

# 落差工の断面改変に伴う上流河道の河床変動

神田 佳一\* 佐本 佳昭\*\* 武藤裕則\*\*\* 張 浩\*\*\*

A Study on Morphological Response of River Channel  
Due to Falling Works Improvement

Keiichi KANDA, Yoshiaki SAMOTO, Yasunori MUTO, Hao ZHANG

## ABSTRACT

Falling works are usually constructed to contribute to river bed stabilization in the upstream reach. However, at the same time, they form artificial barriers and inhibit the longitudinal continuity of water, sediment transport and migration of fish, so that they have negative impacts on the eco-system and river landscapes. In order to solve the problem, several improvement schemes can be considered; for example, full removal and height reduction of the falling works, but this possibly can cause instability of the river bed.

This study deals with the response of flow pattern and bed deformation in the upstream reach of river channel due to falling works improvement. A series of laboratory experiments under a flood condition are conducted to clarify the effects of the several improvement schemes on the bed deformation. The results of this study show that the falling works improvement can contribute the river scenery being restored into a natural condition.

**KEY WORDS:** *falling works, improvement, experiment, morphological response, sand bar*

## 1. はじめに

河道の安定化工法として用いられる落差工は、上流からの流水や土砂をせき止め、湛水域の形成や河床の安定に寄与する一方、土砂流送・生態系・景観等の面からは河床変動や縦横断の連続性が阻害されるなど、環境上の問題点が指摘されている。近年、このような落差を伴う横断構造物を巡るコンフリクトを解消すべく、流砂の連続性や魚の遡上の阻害要因となっている横断構造物の全面あるいは一部を撤去・改修するなどの工事が世界各地で行われている。アメリカでは、良好な河川環境の復元のための手段として、1999年までに約500のダムや堰堤が撤去された<sup>1)</sup>。カナダのBow Riverでは、魚類や水生生物のための良好な河川環境を創出するために、堰堤の大規模な改修プロジェクト<sup>2)</sup>が進行している。日本や韓国においても、用水確保の

必要性がなくなった都市部の河川で堰堤や落差工を撤去する試みがなされている<sup>3), 4)</sup>。

写真1は、明石川水系伊川（兵庫県神戸市）において、落差解消と洪水疎通能力の向上を目的として床止め落差工をほぼ全断面に亘って撤去した事例を示している。また、撤去前後とその後の小規模な出水による河床形状の変化を図1に示す<sup>5)</sup>。図に見られるように、落差工の撤去とその直下流の局所洗掘の埋め戻しによって縦断的落差は解消されたが、それに伴って上流河道では全体的な河床低下や砂州の発達などの河床変動が生じている。このような河床の低下や不安定化は、周辺の河川構造物の安定性に大きな影響を与えるものであって、落差工の断面改変に伴う上流河道の応答特性を評価することは、工学上重要な課題である。

