

# 平坦河床上に設置した置石周辺の流れと河床変動に関する実験的研究

神田 佳一\* 野村 麻利恵\*\* 渡部 守義\*

## Experimental Study of Flow Characteristics and Bed Deformation around Stones Placed on Flat River Beds

Keiichi KANDA\*, Marie NOMURA\*\*, Moriyoshi WATANABE\*

### ABSTRACT

To the Izushi river basin, typhoon No. 23 came in 2004, causing a great deal of damage such as washout of banks and flooding. During the restoration of riverbeds attempted after the typhoon, an investigation of river building was promoted to ensure the safe flow of floodwaters and creation of diversified river channel spaces with rich natural environments, even at low water levels.

In this study, we specifically examined stone placement work for the creation of diversified river channel space, such as rapids and deep pools without deteriorating downflow capability. For straight river channels downstream of the Izushi River Basin, we placed stones at one riverbank. In order to verify the effects obtained by this work, we performed experimental investigations relating to flows around the placed stones and bed deformation during flooding with flows of as much as the annual maximum flow. When the row of groups of placed stones was placed at the left bank of the water channel, velocity was reduced because of increased resistance in the area where the stones placed: the water level increased; simultaneously, the transverse flow velocity in the right bank side became prominent. Sand bars developed in a single row from the center area in the water channel to the right bank downstream from the of placed stones. It was considered that, even under static conditions where dragging force at uniform flow became less than the critical tractive force of riverbed materials, when groups of placed stones are installed at one side bank, a certain level of local riverbed fluctuations could be expected without great loss of the capability of river channels.

**KEY WORDS:** stone placement work, bed deformation, experimental investigation

### 1. はじめに

我が国は、地形的・気象学的に洪水災害が頻発する条件下にあって、遠く古来より人命や財産、農作物などを水害から守るために堤防や護岸工事など様々な治水事業を行ない、川と向き合ってきた。明治以後の近代土木技術の発展に伴って治水安全度が向上する一方、人口の集中する都市部では、川は直線化され、魚や水生生物の住みかが消失するなど、自然環境の破壊が急速に進行している。このため今日では、本来の川が持つ多様な豊かな自然環境を取り戻すために、石材や木材を多用した多自然河川工法が多く採用される傾向にある<sup>1)</sup>。低平地の沖積河道においても、防災面から河積の確保と安定が求められる一方、生態系の保全や

景観等の環境面から、瀬や淵などの多様な空間の創出が求められている。

但馬地方を流れる円山川水系出石川流域では、平成16年の台風23号によって堤防の決壊や越水などの多大な洪水災害が生じた。その後の河道復旧においては、安全に洪水を流下させるとともに、低水時においても、多様な河道空間と豊かな自然環境を創出するための川づくりが検討されている。

本研究では、円山川水系出石川下流の直線河道を対象として、河岸の一方に置石を設置することにより、流下能力を阻害することなく、瀬・淵等の多様な河道空間を創出するための置石工に着目し、その効果を検証するため、年最大流量規模の小洪水時における置石周辺の流れや河床変動に関する実験的検討を行った。

\*都市システム工学科 \*\*建築・都市システム工学専攻

## 2. 出石川流域の概要と河道特性

出石川は、兵庫県豊岡市但東町を水源とし、豊岡市街地を北流して円山川に合流する、流路延長 35.4km、流域面積 225km<sup>2</sup> の一級河川であり、流域の大半を豊岡市が占めている (図 1)。近年出石川流域ではコウノトリの放鳥が行われ、平成 16 年の台風 23 号による堤防決壊の復旧工事中に天然記念物のオオサンショウウオが大量に発見されるなど流域の自然環境の保護が求められるようになった。しかしながら、現在の出石川は治水を目的とした護岸工や直線河道が多く、河床も平坦なものが多い。特に、合流点から 3.5km の小坂橋周辺までの最下流部は河床勾配が小さく、写真 1 に示すように灌漑期には取水堰堤の湛水区間であるため、年最大規模程度の洪水流であっても多様な河道空間の形成が期待できない区間となっている。

