

1. はじめに

近年、都市河川において、流れに多様性を持たせ、生物にとって住みよい環境をつくる、多自然川づくりが盛んに行われている。その一つに、河道に巨礫を配置することで流れに変化を持たせる方法がある。多くの場合で巨礫はランダムに配置されているが、その配置パターンによって出水時の水位増大をもたらす危険性が懸念される。そこで本研究では、環境改善目的で導入される大粗度の配置が治水上与える影響について水位上昇量の観点から水理実験と2次元浅水流モデルによる数値計算を行い、大粗度の配置による影響について水理学的検討を行った。

2. 実験装置および方法

大粗度の河床全面に対する空間的配置法の影響に関する実験については、長さ7.5m、幅0.3m、勾配1/500の水路を用いた。水路の上流端から1.5mから6.5mを計測区間とし、2.5mから5.5mの区間に、巨礫に見立てた鉄製の立方体(3cm×3cm×3cm)を配置した。水路に水を循環させ、一断面について流れ方向にポイントゲージを用いて水面形を測定した。計測位置は、水路の壁から0.15m(水路中央)とした。実験は面積密度と配置を変化させて行った。

表1、図1に実験ケースを示す。多様な流れが生じるように、各配置は千鳥格子型をとった。まず、同一水平面積率で水路断面に占める障害物の面積の横断方向遮蔽率の違いによる水位と粗度係数の違いを調べるために、横断方向の角柱の個数を変化させたcase1, case2, case3を行った。次に、粗度による水深と粗度係数の違いを調べるためにcase5, case7を行った。case7はcase6の横断方向間隔を変化させた比較実験である。また、同一の横断方向遮蔽率で粗度間隔の違いによる水位と粗度係数の違いを調べるために、case1, case2の比較実験として、case4, case6をそれぞれ行った。それぞれのケースについて、5種類【(a)14.32 l/s ,(b)10.62 l/s ,(c)9.25 l/s ,(d)6.77 l/s ,(e)4.00 l/s】の流量について実験を行った。

さらに、粗度の流れ方向間隔による影響を調べるために、長さ4.5m、幅0.1m、勾配1/200の水路を用いた。水路の上流端から1.0mから4.5mを計測区間とし、全計測区間の両側壁に、巨礫に見立てた鉄製の角柱(1cm×1cm×1.1cm)を配置した。流量は1.39 l/s、粗度の流れ方向間隔が32cm, 16cm, 8cm, 4cmのそれぞれr32, r16, r8, r4の4つのケースについて実験を行った。

3. 数値計算法とその結果

大粗度の抵抗の大きさを推測するために、一次元不等流計算および水深平均2次元浅水流方程式を用いた計算の2通りを考える。大粗度の抵抗の大きさは実験からは水位上昇量として評価される。1次元計算では粗度係数で抵抗を与えることが必要であり、実験値を説明する粗度係数の値から評価することになるのに対し、2次元数値計算では粗度を配置した場合の河床形態の変化を与えるのみで水位上昇量が計算される。したがって、2次元計算では特に付加的なパラメータを与える必要はないはずである。

