

# 置石工を有する広開口型わんどの流れ構造と河床変動に関する研究

指導教員 富永 晃宏 教授

石川 光雄

**1.はじめに** 全国各地において自然環境の保全・復元を目指した川づくりが行われてきた。しかし、河川環境の保全・復元に対する取り組みは、明確な目標や計画性を持って実施されたと言うより試行錯誤的に対処されているものが多く、また、その設計・施工に際しての科学的裏づけが明確でなく、実施後の調査や評価も十分にされていない状況にある。平成20年3月矢田川右岸(2.2k+60km)に直線河道に人工的につくられた「矢田川子供水辺わんど」(以下矢田川わんど)が完成した。このわんどは、わんど開口部付近にひし形の置石工が設置されている。その目的はわんど内への流れを誘導することと中洲の創出である。わんど周辺では複雑な流れとなっており、施工直後から著しい土砂の堆積が見られ、河床変動を予測することが必要となっている。本研究では、こうした観点のもと現地観測及び模型実験を行い、矢田川わんどの土砂堆積メカニズムと置石工の役割を明らかにすることを目的としている。また、2次元数値シミュレーションにより、河床変動の再現も試みた。

**2. 現地観測結果** 現地河床形状の測定を6月から11月に計4回行った。その間には度重なる出水があり、河床形状の変化が確認された。河床形状を図-1に示す。置石工背後に大きな堆積(以下中洲)が見られ、堆積量を増加させながらわんど内へと広がっていった。わんど上流開口部では初期の段階で水深の浅い瀬となっており、9月には右岸と中洲がつながりわんど上流開口部を閉塞させた。7月のわんど終端部付近では深掘れができています。以上のことを踏まえ、模型実験により河床変動と流速計測の結果を検討した。

**3. 実験模型及び実験方法** 実験水路は、全長13m、幅B=30cm、高さ30cmの勾配可変型長方形断面開水路で、上流側7.76mの地点から矢田川子供水辺わんどを模したわんどや置石工が設置されている。模型再現範囲はわんどが存在する河道区間の低水路部分のみである。実験水路概要図を図-2に、わんど形状を図-3に、置石工形状を図-4に示す。河床変動実験では移動床、流速計測では河床が平面状態での固定床とした。模型は歪み模型であり、水平縮尺1/117、鉛直縮尺1/36とした。実験で再現する主要な諸元の一覧を表-1に示す。現地と模型の相似にはフルード相似則を用いた。流量条件については、大規模な出水の想定として現地の水位が低水路一杯となる流量と比較的発生頻度の高い中・小出水の3種類で検討した。移動床材料については、現地が混合粒径であるため再現が困難であった。したがって、均一粒径とした。現地観測結果より堆積

