

2. 実験概要

土砂堆積実験には、長さ6m、幅0.3mの亚克力製長方形断面水路を用いた。実験条件は表-1のように設定した。上流端から2.1mの地点を始点とし、それより下流側に鼻ぐり井手の隔壁模型を5基設置した。隔壁のモデルとして幅2.5cm、5cm、10cm、高さ1cm、2cm、10cm、長さ10cm、30cmのアルミ製直方体を用い、それらを組み合わせることによって、図-1に示すような河岸からの距離 $L_y$ 、開口幅 $L_b$ 、開口高さ $L_h$ 、隔壁間隔 $L$ を変化させて実験を行った。各実験ケースを表-3に示す。L30y5h2を基準のケースとし、各パラメータを変化させた。また、上流端から1つ目の隔壁までを第1区間、上流側から順に隔壁間を、第2、第3、第4、第5区間、5つ目の隔壁から下流端までを第6区間とする。模型設置後、各区間の水深を測定した。次に、第2区間に2kgの砂(平均粒径0.42mm(5号砂)の珪砂)をならして置き(厚さ1.5cm)、2時間通水を行った後、各区間に堆積した土砂量を測定した。

PIV実験には、長さ7.5m、幅0.3mの勾配可変開水路を用いた。側面はガラス張りで、レーザー光の反射を防ぐために、水路底及び設置構造物を黒く塗装した。PIVのための撮影条件の制約から、土砂堆積実験と同

一条件ではなく、表-2のような実験条件を設定した。隔壁間では水面変動が生じるため、PIV解析が可能な流速まで流速を抑えてこのような条件とした。上流端から2.8mの地点を始点とし、それより下流側に、土砂堆積実験と同様に隔壁模型を設置した。ただし、隔壁間隔 $L=30\text{cm}$ のケースを計測対象とした。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第4区間における開水路水平断面および鉛直縦断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、水平断面は各ケースにおける水深を考慮して、0.5cm間隔で9~11断面( $z=0.5\sim 4.5\sim 5.5\text{cm}$ )、鉛直断面は2.0cm間隔で15断面( $y=1.0\sim 29.0\text{cm}$ )を設定した。この可視化画像は高速度カメラ(Ditect HAS-U1)を用いて1/200sで撮影した。画像は1024×1024 pixelとした。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。検査領域は24×24pixelである。

表-1 実験条件(土砂堆積実験)

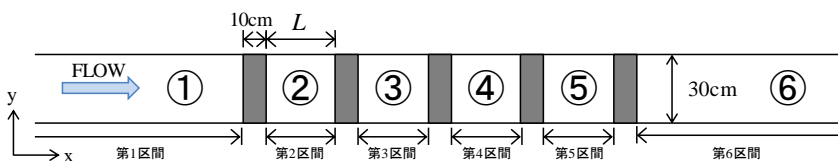
流量 $Q(\text{ls})$	水深 $h(\text{cm})$	平均流速 $U_m(\text{cm/s})$	フルード数 $Fr$	水路勾配 $I$
1.5	4.8	10.4	0.152	1/1000

表-2 実験条件(PIV実験)

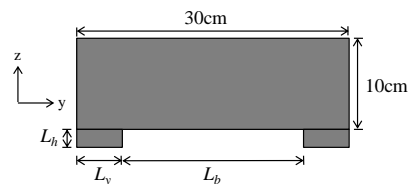
流量 $Q(\text{ls})$	水深 $h(\text{cm})$	平均流速 $U_m(\text{cm/s})$	フルード数 $Fr$	水路勾配 $I$
0.9	4.8	6.3	0.091	1/1000

表-3 実験ケース

case	隔壁間隔 $L(\text{cm})$	河岸からの距離 $L_y(\text{cm})$	開口幅 $L_b(\text{cm})$	開口高さ $L_h(\text{cm})$	穴面積 $A(\text{cm}^2)$
L20y5h2	20	5	20	2	40
L20y5h3				3	60
L30y2.5h2	30	5	25	2	50
L30y5h2(base)			20		40
L30y7.5h2			15	30	
L30y2.5h3			25	3	75
L30y5h3			20		60
L30y7.5h3			15		45