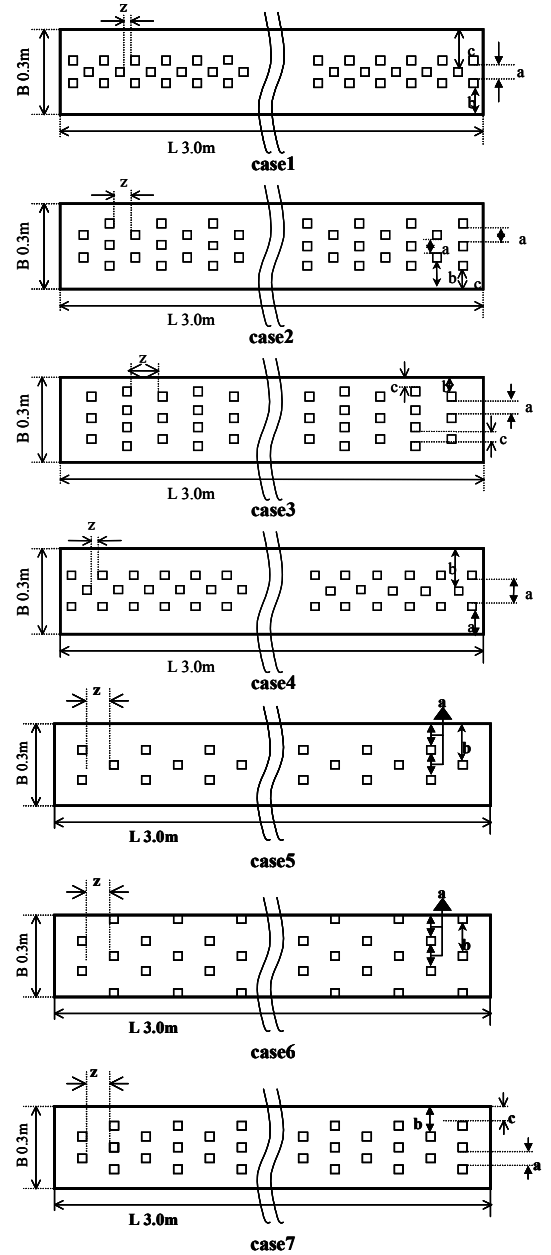


図1 実験ケース

表1 実験ケース

case no.	鉄柱の数	配列パターン	横断間隔 a	横断間隔 b	横断間隔 c	縦断間隔 z
1	80	2⇒1	5	9.5	13.5	2.5
2	80	2⇒3	5	9.5	5.5	6.2
3	80	3⇒4	5	5.5	3.6	9.6
4	80	2⇒1	8	13.5	-	2.5
5	39	2⇒1	8	13.5	-	8
6	65	2⇒3	8	10.5	-	8
7	65	2⇒3	5	9.5	5.5	8
r32	24	-	8	0	-	32
r16	46	-	8	0	-	16
r8	90	-	8	0	-	8
r4	178	-	8	0	-	4

まず、過去の研究において、一次元不等流計算によって粗度による形状抵抗の増加をマンシングの粗度係数によって表現している。マンシングの粗度係数は次式で与えられる。

$$n = \frac{A}{Q} R^{2/3} I_e^{1/2} \quad (1)$$

ここに  $A$  は断面積,  $R$  は径深,  $I_e$  はエネルギー勾配である。等流であればエネルギー勾配から  $n$  を算定できるが、本実験では水深が流下方向に大きく変化するためこれが適用できない。そこで、一次元不等流計算によって水面形が一致するように粗度係数を推定した。一次元開水路流の連続式と運動方程式は次のようである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial uA}{\partial x} = 0 \quad (2) \quad \frac{\partial uA}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot uA}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - gA \frac{n^2 u}{R^{4/3}} u \quad (3)$$

ここに、 $u$  は断面平均流速,  $H$  は水位である。水面形が実験結果と一致するように粗度係数  $n$  の値を求めた。その際粗度区間全体で一様な粗度係数ではうまく一致しなかったため、粗度区間の上流域と下流域で粗度係数を変化させた。

その結果の一例を図2に示す。ここでは改めて、計算から得られた粗度係数を面積平均した粗度係数  $n_3$  について粗度配置との関係を検討する。粗度設置が及ぼす影響指標として、粗度設置区間上流端の水深の粗度非設置のケースからの増加率  $\Delta h/h_0$  と上述の粗度係数  $n_3$  の変化を検討した。粗度配置を表現するパラメータとしては、横断面遮蔽率  $\beta'$  ( $= mk^2/Bh_m$ ) を用いた。図3、4にこれらのパラメータと水深増加率および粗度係数の関係をそれぞれ示す。水深増加率と粗度係数が若干異なる傾向を示す。いずれの場合も最も遮蔽率の大きい case3 が他と大きくはずれ、小さな値を示す傾向にある。水深増加率では case1, 4 グループ, case2, case5, 6, 7 グループの順で小さくなっているが、粗度係数ではこれらすべてがほぼ1直線上に分布している。水深増加率で見た場合、縦断方向の間隔の影響が見られるが、粗度係数で見た場合は縦断方向間隔はほとんど影響していないといえる。この傾向は栈粗度の結果とは異なる。横断面遮蔽率が大きくなると case3 のように他の影響が現れるものと考えられるが、この点についてはさらに条件を変化させた実験が必要である。