本研究では、防災上必要な河道の安定性とそこでの落差工の役割を評価するとともに、環境上必要な河床変動や縦の連続性の定量化を目指すことを目的として、

\*都市システム工学科 \*\*京都大学大学院 \*\*\*京都大学防災研究所

落差工の改変形状や改変前の河床位をパラメータとした系統的な模型実験を行い、落差工の改変に伴う上流河道の流れと河床の応答特性について考察した。



(a)改修前



(b)改修後

写真1 伊川(神戸市)における落差工の改変事例

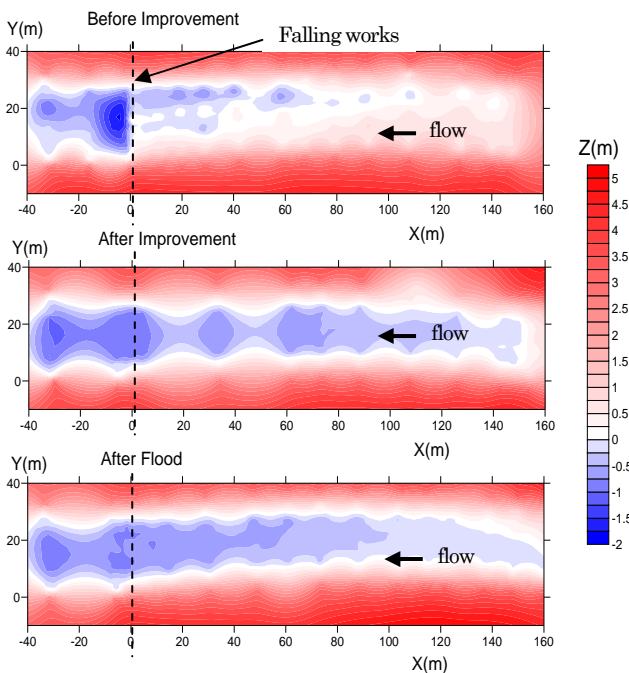


図1 落差工の改変に伴う河床形状の変化

## 2. 実験の概要

実験は、図2に示すような全長21m、幅0.5m、高さ0.3mの側面ガラス張りの循環式鋼製水路を用いて行った。水路勾配は $I=1/200$ である。水路下端から8mの位置に高さ11.7cmの落差工模型を設置し、その上流は河床材料として平均粒径 $d=0.155\text{cm}$ のほぼ一様な珪砂を敷き詰めた移動床とした。砂の敷高 $D$ は、落差工上流部に湛水域が形成される場合と、満砂状態の2通りを設定し、それぞれ、 $D=8.5\text{cm}$ 及び $11.7\text{cm}$ としている。

落差工の改変形状を図3に示す。高さ11.7cmの落差工(Initial)に対して、全幅を3.2cm(TypeI)及び1.6cm(TypeII)撤去した場合、水路中央部の1/3幅(16cm)を3.2cm(TypeIII)及び1.6cm(TypeIV)切り欠いた場合の計5通りである。また、図中の各断面の改変面積率 $F(\%)$ は、改変面積が最大であるType(II)との割合で示している。

流量条件は、以下に示す定常条件と非常条件の2通りに設定している。まず、定常な場合の条件として、流量を $Q=8,160\text{cm}^3/\text{s}$ とした(RunA及びRunB)。これは、平地河川の中下流部を対象とした現地河道において、数年に1度生起するような小規模な洪水<sup>6)</sup>を想定したもので、満砂状態における等流時の掃流力と河床砂の限界掃流力との比が2程度となる動的な条件である。等流時の水理量を表1にまとめる。実験条件は、表2に示すように、河床砂の初期敷高 $D$ 及び落差工

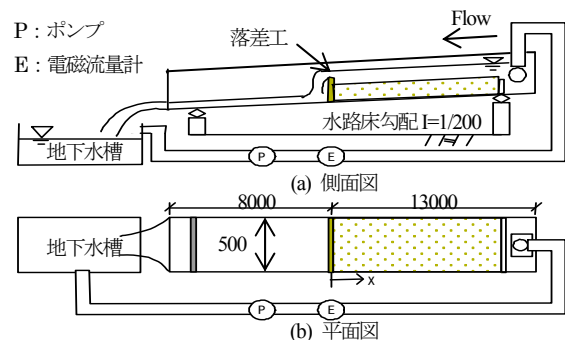


図2 実験装置の概要(単位:mm)

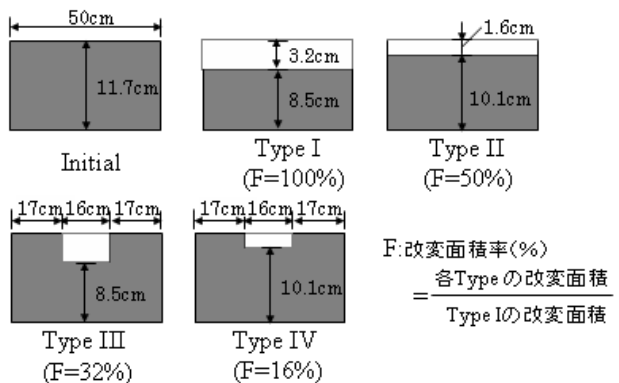


図3 落差工模型の形状(単位:cm)