(a) 模型配置状況の平面図



(b) 隔壁模型横断面図

図-1 模型配置概要

### 3. 実験結果と考察（土砂堆積実験）

図-2 に各区間における水深の測定結果を示す。ただし、下流からの距離は上流から5基目の隔壁の下流側を原点とした。また、隔壁間は水路中央の水深を測定した。図-2 から、全ケースにおいて、隔壁を通過するごとに水深が減少していることがわかる。第1区間と第2区間の水位差が最も大きく、第2区間から第5区間までの水深はおおむね流れ方向に直線的に低下している。ケースごとの比較をすると、穴面積が最も小さいケースである L30y7.5h2 ( $A=30\text{cm}^2$ ) において最も水深が増加し、穴面積の最も大きいケースである L30y2.5h3 ( $A=75\text{cm}^2$ ) において最も水深の上昇が小さい。隔壁形状が同じであり、隔壁間隔の異なるケースでは、隔壁設置区間において、距離に対する水深の上昇率はおおむね等しくなっている。

図-3 に水深勾配  $dh/dx$  と開口面積比  $A_R$  の関係を示す。開口面積比とは開口部面積を第2～第5区間の平均水深を用いた断面積で除した値である。図-3 より、水深勾配は開口面積比が増大するとともに指数的に減少することがわかる。

図-4 に隔壁間隔  $L=30\text{cm}$  のケースの中で第6区間までの土砂の移動量が最も大きかった L30y5h2 と最も小さかった L30y2.5h3 の2ケースにおける2時間通水後の土砂堆積の様子を示す。L30y5h2 では、全ての区間の水路中央に土砂が堆積せず、河岸付近に土砂が堆積している。初めに土砂をならして置いた第2区間をのぞく、第3、第4、第5区間においては、構造物の直下流及び直上流部には土砂が堆積しておらず、構造物周辺は土砂が堆積する流れとはなっていないと考えられる。L30y2.5h3 では、第2、第3区間にほとんどの土砂が堆積しており、第4、第5区間にはほとんど堆積おらず、第2区間から第3区間へ土砂が移動している途中過程のように見受けられる。

図-5 に土砂通過率と距離の関係を示す。ただし、1基目隔壁の上流側を原点とした。通過率は、以下の計算式により算出した。

$$\alpha_k = \left( V_{total} - \sum_{n=2}^k V_n \right) / V_{total} \times 100$$

ここで、 $\alpha_k$  : 第  $k$  区間通過率(%),  $V_{total}$  : 各ケースで採取した総土砂量,  $V_n$  : 第  $n$  区間の土砂堆積量である。図-5 から、穴面積が  $45\text{cm}^2$  以下の4ケースで、第6区間まで土砂の半量以上が移動していることがわかる。隔壁間隔及び開口幅の等しい L30y7.5h2 と L30y7.5h3 では、開口高さの低い L30y7.5h2 のケースの方が、第2区間から第4区間通過率が高いものの、第5区間通過率は同じである。また、隔壁間隔及び開口高さの等しい L30y5h2 と L30y7.5h2 では、開口幅の広い L30y5h2 のケースの方が、全区間を通して土砂通過率が高くなっている。このことから、土砂通過率は開口高さより

も開口幅の影響を受け、開口幅が広いケースの方が土砂通過率が高くなるといえる。これは、閉鎖区間に土砂が堆積し、開口幅の狭いケースはその閉鎖区間が大きくなってしまったためであると考えられる。また、隔壁形状が等しく隔壁間隔の異なる L20y5h2 と L30y5h2 においては、隔壁間隔の狭い L20y5h2 のケースの方が、全区間において土砂通過率が高くなっており、これも、閉鎖区間領域の違いによるものであると推察される。