2次元の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。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

ここに、 $\tau_{bx}, \tau_{by}$  は各方向の底面せん断応力でマンシング式で与えられ、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$  はレイノルズ応力であり、渦動粘性モデルで与えられる。乱流モデルには Rodi らによる水深平均の  $k-\epsilon$  モデルを使用した<sup>13)</sup>。マンシングの粗度係数は滑面での値  $n=0.009$  を与えた。格子間隔は  $x$  方向には粗度配置区間では 5mm これ以外の上下流では 10mm,  $y$  方向には 5mm とした。また、この計算では水深平均流速による計算であり鉛直方向の流速分布が考慮されないため、粗度が水没する条件においては、粗度前面の淀み領域及び背面の後流域を正確に考慮することができない。一般的な水深平均2次元の  $k-\epsilon$  モデルにおいて、この点を

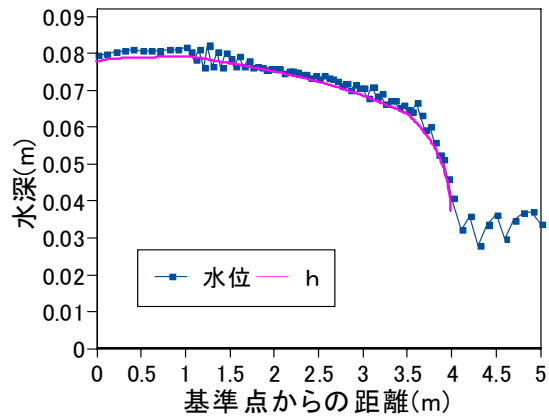


図2 1次元不等流計算による水面形計算結果

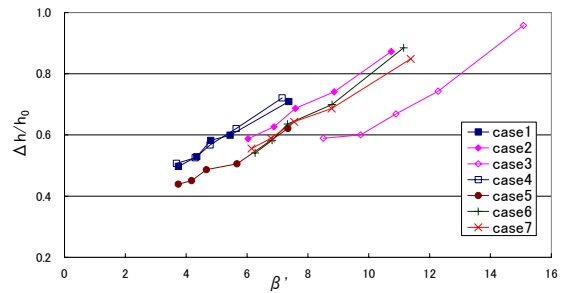


図3  $\beta'$  と水深増加率の関係

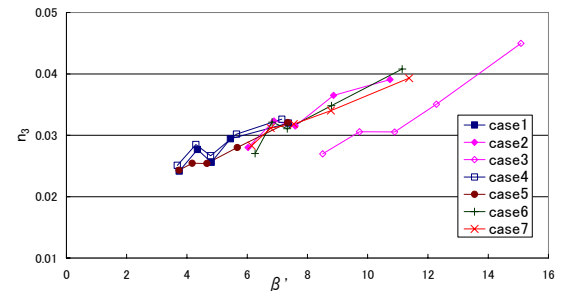


図4  $\beta'$  と平均粗度係数の関係

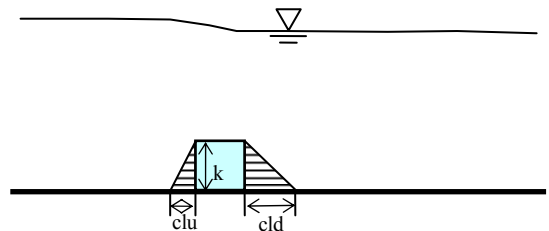


図5 粗度前後の死水域の設定

一般的に水深平均2次元の  $k-\epsilon$  モデルにおいて、この点を

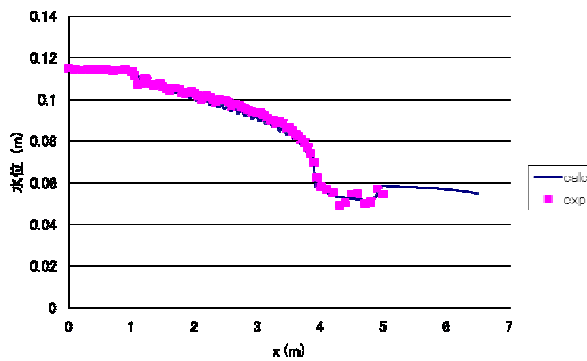


図6 二次元計算結果

考慮するために、粗度の上流部と下流部に図5に示すような粗度高さに比例する死水域をパターンを変化させて想定し実験結果と比較検討した。これらの結果から本計算では  $clu=0.5k$ ,  $cld=1.0k$  とした。この死水域を組み込んだプログラムでの計算結果の一例を図6に示す。また、水深増加率の計算値と実験値の比較を図7に示す。case-4 および case-5 において計算値が過大評価となるものの、計算結果特に新たな付加抵抗を加えること無しに全てのケースにおいて概ね整合性がみられ、水面の波形も再現できた。

