

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，山崎川の巨石設置区間をイメージした水路実験によって，巨礫の配置による水位変化，粗度の違いについて水理学的検討を行った．

2. 実験装置および方法：水理実験は，現地観測によって得られた山崎川の河床断面形状をもとに，山崎川の 1/35 縮尺模型を想定して行った．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粗度要素（3cm × 3cm × 3cm）を配置した．実際の山崎川における巨礫の大きさについて，サンプル 10 個の平均面積は 1.08 m²であった．また，観測区間（12.6m × 150.0m）に巨礫は 135 個あり，河道における巨礫の水平面積率は約 7.7%であった．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．

3. 実験ケース：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（ $=mk/B$ ， m は横断方向の粗度数， k は粗度の幅， B は水路幅）の違いによる水位と粗度係数の違いを調べるために，横断方向の粗度要素の個数を変化させた case1，case2，case3 を行った．次に，粗度密度（ $=nk^2/BL$ ， n は全粗度数， L は粗度区間長）による水深と粗度係数の違いを調べるために case5，case7，case8 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要素間の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 パターン【(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．また（ $=z+k/k$ ）は縦断方向相対間隔である．

4. 粗度係数の算定方法：巨礫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することを試みた．マンシングの粗度係数は次式で与えられる．

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

ここで 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，

表 1 実験ケース

case no.	粗度要素の数	配列パターン	a	b	c	z			
1	80	2 1	5.0	9.5	13.5	2.5	0.30	1.83	0.080
2	80	2 3	5.0	9.5	5.5	6.2	0.50	3.07	0.080
3	80	3 4	5.0	5.5	3.6	9.6	0.70	4.20	0.080
4	80	2 1	8.0	13.5	-	2.5	0.30	1.83	0.039
5	39	2 1	8.0	13.5	-	8.0	0.30	3.67	0.065
6	65	2 3	8.0	10.5	-	8.0	0.50	3.67	0.065
7	65	2 3	5.0	9.5	5.5	8.0	0.50	3.67	0.065
8	9	2 1	8.0	13.5	-	40.3	0.30	14.43	0.009

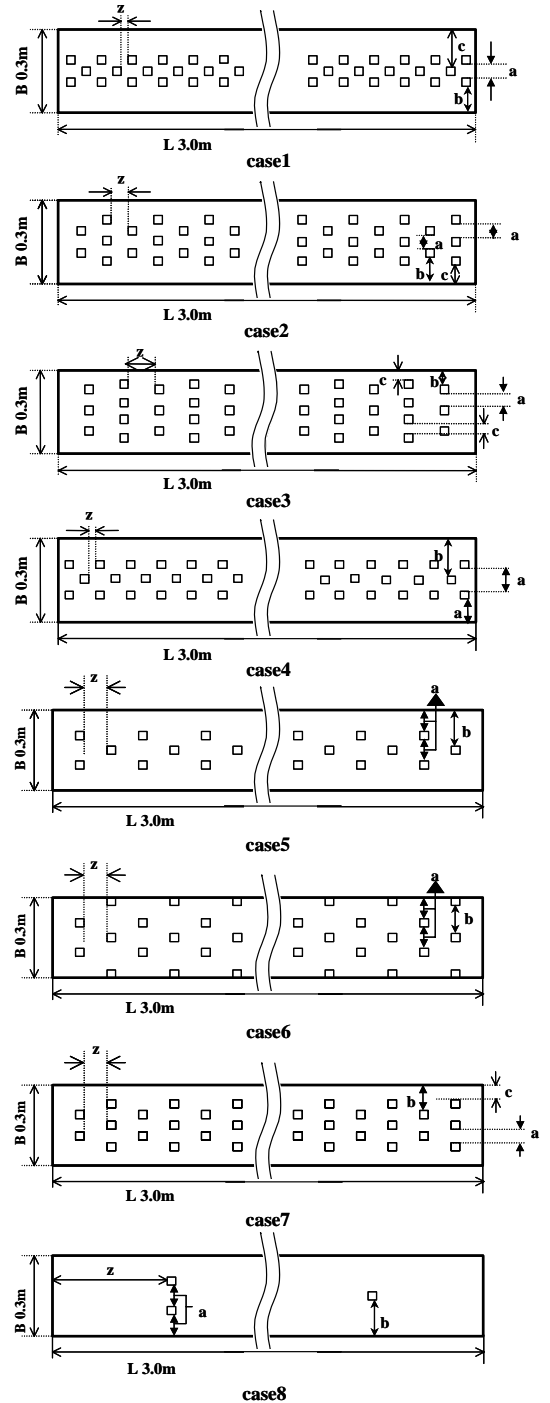


図 1 実験ケース

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する事とした．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．

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

ここで、 u は断面平均流速、 H は水位である．式(3)を有限体積法で離散化し、水深の変化は連続式(2)より圧力方程式を導くSIMPLE法を適用した．計算開始点を粗度域下流端の限界水深発生地点とし、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．以後これらを面積平均した粗度係数 n_3 について検討する．