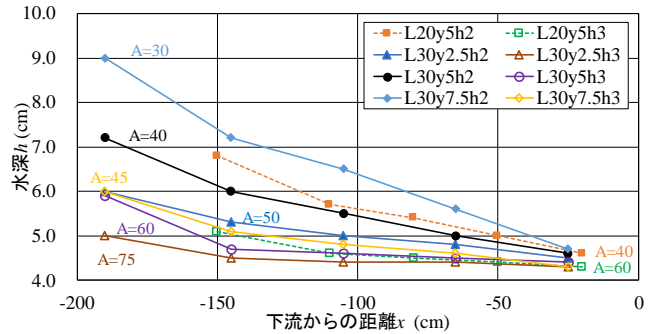


図-2 水深測定結果（土砂堆積実験）

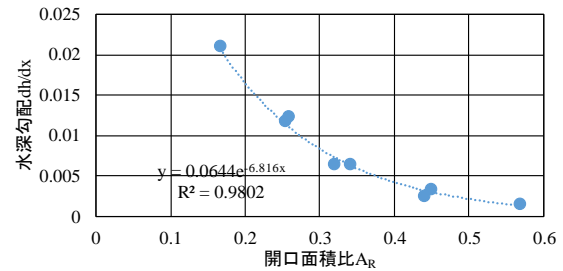
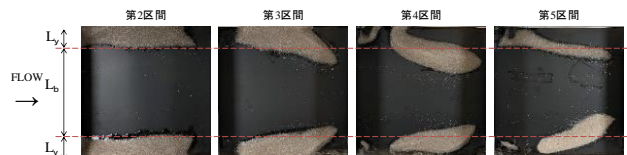
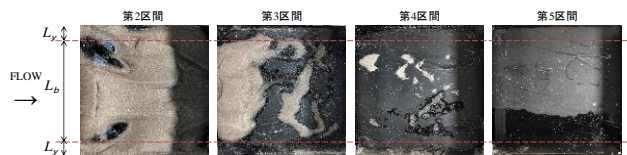


図-3 水深勾配  $dh/dx$  と開口面積比  $A_R$  の関係



(a) case L30y5h2



(b) case L30y2.5h3

図-4 2時間通水後の土砂堆積の様子

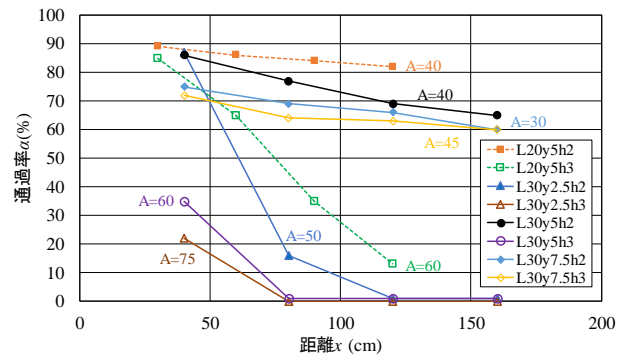


図-5 土砂通過率

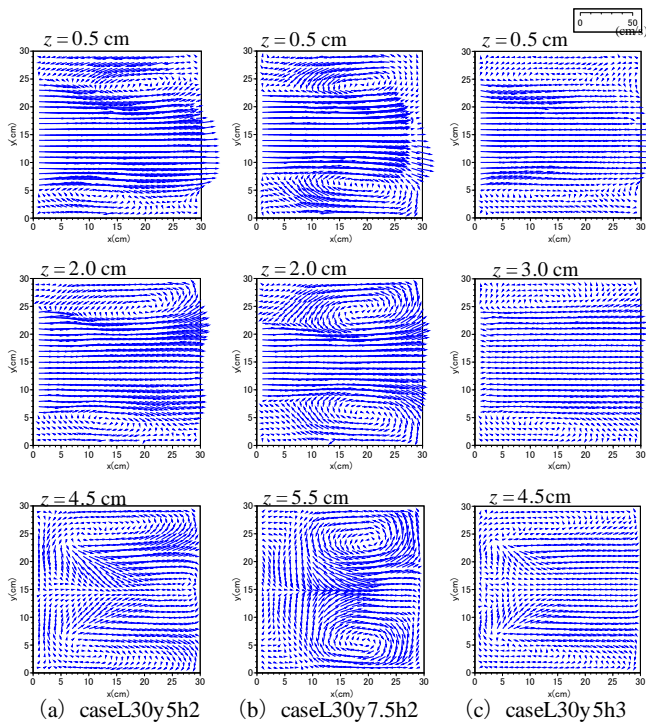


図-6 水平断面流速ベクトル (PIV 実験)