図 2 は、小坂橋周辺約 200m 区間の河床形状を詳細な現地測量の結果から示したものである。標高 Z=10 m の高さが低水護岸の下端に対応しており、低水路幅は約 40m、河床勾配は 1/1000 程度であることが分かる。また、低水路内は、横断方向にほぼ平坦で一般的な河床形状になっている。河床材料の代表的な粒度分布を示せば、図 3 のようである。平均粒径は約 20mm であって、対象区間は典型的な礫床河川である。本研究では、このような緩流域の直線河道において、流下能力を阻害することなく、瀬・淵等の多様な河道空間を創出するための方策として、直径数 10cm 程度の巨礫を一方の河岸に配して横断方向に流水抵抗を変化させる置石工法の有効性を実験

的に検討する。流量条件としては、年最大規模の洪水流量 ( $Q=270\text{m}^3/\text{s}$ ) を対象とし、置石の対岸側に流れを集中させて横断的な河床変動を生じさせることを目標とする。



(a) 小坂橋上流域



(b) 小坂橋下流域

写真 1 小坂橋上・下流部の流況



図 1 出石川流域と対象地点の位置図

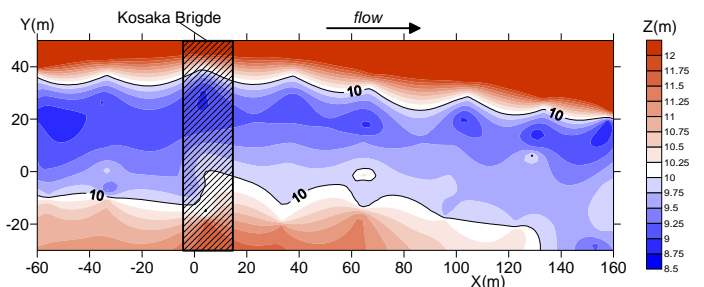


図 2 小坂橋周辺部の河床形状

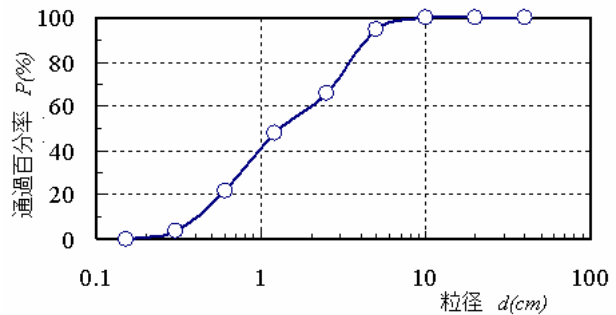


図 3 河床材料の粒度分布

### 3. 置石工周辺の河床変動に関する実験

#### 3-1 実験の概要

実験には、図4に示すような全長6.4m、幅0.8m、高さ0.5mの長方形断面水路を用い、そのほぼ全区間に亘って平均粒径  $d=0.088\text{cm}$  の一様な砂（粗度係数  $n=0.02$ 、限界摩擦速度  $U_{*c}=2.2\text{cm/s}$ ）を13cmの厚さで敷き均した移動床とした。水路の上流端にはフィルター材を用いた整流板を、下流端には任意の角度に調節可能な傾斜式の水位調節板を設置した。水路勾配は、現地河道に対応させて、 $I=1/1,000$  とした。低水路幅を基準とした模型縮尺は  $1/50$  である。

置石模型としては、図5に示す1辺の長さ  $k=1.5\text{cm}$  の六脚ブロックを長さ  $L=30\text{cm}$ 、フランジ幅  $b=10\text{cm}$  のH鋼上に最密に27個設置したものを1ユニットの置石群とした。ブロックの基準面は、ブロックの上面から1.5cm下方（図5のA-A）とし、河床面高さに一致させている。これを図6に示すように、水路上流端より3.2m下流の地点（ $X=0\text{m}$ ）から0.8mの区間の左岸側に3基または5基設置した（写真2）。設置間隔はそれぞれ  $S_b=0.4\text{m}$  及び  $0.2\text{m}$  である。