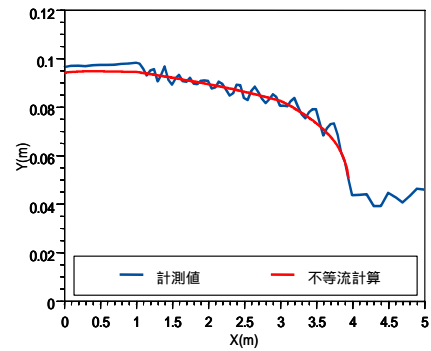


図2 不等流計算

5. 実験結果と考察：case1, case2, case3の水面形を比較して、粗度密度が同じ時、配置による水深の変化を調べる．水面形、粗度係数の比較を図3，図4に示す．配置を変化させることで、横断方向遮蔽率、縦断方向間隔が変化する．case2, case3でほぼ同じ水面形を示し、case1の水面形よりも大きな値を示した．case5, 6, 7の結果を合わせると横断方向遮蔽率の増加とともに、粗度係数が増大する傾向が認められるが、縦断方向間隔の組み合わせによって、抵抗が変化することがわかった．次に、粗度要素の数を減らして、粗度密度を変化させたときの変化について case1, case5, case6を比較した結果を、図5，図6に示す．最も粗度密度が小さいcase5では水深が小さいが、case1よりも粗度密度が小さいcase6のほうが、水深は大きくなっている、粗度係数からも、水深の関係と同じことが言える．また、横断方向間隔を変化させた、case1とcase4, case6とcase7をそれぞれ比較した結果を図7，図8に示す．水面形、粗度係数ともに同じような結果となり、本実験では、横断方向間隔の変化は、水深、粗度係数にほとんど変化を及ぼさないことがわかった．また、粗度係数は流量の減少とともに増大する特徴が認められた．

6. 結論：今回の水理実験と不等流計算から、巨礫の配置および密度は、水深と水路の粗度係数に対して影響を及ぼすことがわかった．また、密度が小さい場合でも、その配置によって密度が大きな配置よりも粗度係数が大きくなる可能性があることがわかった．これは、場合によっては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の影響のほうが大きくなることを示している．これらの結果から、多自然川づくりにおいて、巨礫を配置して流れに変化をもたせる場合には、その密度だけでなく、横断方向遮蔽率および縦断方向間隔に注意を払う必要がある．

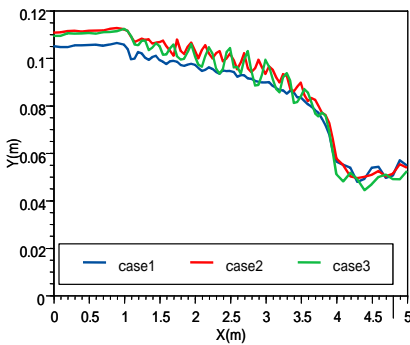


図3 横断方向遮蔽率による水面形の変化

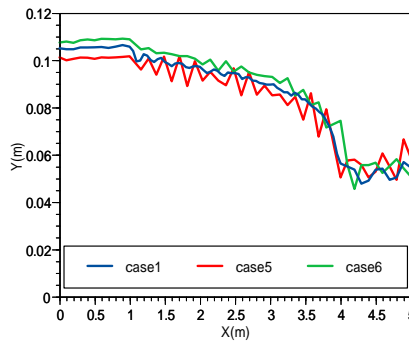


図5 粗度密度による水面形の変化

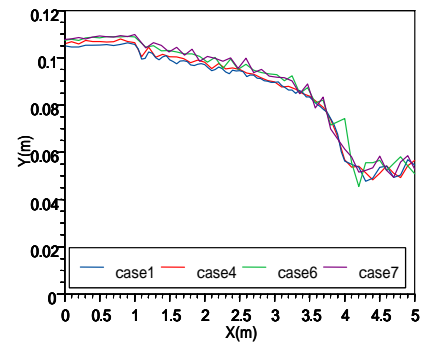


図7 横断方向間隔による水面形の変化

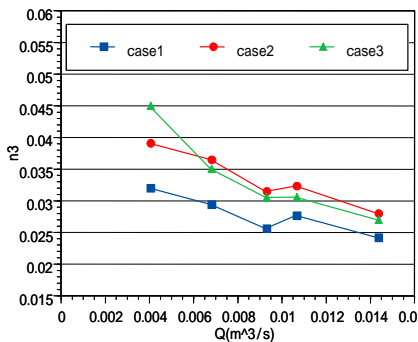


図4 横断方向遮蔽率による粗度係数の変化

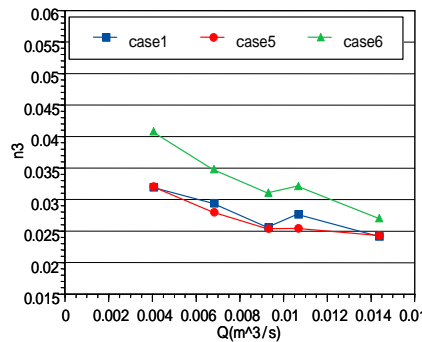


図6 密度による粗度係数の変化

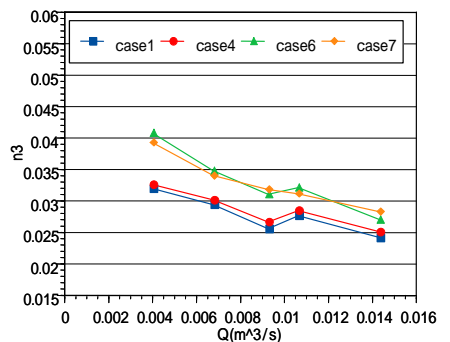


図8 横断方向間隔による粗度係数の変化