次に、第 6 区間までの土砂の移動がほとんど行われなかったケースの中で、隔壁形状が等しく隔壁間隔の異なる L20y5h3 と L30y5h3 を比較すると、隔壁間隔の狭い L20y5h3 の方が、第 2 区間から他区間への土砂移動量が多いことから、隔壁間隔が狭い方が土砂の移動速度が速いといえる。以上から、穴面積が小さい方が、また、隔壁間隔が狭い方が土砂移動速度が速く、閉鎖区間面積が小さい方が閉鎖区間における土砂堆積量が少なくなるために土砂通過率が高くなるといえる。

#### 4. 実験結果と考察 (PIV 実験)

図-6 に基準のケースとした L30y5h2 と基本ケースよりも開口幅を小さくし、全ケースの中で最も穴面積の小さい L30y7.5h2、基本ケースよりも開口高さを高めた L30y5h3 の 3 ケースの第 4 区間における底層 ( $z = 0.5\text{cm}$ )、各開口高さ位置における平面 ( $z = 2\text{cm}$  または  $z = 3\text{cm}$ )、表層の水平断面流速ベクトル図、図-7 に図-6 と同条件における水平断面主流速コンターを示す。ここで、第 4 区間の上流右岸側最下部を原点とした。

底層では 3 ケースともに、河岸の閉鎖区間が逆流域となっており、開放区間は流下方向に平行な流れとなっている。隔壁通過によって得られた大きな流速は下流側で減少している。また、開口高さ  $h = 2.0\text{cm}$  の 2 ケースでは河岸では明確な平面渦が形成されているが、開口高さ  $h = 3.0\text{cm}$  のケースでは、開放区間の流速が減少したことから、逆流の流速も小さくなっており、平面渦構造が明確でない。開口高さ平面では、開放区間の流れは流下方向に平行な流れとなっているが、底層よりも流速は減少しており、下流に行くにつれて順流範囲が広がり、河岸の逆流域が狭くなっている。 $h =$

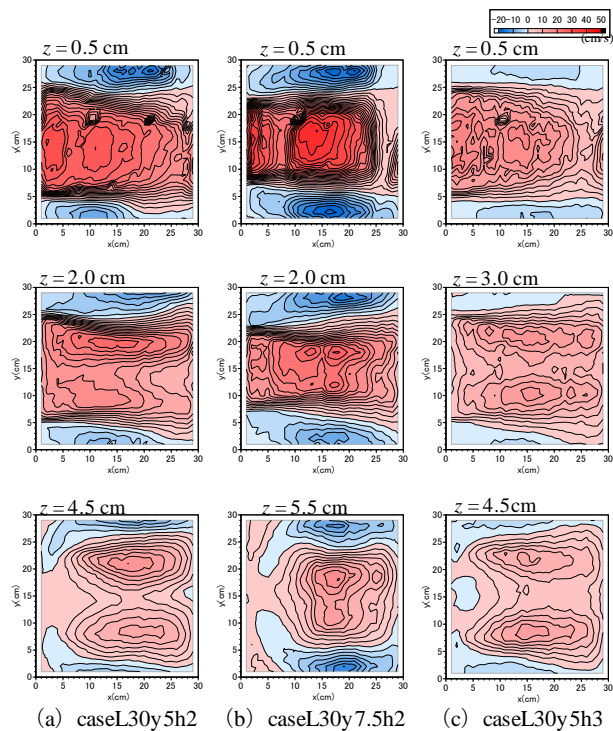


図-7 水平断面主流速コンター (PIV 実験)