置石模型の粗度係数は次式に示す足立<sup>2)</sup>の実験式により評価できる。

$$n = \frac{H^{1/6}}{\sqrt{g \left( 24.4 \ln \frac{H}{k} + 12.4 \ln \frac{F_s}{F_H} - 5.47 \right)}} \quad (1)$$

ここで、 $n$  は粗度係数、 $H$  は等流水深、 $k$  は粗度高さ（ $=0.015\text{m}$ ）、 $F_s$  は一個の粗度要素が受け持つ支配面積（ $=9.0 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ）、 $F_H$  は粗度要素の流れ方向の投影面積（ $=2.01 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ）、 $g$  は重力の加速度である。上式を図示すれば、図7のようである。水深が0.1mのとき、置石模型の粗度係数は0.04程度であって、河床砂の粗度係数（ $=0.02$ ）の2倍となる。

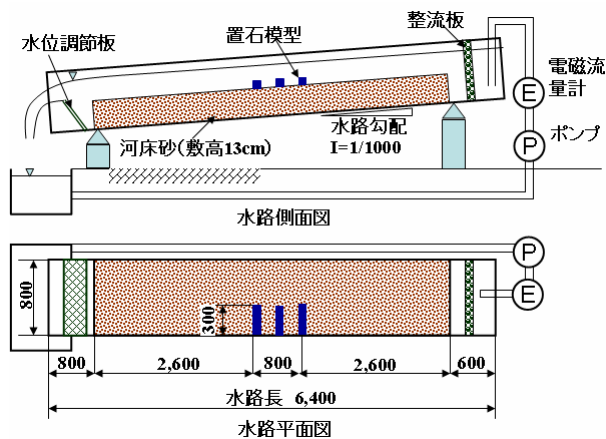


図4 実験水路

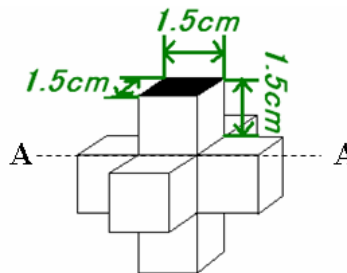


図5 六脚ブロック模型

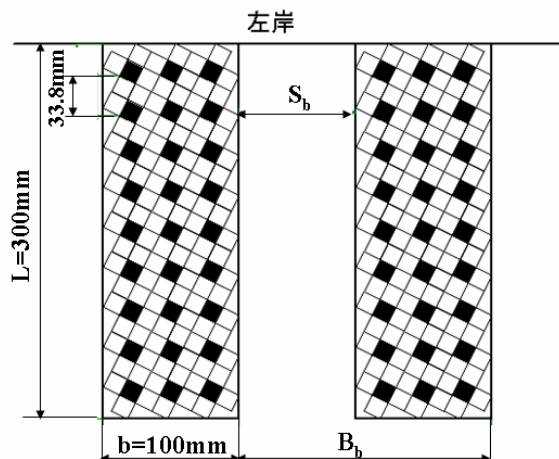


図6 置石群模型の配置



写真2 置石模型の設置状況

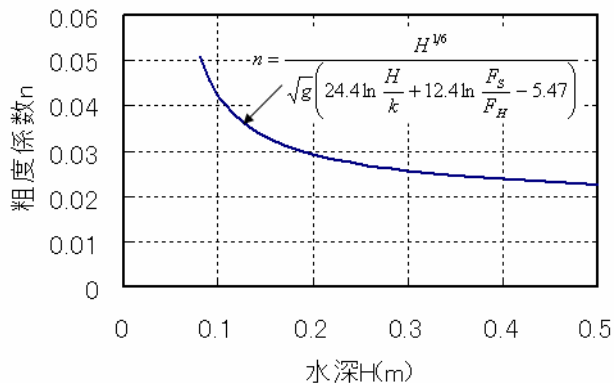


図7 置石模型の粗度係数

水路の座標系としては、実験結果の整理上、第一置石群の上流側左岸を原点として、流下方向に X 軸、右岸横断方向に Y 軸、水路床底面を原点として鉛直上方向に Z 軸の各座標軸をとっている。