#### 4. 水深平均浅水流における水没大粗度の組込に関する考察

図8、図9は死水域長さの効果を Case1-1 について検討した結果を水位の縦断分布によって示す。cld を大きくするとともに水位上昇量が減少する。cld の設定だけで水位上昇量を一致させようとする、cld=5.0 程度が必要になるが、PIV によれば死水域は粗度高さ程度であったことから、適切ではないと考えられる。一方 clu の増加によっても同様な水位上昇量の減少が見られる。そこで、両者を組み合わせることで最適値を決定した。さらに、詳細に検討するために、主流速  $U$  水路中央の粗度部分の縦断分布を図10に示す。中央粗度に沿う  $U$  は Run-1 ( $clu=0.0$ ,  $cld=0.0$ ) では粗度後方の流速低下が著しいのに対し、Run-2 ( $clu=0.5$ ,  $cld=1.0$ ) では粗度後方の流速低下が緩やかになっている。U の横断分布では、Run-2 において側方粗度上に沿って粗度上下流の流速低下が見られなくなる。Run-1 では側方粗度から側壁にかけて主流速が増大し大きな勾配を取るのに対して Run-2 ではこの部分の勾配が緩和される。次に、粗度近傍の水面変化を図11に示す。意外なことに Run-2 の方が粗度上流側の水面低下が大きい。しかし、粗度下流の水深の回復が大きく下流の粗度前方では Run-1 よりも水深が大きく回復する。この結果水位上昇が抑制されることになる。実際、実験では水面は波状の分布を示し、Run-2 における大きな波状分布も妥当な結果と言える。死水域を設けることで、流速変化は緩和されるのに対して水面変化が拡大され、その結果水位上昇が抑制されたことになる。すなわち、流速勾配の緩和によって応力が減少した分、圧力変化が大きくなり、総和としての抵抗は減少したといえる。

#### 5. 大粗度配置による抵抗の評価

r32, r16, r8, r4, それぞれのケースについて、水深平均二次元浅水流方程式を用いた計算を行い、それぞれの実験結果と重ね合わせた。その一例を図12に示す。整合性は高く、この結果からも、粗度の前後に死水域を作