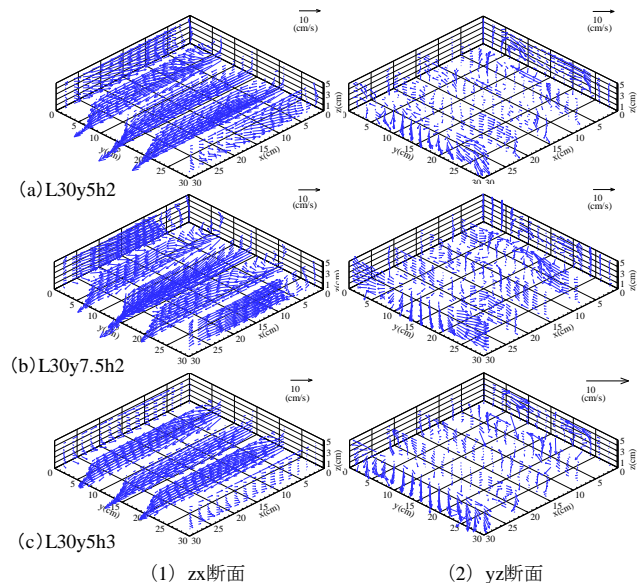


図-8 鉛直断面流速ベクトル (PIV 実験)

2.0cm のケースから、閉鎖区間で底層と同位置に平面渦が形成されていることが分かり、L30y5h3 では、底層よりも明確に現れている。この平面渦は L30y5h2、L30y7.5h2 では下流側に、L30y5h3 では上流側に形成されている。また、主流速のピークは水路中央を挟んで両側に発生している。表層では 3 ケースともに、河岸に逆流がみられ、平面渦が形成されている。開放区間の流れは上流域では河岸から水路中央に向かう流れが顕著となる。L30y5h2 では、上流側壁面開口部近傍に逆流がみられる。また、流速のピークは水路中央を挟んで両側に発生している。

図-8 に図-6、図-7 と同 3 ケースにおける、鉛直断面 (zx 断面および yz 断面) 流速ベクトル図を示す。

L30y5h3 の  $yz$  断面は流速が小さいため、ベクトルの長さを倍にしている。

$yz$  断面流速ベクトルから、河岸では、底層から表層までおおむね逆流となっていることがわかる。穴面積の小さい L30y5h2 と L30y7.5h2 の 2 ケースでは、河岸の上流側に上流壁面に沿って上昇流を伴う横断軸を持つ渦が発生している。また、開放区間の流れは、開口部から流入した直後に、特に  $y=7.0\text{cm}$  と  $y=22\text{cm}$  では上昇流が発生しており、これに伴い、上流壁面に沿って下降流を伴う横断軸を持つ渦が発生している。この流れは  $h=2.0\text{cm}$  のケースで顕著である。上昇した後の開放区間の流れはおおむね流下方向に平行な流れとなっているが、下流側開口部に向かって下降しながら流出している。

次に、 $yz$  断面流速ベクトルより、いずれのケースでも、上流側では水路中央へ向う流れ、下流側では河岸へ向う流れとなっていることがわかる。上流壁面近傍では、両岸で上昇し水路中央で下降する一対の 2 次流渦構造が確認できる。また、下流側では両側岸付近に側岸に沿って下降する流れを伴う 2 次流の形成が見られる。

以上より、ケースによって強さや発生位置の違いは見られるものの、ほぼ同様の 3 次元流れ構造を示しているといえる。

図-9 に図-5 と同 3 ケースの  $x=3.0\text{cm}$ ,  $y=15.0\text{cm}$  における主流速鉛直分布を示す。穴面積の小さいケースから順に断面最大流速が大きくなっている。また、3 ケースともに、開口高さより上の領域では流速が小さく、開口高さ領域において流速が大きくなり、開口高さ中央付近にピークを持つ流速分布となっている。