実験条件は、表 1 に示す通りである。流量は、出石川小坂橋地点の年平均最大流量 270 m<sup>3</sup>/s をフルード相似則から模型縮尺 1/50 にスケールダウンしたものを基準として、 $Q=13.5$  l/s、 $15.0$  l/s 及び  $17.5$  l/s の 3 通りに設定し、置石群の間隔を  $S_b/b=4$  及び  $2$  の場合について実験を行った。通水時間は、いずれの場合も、それ以上河床変動が生じない平衡状態と判断される  $T=120$  min とした。実験は、いずれの場合も置石設置区間の下流で等流状態となるように、水路下流端の堰高を調節して水位のコントロールを行い、水深の流下方向の平均値を等流水深と定義した。等流状態での摩擦速度は、全ての実験条件において河床材料の限界摩擦速度 ( $U_{*c}=2.2$  cm/s) 以下であって、置石による粗度の場所的变化によって局所的な河床変動を伴う静的な条件にある。

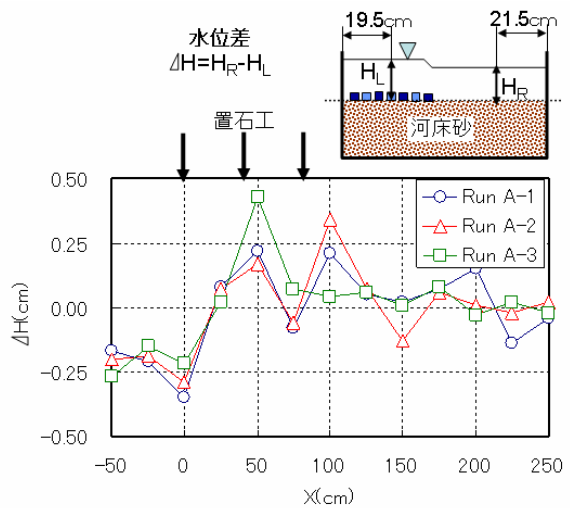
測定項目は、通水中の左右岸水位 ( $Y=19.5$  cm 及び  $58.5$  cm)、表面流速及び通水後の河床位である。表面流速については、粒径  $50\mu\text{m}$  の PVC 粉末をトレーサーとして、その挙動を水路斜め後方からデジタルビデオカメラで撮影し、LSPIV 解析により求めた。解析には、藤田ら<sup>3)</sup>が開発した解析プログラムを用いている。

表 1 実験条件

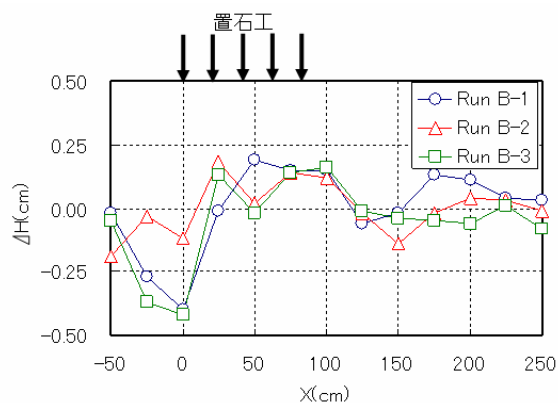
実験番号	置石間隔 $S_b/b$	流量 $Q$ (l/s)	等流水深 $H$ (cm)	摩擦速度 $U_*$ (cm/s)
RunA-1	4	13.5	4.49	1.99
RunA-2		15.0	4.84	2.06
RunA-3		17.5	5.29	2.14
RunB-1	2	13.5	4.52	1.99
RunB-2		15.0	4.87	2.06
RunB-3		17.5	5.32	2.14

### 3・2 置石周辺の流れ特性

図 8 は、各 Run における左右岸の横断方向の水位差  $\Delta H=H_R-H_L$  (右岸側水位が高い場合を正とする) の流下方向分布を示したものである。置石の設置区間より上流部 ( $X=-50\sim 0$  cm) では、置石の抵抗によって左岸側の水位が高くなっており、逆に置石区間及びその下流部では、右岸から左岸に向って水面勾配が生じている。また、置石設置区間では、置石群の設置間隔が大きい程、水位差  $\Delta H$  の流下方向の変動が大きくなっている。