表 1 等流時の水理緒元(定常実験, RunA, RunB)

流量 $Q$	8,160cm <sup>3</sup> /s	等流水深 $h_0$	4.18cm
平均流速 $V_0$	39.0 cm/s	河床勾配 $I$	1/200
$\tau_{*0}$	0.070	$\tau_{*C}$	0.036
フルード数 $F_r$	0.66	レイノルズ数 $R_e$	14,000

$\tau_{*0}$  : 無次元掃流力,  $\tau_{*C}$  : 河床砂の限界無次元掃流力

表 2 実験条件(定常実験, RunA, RunB)

落差工の形状	敷高 $D=8.5$ cm	敷高 $D=11.7$ cm
Initial	RunA0	RunB0
Type I	RunA1	RunB1
Type II	RunA2	—
Type III	RunA3	RunB3
Type IV	RunA4	RunB4
Type III (低水路掘削)	—	RunB33

の改変形状を変化させた計 10 通りである。RunA0 及び RunB0 は、改変前の落差工形状において、それぞれ所定の敷高で 120min 通水したものである。他のケースでは、これらの最終の河床形状を初期条件として、落差工の形状を変化させた後、再び通水している。ただし、RunB33 は、落差工の改変 (TypeIII) と同時に、上流河道の低水路を改変断面と同じ高さで掘削した場合をモデル化したものであって、河床の初期条件を、低水路の深さ 3.2cm, 底面幅 16cm, 及び左右岸の勾配が河床砂の静止摩擦角となる複断面形状とした。

通水時間は各実験条件によって異なるが、いずれの場合も、落差工改変後の上流河道の河床形状が安定し、ほぼ準平衡状態とみなせるまで通水を行った。準平衡状態での水位の測定にはポイントゲージを用い、通水後の河床形状はレーザー変位計で測定した。また、表面流況については、粒径 50 $\mu$ 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 DVC で撮影し、藤田  $\eta$  の LSPIV 解析手法を用いて表面流速を評価した。

次に、年最大程度の洪水によって形成された河床地形がその後の低水時にどのように変化するかを評価し、落差工の形状が水みちの形成に与える影響、平水流量の履歴が年最大流量で形成される地形に与える影響について考察するために、ステップ型の非定常条件のもとで実験を行った (RunC)。ここでは、平水流量であっても、河床材料が移動し、砂漣などの河床波が形成されずに低水路の発達を期待できるように、河床

表 3 実験条件(非定常実験, RunC)

落差工の形状	敷高 $D=11.7$ (cm)	流量
Initial	RunC0	1010 (cm <sup>3</sup> /s)
Type III	RunC1	310 (cm <sup>3</sup> /s)
	RunC2	1010 (cm <sup>3</sup> /s)
	RunC3	310 (cm <sup>3</sup> /s)