## 5. 数値計算

模型実験 (PIV 実験) の計測値と比較し、再現性の検討を行う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 のソルバーのうち 3 次元計算モデルである NaysCUBE を用い、乱流モデルには二次元非線形モデル  $k-\varepsilon$  モデルを、移流項の空間差分スキームには三次精度 TVD-MUSCL スキームを用いた。実験条件、ケースは PIV 実験の際と同様である。格子は、 $x$  方向に 1500,  $y$  方向に 60,  $z$  方向に 5 とした。

図-10 に図-6 と同条件の L30y5h2 の水平断面流速ベクトルと水平断面主流速コンターを示す。ここで、第 4 区間の上流右岸側最下部を原点とした。底層では、開放区間は、おおむね流下方向に平行な流れとなっている。また、河岸付近に逆流がみられる。しかし、PIV 実験では、閉鎖区間全体に平面渦が形成されていたが、数値計算では上流の狭い範囲のみでしか形成されなかった。さらに、PIV 実験では、開放区間の上流側の流速が大きくなっていたが、数値計算では、下流側の流速が大きく、両岸へ広がっている。開口高さでは、底層

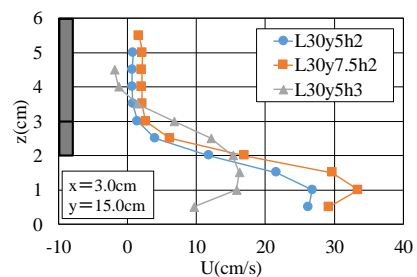


図-9 主流速鉛直分布

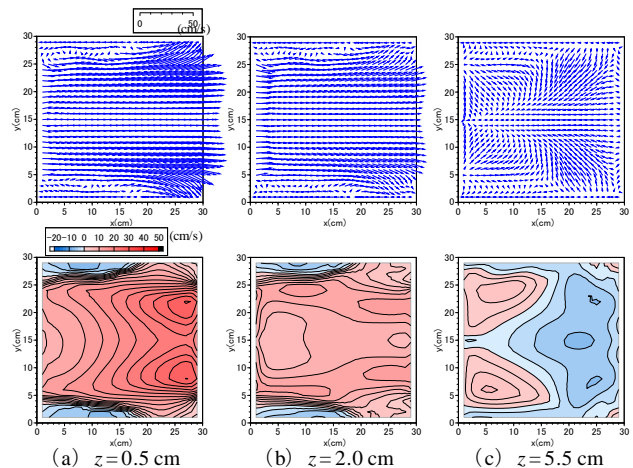


図-10 L30y5h2 における水平断面流速ベクトル (上) と水平断面主流速コンター (下) (数値計算)

と同様の流れ構造となっており、閉鎖区間における平面渦も形成されていない。表層では、逆流域が大部分を占めている。また、順流域、逆流域となる領域が PIV 実験とは異なり、平面渦もみられなかった。PIV 実験では平面渦構造が支配的であったが、数値計算では開口部より上方での横断渦が支配的となっており、再現性が得られなかった。

## 6. おわりに

今回、土砂堆積実験、PIV 実験により、鼻ぐり井手構造の隔壁形状、隔壁間間隔を変えることによる、土砂輸送能力、流れ構造の変化を検討した。土砂堆積実験により、穴面積が小さいと時間当たりの土砂の移動量が大きくなるが、水深が上昇すること、また、閉鎖区間において土砂堆積が生じることがわかった。また、PIV 実験より、流れ構造は隔壁形状によらずおおむね同様であるが、開口幅が小さいほど逆流域が大きくなり、平面渦構造が明確に現れること、開口領域において隔壁通過流速がおおむね維持されること、また、底層領域外では流速のピークが中央より左右にずれた位置に現れることがわかった。以上より、鼻ぐり井手構造を水路へ設置する際には、水深上昇の許容範囲や求められる土砂輸送能力を、隔壁を設置する水路に合わせて検討し、構造を決めなければならない。中村公園においては、土砂のみならず落葉も堆積しているため、その検討も必要である。数値計算においては、再現性を得ることができなかったため、格子や計算条件の見直しが必要である。