(a)  $S_b/b=4$  の場合



(b)  $S_b/b=2$  の場合

図 8 左右岸水位差の流下方向分布

図 9 及び図 10 は、LSPIV 解析より得られた RunA-3 及び RunB-3 における表面流速ベクトルと流下方向及び横断方向 (右岸方向を正とする) の表面流速成分 ( $U, V$ ) のコンター図を示したものである。

RunA-3 ( $S_b/b=4$ ) の流下方向流速  $U$  についてみれば、水路上流端でほぼ一様であった流れが、第 1 置石群の上流部 ( $X=-20$  cm) の水路中央部から右岸域で加速され、逆に置石の周辺部では急激に減速して横断方向及び流下方向に流速の大きな変化が生じている。一方、横断方向流速  $V$  は、第 1 置石群先端直上流 ( $X=-10$  cm,  $Y=30$  cm) 付近で右岸方向の速度成分が卓越しており、水面の横断方向の変化と対応している。置石群の下流では ( $X>120$  cm)、右岸から左岸に向う流れが生じ、置石群列を迂回して蛇行している様子が見取れる。

置石群間隔の小さい RunB-3 ( $S_b/b=2$ ) の場合においても、同様の流れ特性が認められるが、置石工区間の流下方向流速  $U$  の変化は設置間隔の大きい RunA-3



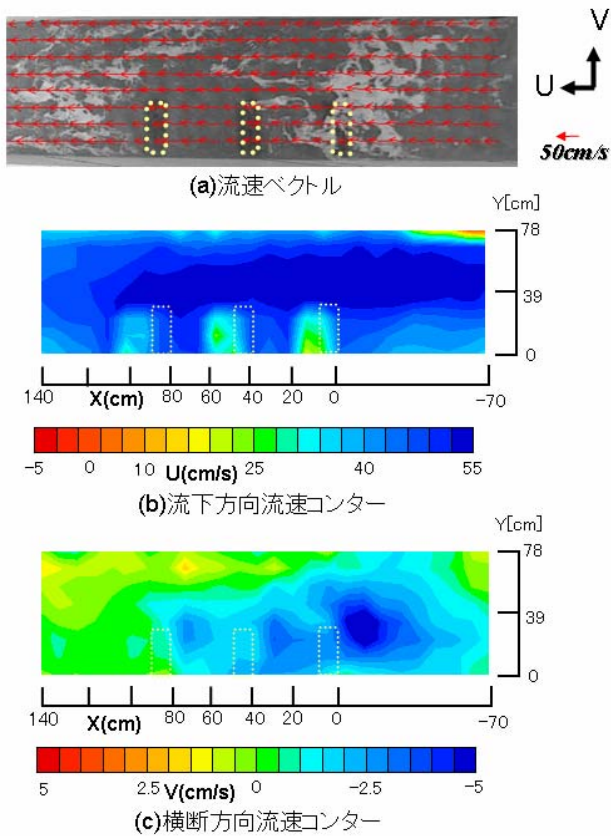


図9 表面流速分布 (RunA-3)