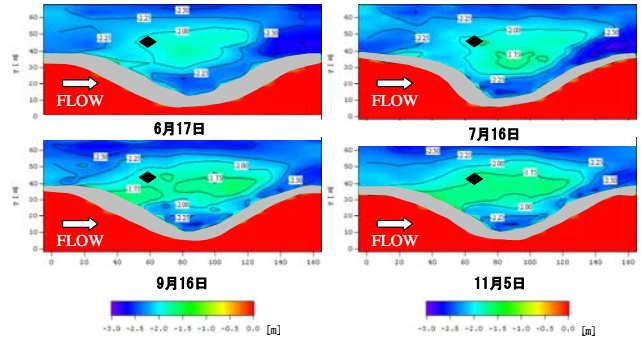


図-1 現地観測河床形状コンター

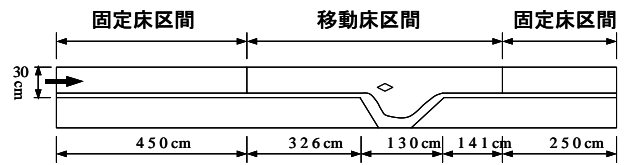


図-2 実験水路概要図

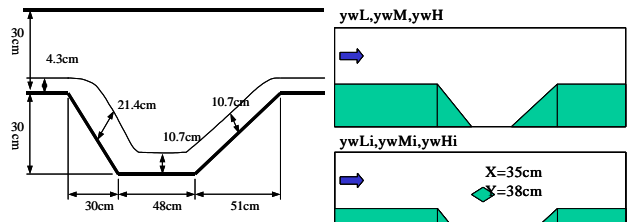


図-3 わんど形状図

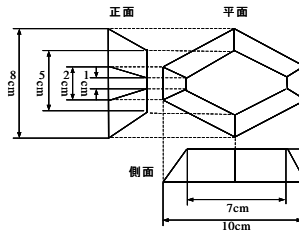


図-4 置石工形状図

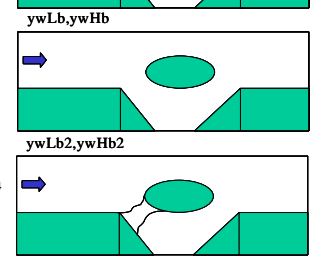


図-5 オプション配置図

表-1 主な模型再現諸元

諸元		矢田川	実験水路	備考
河川地形	河床勾配 I	1/856	1/800	計画値
	河川幅 B	35m	30cm	地形測量結果を再現
	粗度係数 n	0.035	0.012	再現不可
流量	低水路満杯流量	150m <sup>3</sup> /s	6lit/s	
	中出水流量	90m <sup>3</sup> /s	3.5lit/s	
	小出水流量	38m <sup>3</sup> /s	1.5lit/s	
河床材料	中洲堆積粒径	混合	0.43mm	現地粒度調査より設定

表-2 実験ケース

ケース名	オプション配置	流量(lit/s)	水深(cm)	置石工	u*(cm/s)	河床条件
ywL	置石工なし	1.5	2.5	---	1.62	静的洗掘
ywM		3.5	4.1	---	1.97	動的洗掘
ywH		6	5.5	---	2.22	動的洗掘
ywLi	置石工あり	1.5	2.5	非越流	1.62	静的洗掘
ywMi		3.5	4.1	小越流	1.97	動的洗掘
ywHi		6	5.5	越流	2.22	動的洗掘
ywLb	中洲	1.5	2.5	非越流	---	---
ywHb		6	5.5	越流	---	---
ywLb2	中洲+閉塞	1.5	2.5	非越流	---	---
ywHb2		6	5.5	越流	---	---
限界摩擦速度 u*c=1.68cm/s						

した砂は掃流砂が主であると確認されたので本実験では浮遊砂の影響は考慮に入れていない。なお給砂は河床勾配が変わるほどの変化がなかったため行っていない。表-2に実験ケースを示す。実験は大別して置石工なしのケース、置石工ありのケース、現況を再現したケースの3種類を行った。各ケースのオプション配置図を図-5に示す。

**4. 河床変動実験の結果と考察** 各ケースの河床変動後の河床高コンターを図-6に示す。通水時間は約30分である。実験での30分はフルード相似則により現地では10時間にあたる。ywL, ywMでは掃流力が弱いため河床の変化は起きず、局所的な変化も特に見られなかったため図を省略する。現地の堆積状況の再現性と各ケースとの比較を中心に考察を行う。

ywHでは掃流力が非常に強く河床全体が激しく変動した。流速の速い主流域において大規模な河床波が発生している。現地のような主流域に中洲が発生することはなかった。わんど内ではわんど上流開口部付近に大きな洗掘が見られる。現地では逆に堆積していた場所でありまったく反対の結果となった。わんど内には主流域で発生した河床波がわんど内  $y=20\text{cm}$  あたりまで進入し、押し寄せられた砂が主流域と静水域の境界上で堆積している。 $y=20\text{cm}$  以下では河床の変化はほとんど見られなかった。わんど終端部から下流側右岸には現地でも確認された非常に大きな洗掘域が発生した。次に、置石工ありのケースを流量別に見ていく。ywLiではywLと同様に河床全体の変化はなかった。しかし、置石工周辺には変化があり、置石工前方には洗掘ができ、直後に巻き上げられた砂が堆積していることが確認できる。現地では小規模の出水から置石工周辺では常に砂の移動が起き背後に堆積が生じていたと考えられる。ywMiではywLiに比べ置石工背後の堆積が拡大しているのが確認できる。そして堆積域は流下方向に伸びるように広がっている。これは現地の中洲によく似ているといえる。現地でも同程度のスケールの出水が度々起きており、これらの積み重ねが中洲をつくっていったと考えられる。置石工前方の洗掘も大きくなり置石工がその洗掘に落ち込み前方に傾いているのが見られる。ywHiではywH同様に大規模な河床波が発生し、置石工を飲み込むように河床が移動していくのが観察された。図は置石工がちょうど河床波に飲み込まれた状態で通水をやめ計測したものである。置石工周辺の洗掘は押し寄せる河床波の大小に大きく左右されていた。小さい河床波が通過する時にはywMi等と同様に洗掘をつくっていたが非常に大きな河床波が通過する時には置石工の洗掘能力を超え置石工が埋もれるという状態が何度か観察された。河床全体が大きく変動するような大規模出水時には置石工前方は洗掘されるとは限らず埋もれる場合もあることが確認された。ま