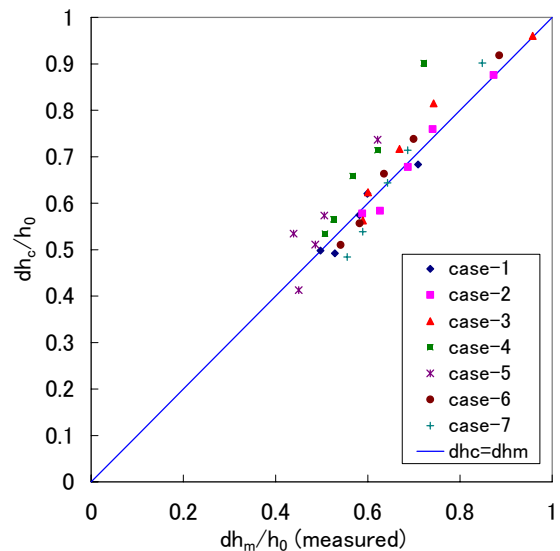


図7 水深増加率の計算値と実験値の比較

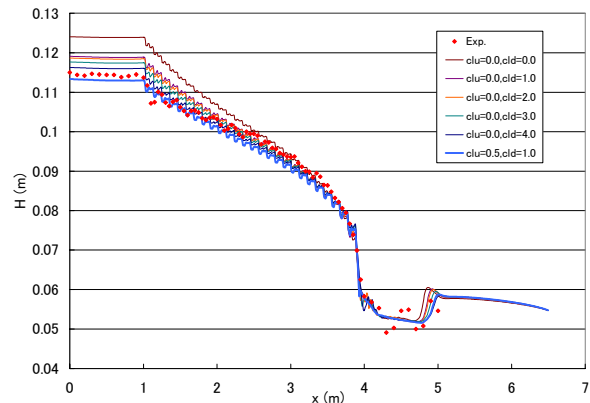


図8 粗度後流死水域長さの水位に与える影響

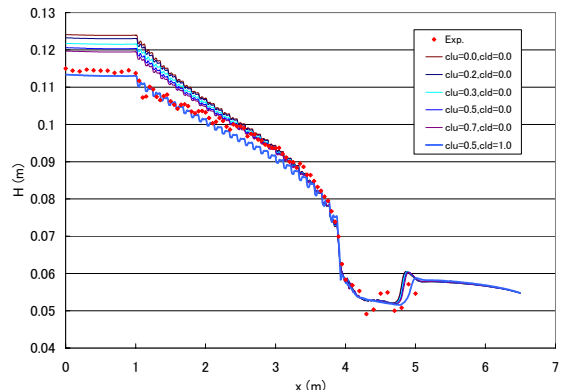


図9 粗度前面淀み域長さの水位に与える影響

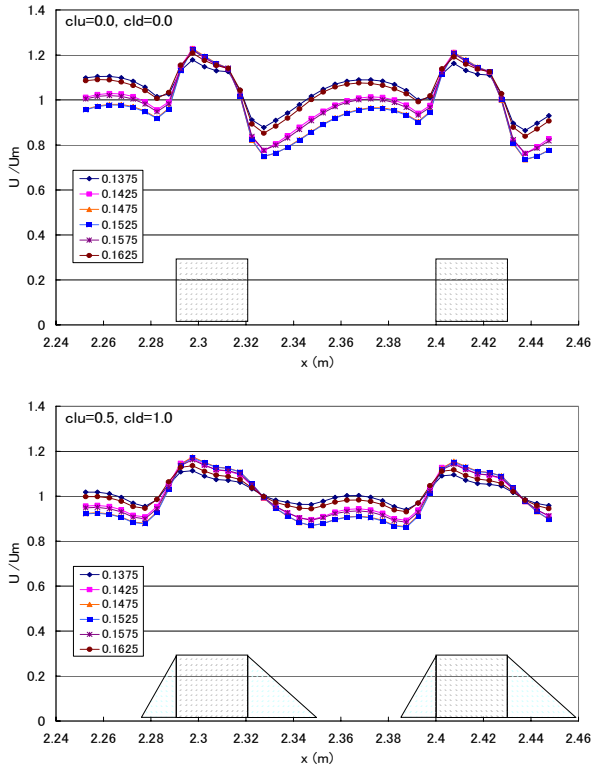


図 10 主流速  $U$  の縦断分布 (上: Run-1, 下: Run-2)