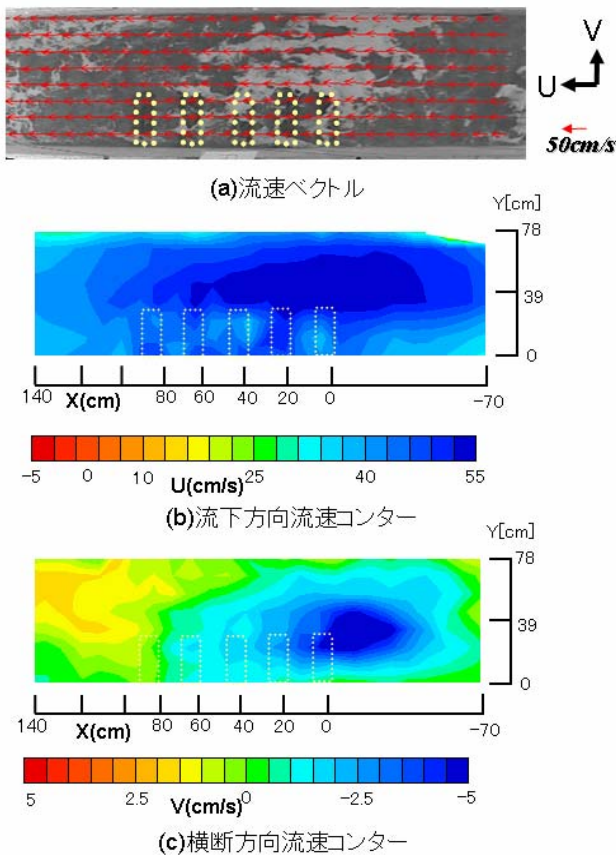


図10 表面流速分布 (RunB-3)

の場合に比べて小さく、置石群先端で見られる右岸方向への水撥ね効果は、第1置石群でのみ顕著である。このことは、RunA-3では各置石群が独立した抵抗粗度として機能しているのに対して、RunB-3では設置間隔が小さい5基の置石群がほぼ連続した粗度として機能していることによるものと考えられる。椀型（あるいは溝型）の粗度要素が相互に干渉することなく単体粗度として作用する境界は、足立の研究<sup>2)</sup>によれば、 $S_b/b=4\sim5$ 以上とされており、本実験結果と対応している。

### 3・3 河床変動特性

図11は、流量が等しいRunA-1及びRunB-1における通水後の初期河床面からの河床変動量を比較したものである。寒色系が洗掘を、暖色系が堆積を表している。同図より、以下のことが伺える。

RunA-1の場合では、それぞれの置石群の先端付近で3cm程度の局所的な洗掘が生じており、各置石群の上流側では堆積が見られる。置石区間の右岸部では一様に1cm程度河床が低下しており、流送された砂が置石下流端水路中央部から右岸方向に $X=200$ cmの範囲で砂州状の堆積地形を形成している。これは、置石群列によって右岸側に偏寄した流れが、下流部で左岸方向に拡散されることにより生じたものと考えられ、前節で述べたように、水流はこの砂州の前縁部を横断して流れるので、その直下流部で河床低下が生じている。

一方、水制群を5基設置したRunB-1 ( $S_b/b=2$ )の場合も、同様の河床変動特性が認められるが、置石群先端の洗掘量は流下方向にほぼ同様であって、置石工の下流部まで広がっており、砂州の前縁部も下流側にシフトしている。

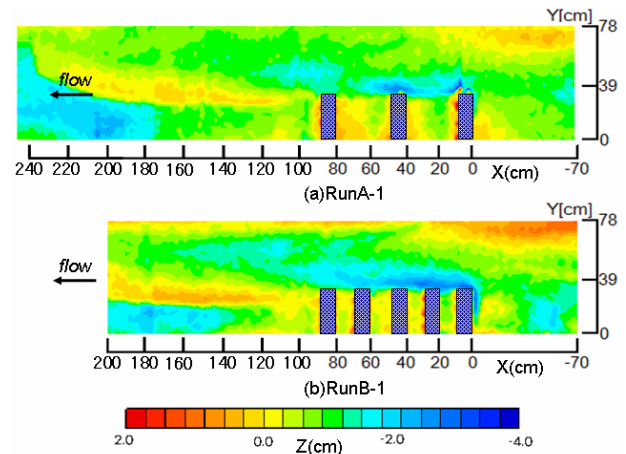


図11 河床変動量のコンター図 ( $Q=13.5$ l/s)

流量による河床変動量の変化を、 $S_b/b=2$  (RunB) の場合について比較したものを図 12 に示す。流量が大きくなるほど置石工先端の洗掘域は右岸側に拡大しており、洗掘量も増加している。