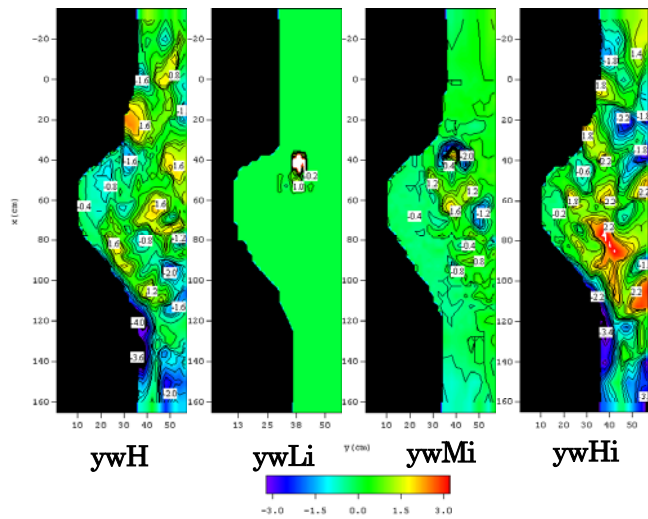


図-6 河床高コンター

た、ywHで見られたわんど上流開口部付近の洗掘も同様ながいえる。通常時は洗掘状態にあるのだが、大きな河床波が来たときのみ置石工の影響によりわんど内へ進入する砂が増えているため洗掘域が一時的に堆積状態に変わることが観察された。わんど上流部の静水域と主流域の境界上の堆積がywHよりわんど奥深くまで達していることから置石工が流砂をわんど内に導く力が強いことがわかる。次に置石工背後の堆積であるが置石工の越流が大きいいため置石工直後に堆積は見られず、少し流された下流側に大きく堆積していることが確認できる。

**4. 流れ構造と考察** 流速計測により得られた流速ベクトル平面図を図-7に示す。ただし、流量の違いによる大きな流れ構造の変化はなかったためywM, ywMi, yaLb, ywLb2のみの図を示す。図-8にわんど開口部測線上 ( $y=33\text{cm}$ ) と置石工設置位置 ( $y=38\text{cm}$ ) の主流速の断面平均流速で無次元化した無次元流速縦断分布を示す。置石工なしのケースから見ていく。主流域のわんど開口部付近の流れは、わんど下流側で2方向に分かれている。わんど内へ入り込む流れとわんど内へ少し入りすぐにもたまたま主流域へと出ていく流れである。わんど内へ入り込んだ流れは、わんどのすり鉢状の形状に沿いながら上流側へ逆流し、流下方向に長軸をもつ楕円形の渦が発生している。渦の流下方向スケールは開口幅  $2/3$  程度で、横断方向スケールはわんど奥行き幅程度である。渦中心はほぼわんど中心に位置している。わんどへ入らなかった流れはわんど下流部の形状に沿い主流域側へと流れ、わんど終端部 ( $x=120\text{cm}$ ) で水はねによる剥離流が発生しているのが確認できる。置石工ありのケースでは、大きな変化として二つ上げられる、一つ目は、置石工先端 ( $x=35\text{cm}$ ) より大きな水はねが発生し、わんど上流側に大きく入り込む流れが強くなっている。二つ目は、置石工背後 ( $x=45\text{cm}$ ) に剥離による逆流をともなう低速域が発生しているこ