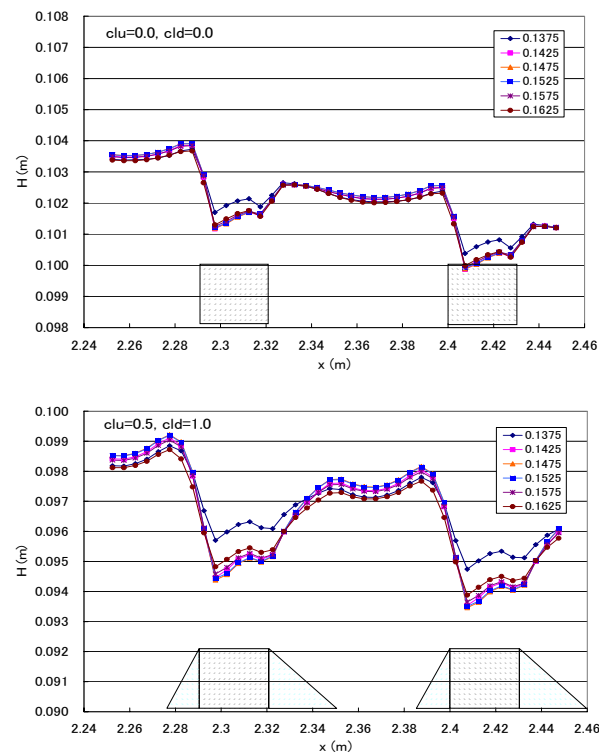


図 11 水面の縦断分布 (上: Run-1, 下: Run-2)

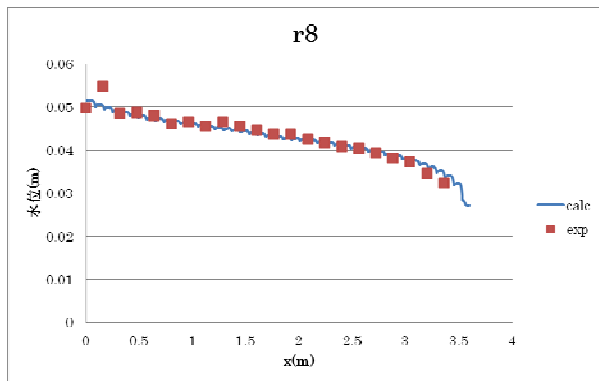


図 12 二次元計算結果

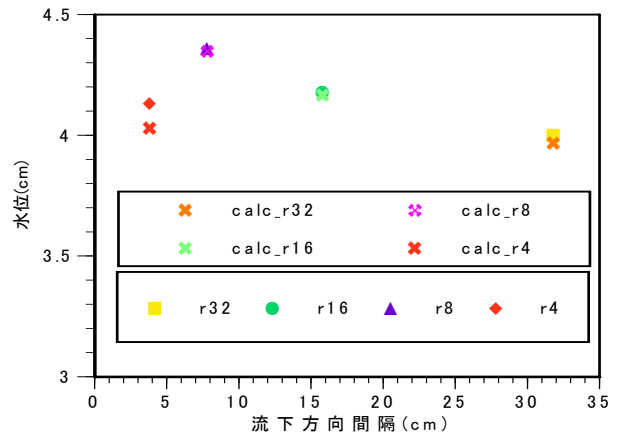


図 13 流れ方向間隔の影響

る方法による計算方法によって粗度を有する開水路流れの水面形を予測することができると言える。また、この実験では流れ方向間隔の一要素のみを変化させているため、前述の実験では複雑に要素が絡み合っていた影響を流れ方向間隔について単純にみることができる。これについて、図 13 に各ケースの平均水深を比較したものを示す。この結果から、r8、流れ方向間隔が 8cm のとき、最も平均水深が上がるということがわかる。そして、より流れ方向間隔の短い r4 のケースにおいて平均水深は減少している。この結果は、富永の研究にある粗度における結果と一致している。よって、イボ粗度においても流れ方向間隔による影響は粗度高さ比 8 程度で最大となることがいえる。

## 6. 結論

今回の水理実験と一次元不等流計算から、巨礫の配置、および密度は、水深と水路の粗度係数において影響を及ぼすことが分かった。密度の変化が与える影響よりも、横断方向遮蔽率、および縦断方向間隔を変化させる事で与える影響のほうが大きいことを示している。さらに、実験結果と水深平均二次元浅水流方程式を用いた計算の結果から、大粗度の前方及び後方に死水域を考慮することによって、計算の精度は向上し、大粗度を有する開水路流れの水面形を推測することが可能であるといえる。その死水域については、粗度高さによって変化し、上流側では粗度高さの 0.5 倍、下流側では粗度高さと同じだけの長さを底辺とする直角三角形を考えた時に最も実験と整合性のある結果がでる。しかし、死水域の選定については、その根拠などについて更に研究を進める必要がある。