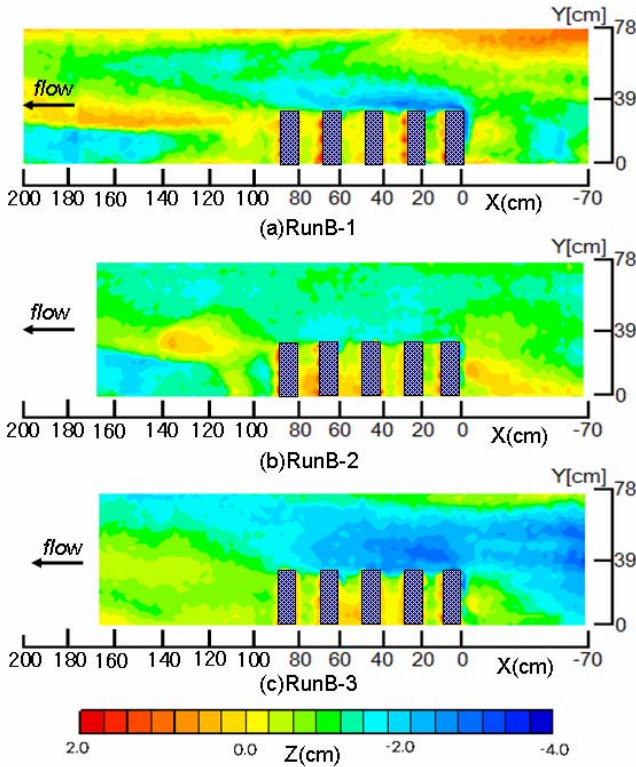


図 12 河床変動量のコンター図 ( $S_b/b=2$ )

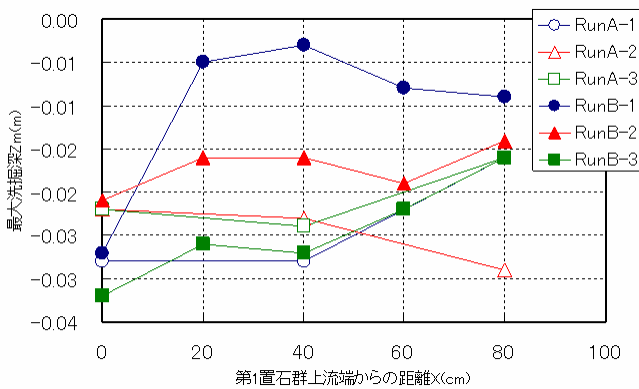


図 13 置石群先端の洗掘深の流下方向分布

図 13 は、各 Run における置石群先端付近での洗掘深  $Z_m$  の流下方向分布を示したものである。図より RunA-2 を除けば、いずれの場合も、第 1 置石群先端での洗掘深が最も大きく水深の 2~4 割程度であって、下流の置石群ほど減少していることがわかる。また、流量の増加に伴って洗掘深は増加するが、その傾向は  $S_b/b=2$  の場合の方が顕著である。

4. おわりに

本研究では、年最大規模程度の洪水流によって多様な河道空間を創出するための置石工法の水理効果について実験的に考察した。得られた所見をまとめると以下のようである。

(1)水路の左岸側に置石群を設置することにより、置石部では抵抗の増大により減速し、水位が上昇するとともに、右岸方向への横断方向流速が卓越し、横断面内で流下方向流速に流速差が生じる。この流速差は、置石群列の設置間隔が大きいほど顕著になる。

(2)置石群の対岸 (右岸側) では、水深の 2~4 割程度の河床低下が生じている。特に、置石群の先端部で舌状の洗掘穴が形成されるが、洗掘深は最上部の置石群で最大となり、下流にいくほど減衰する。置石群列の下流部では、いずれの実験条件においても、水路中央部から右岸方向に単列の砂州が発達する。これは、置石群列によって右岸側に偏寄した流れが、下流部で左岸方向に拡散されることによる生じたものである。

(3)以上のことから、等流時の掃流力が河床材料の限界掃流力以下となる静的条件においても、一方の側岸に置石群を設置することにより、河道の疎通能力を大きく損なうことなく、ある程度の局所的な河床変動が期待できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 山本昇一：日本の水制, 山海堂, pp.393-395, 1996.
- 2) 足立昭平：人工粗度の実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 104 号, pp.33-44, 1964.
- 3) 藤田一郎：PIV 技術の実河川表面流速への応用, 河川技術論文集, 第 4 巻, pp.41-46, 1998.