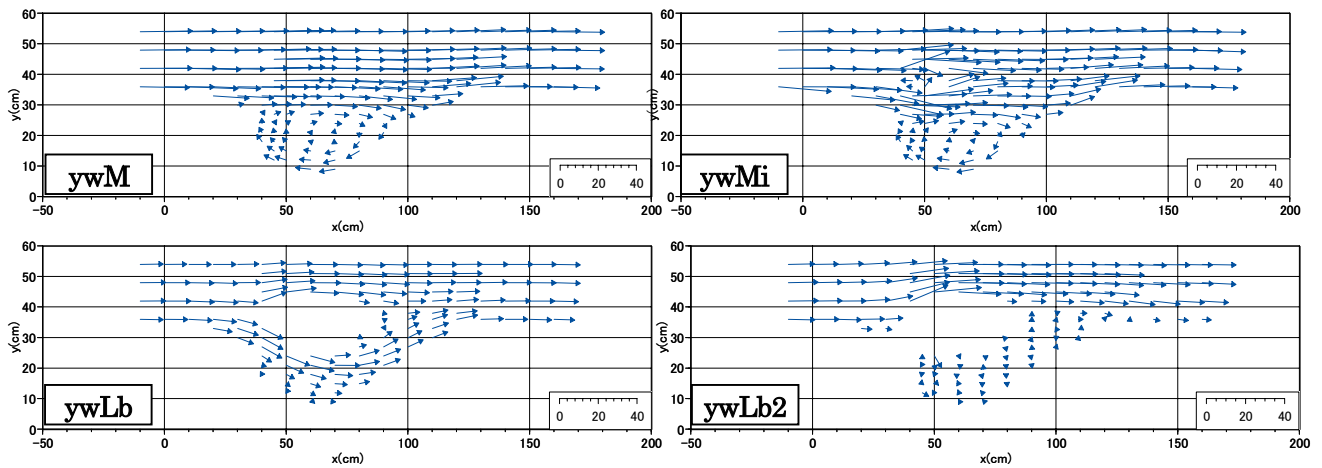


図-7 流速ベクトル平面図

とである。現況を再現したケース ywLb, ywHb では、上流からの流れは中州先端よりわんど側と左岸側の2方向に分かれる。わんど側に分かれた流れにはわずかであるが岸周辺に低速域が確認できる。その他の場所では流れが加速し、中州終端で合流している。中州後方では置石工の時と同様に剥離渦が見られる。ywLb2 では、閉塞部のため上流からの流れは左岸側に集中し流速が激しく増加している。わんど内ではほとんど流れのない死水域となっている。ywHb2 では、中州を越流した流れがわんど内に加速し入り込むため死水域であったわんど内が激しく乱されることが確認されている。

図-9 に水路上流直線河道の流下方向の底面せん断応力で除し無次元化した各ケースの底面せん断応力のコンター図を示す。流量による大きな違いは見られなかったため ywL, ywLi, yaLb, ywLb2 のみを示す。ここでは、河床変動結果の要因を考察していく。ywL から見ていく。流下方向の底面せん断応力から見っていくと主流域に比べわんど内のせん断応力が非常に小さくなっている。主流域とわんどの境界ではわんど内に広がりながら弱まっている。次に、横断方向の底面せん断応力を見ていく。わんど上流開口部、わんど下流開口部、わんど終端にそれぞれ強いせん断応力が見られる。わんど下流開口部ではわんど側へのせん断応力が大きくこの力が主流域の河床波をわんど下流部へ広げたと考えられる。ywL のケースでの流れ構造が最もこの力の割合が大きいことがわかっている。わんど終端部から主流域方向へせん断応力が広がっているのが見られ、これがわんど終端部から下流方向に大きく河床をえぐった力である。流量が大きいほどこの力の割合は大きくなっていった。置石工ありのケース ywLi では、置石工背後から流下方向にせん断力が弱い区域が広がっている。置石工の越流が少ないケースほどせん断力の弱まる割合が大きいことがわかっている。越流した流れはすぐに置石工背後に流れ込み背後の堆積を押し流したと考えられる。次に、横断方向のせん断応力を見ていく。置石工の水はねにより、わんど上流部方向へのせん断力が非

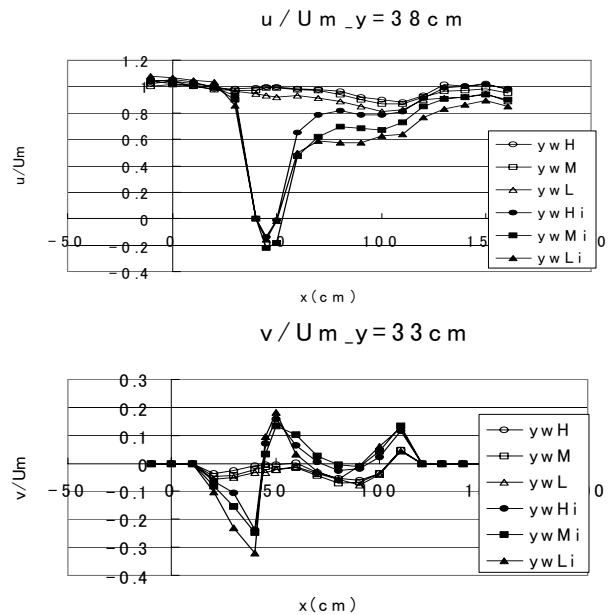


図-8 無次元流速縦断分布

常に強い。閉塞部への堆積は置石工の影響により加速

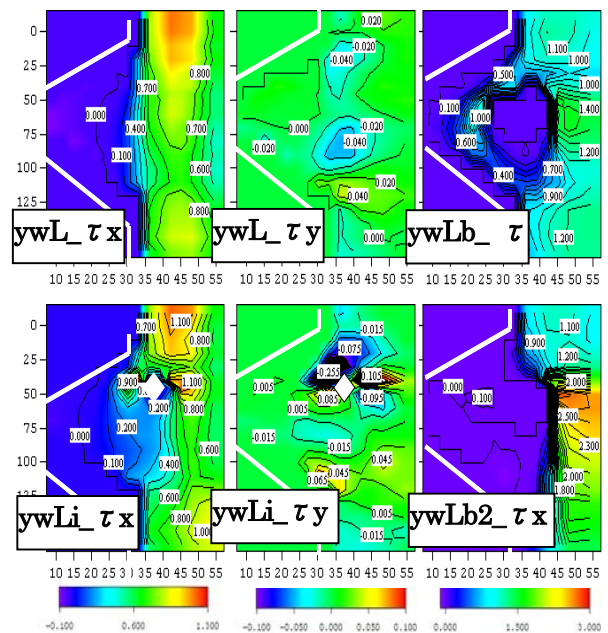


図-9 無次元底面せん断応力コンター



したと考えられる。非越流のケース ywLi が最もこの割合が大きく範囲も広がっている。また、置石工周辺では流下方向へのせん断力も強く、ここで洗掘された砂は下流に流され中州をつくったと考えられる。わんど終端部のせん断力も置石工ありのケースでは大きくなっており、洗掘を深めたと考えられる。現況を再現したケースでは、4 ケース共に左岸側流路の流れ方向せん断応力が非常に強くなっていた。越流をしないケースのほうがより強くなっており、ywLb2 では水路主流域の3倍近くにもなっている。

**5. 実験結果のまとめ** 今回の模型実験より、おおむね現地の堆積過程を推測出来るといえる。置石工背後の堆積は出水の大きさに比例して堆積量が増え、堆積位置が流下方向へと移動する。現地でも置石工設置直後から小中規模の出水により背後への堆積が始まり、大規模出水があるたびに堆積が下流へと押し流され、また小中規模の出水により置石工背後に堆積していく。加えて一度堆積すればその背後にまた砂は回り込み堆積を広げる。このような非定常の流れと堆積の誘発により置石工背後に可能な限り堆積が広がり巨大な中州になったと考えられる。現地のわんどの上流開口部を閉塞している堆積は置石工が堆積を加速させたといえる。現地の中州は置石工が巨大化したのと同じであり、中洲が巨大化すればするほどわんど上流部への砂の流入は多くなっていった。そしてわんど上流部の静水域と主流域の境界上に堆積したものが中州とつながったのであると考えられる。こうして現地は現在の堆積状況になったのではないかと推測される

**5. 数値計算手法と結果** 本研究では2次元河床変動計算により、現地堆積状況の再現を試みた。基礎方程式には次に示す水深平均された開水路平面2次元流れの運動方程式および連続式を用いた。

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

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0$$

乱流モデルには  $k - \epsilon$  モデルを用いた。これらを有限体積法で離散化し、圧力解法には SIMPLE 法を用い、移流拡散の解析にはハイブリッド法を用いた。河床変動計算には Meyer-peter・Muller の流砂量式と流砂の連続式を用いた。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau'_* - \tau_{*c})^{1.5}$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left( \frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} + \frac{\partial q_{Bn}}{\partial n} \right) = 0$$

図-10 に数値計算による流速ベクトル平面図と図-11

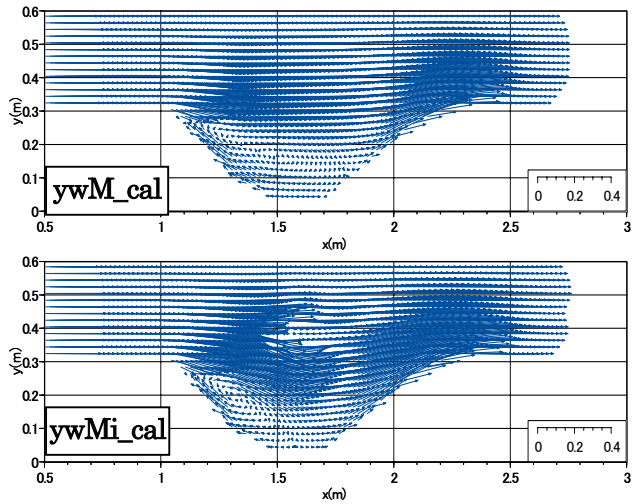


図-10 数値計算による流速ベクトル平面図

に河床変動コンターを示す。流れ構造では実験に比べ、

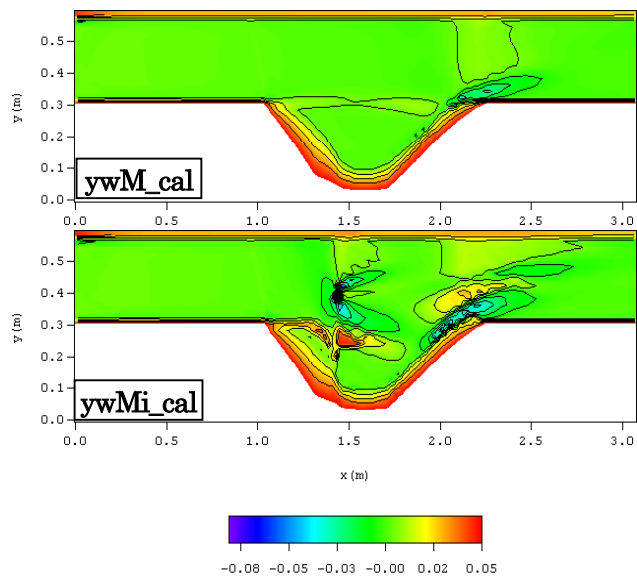


図-11 数値計算による河床変動コンター

わんどへの流入角度が大きい傾向にある。ywL に関しては流入角度が大き過ぎわんど内に渦が発生しない結果となった。置石工の水はねも非常に大きく渦をわんど上流部へ移動させるほど影響している。河床変動に関しては、実験との特徴が再現されている。

**6. おわりに** 本研究では人工的につくられた矢田川わんどと置石工の河床変動についての関係を見てきた。模型実験を行うことにより現地条件を再現し、現地の河床変動特性や流れ構造そして置石工の影響を把握することができた。置石工の設置により、現在の現地の堆積状況ができたと確認された。今後は、具体的な改善策を提案していくと共に数値計算の再現性を高め、河床変動の予測をしていくことが必要である。