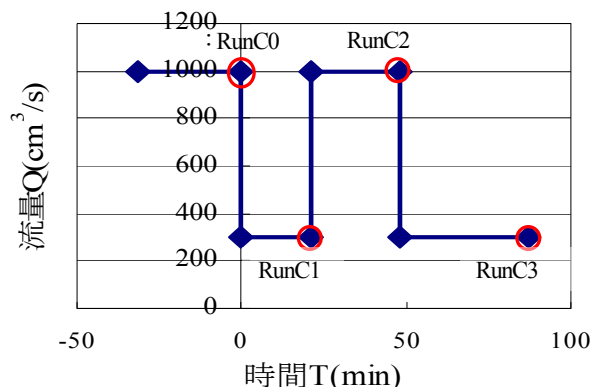


図 4 非定常実験における流量ハイドログラフ

材料として中央粒径  $d=0.0835$ cm の石炭粉を使用した。流量は、低水時の流量を  $Q_{min}=310$ cm<sup>3</sup>/s, 年最大洪水流量を  $Q_{max}=1,010$ cm<sup>3</sup>/s に設定した。表 3 に RunB の実験条件を示す。落差工の切り欠き形状は、低水時において低水路の発達を期待される幅 16cm (1/3 幅), 高さ 3.2cm の Type III のみとし、流量の変化は図 4 のように与えている。敷高  $D=11.7$ cm の平坦河床に  $Q_{max}$  で通水して初期河床 (RunBD0) を設定した後、落差工中央部を切り欠き、 $Q_{min} \rightarrow Q_{max} \rightarrow Q_{min}$  の順で流量を変化させた。それぞれの流量通水後の河床形状を図 4 に示す通り、RunC1, RunC2 及び RunC3 と名づけている。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 定常実験

##### 3.1.1 敷高 $D=8.5$ (cm)の場合(RunA)

上流砂層の初期敷高  $D$  が落差工高さより低い場合 (RunA0~RunA4)における、水路中央の水位  $H$  と河床位  $Z$  の縦断分布を図 5 に示す。高さの基面位置は落差工設置断面の水路床とし、上流方向に縦断距離  $X$  をとっている。また、図 6 は河床形状のコンター図を示している ( $Z'$  は水路床からの鉛直距離)。図中の暖色は砂を一様に敷き詰めた状態 (敷高 8.5cm) からの河床上昇を、寒色は河床低下を表している。

改変前の落差工 (RunA0) の上流部では、水位の堰上げが  $X=400$ cm まで達しており、そこでは背後からの土砂供給により、舌状のフロントを有するデルタ地

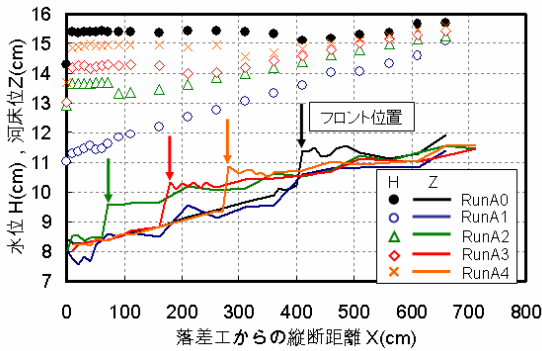


図5 水位・河床位の縦断分布(RunA)

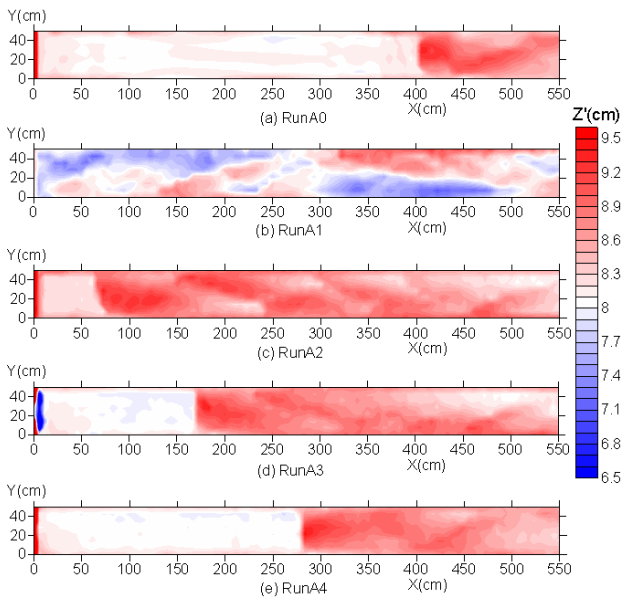


図6 河床形状のカウンター図(RunA)

形が形成されている。その高さは1.3cm程度であって、デルタ上には短波長の交互砂州が見られる(図6(a))。落差工の改変に伴って湛水域の水位は低下し、図5の矢印で示されるように、デルタはその形状を変えずに下流側に移動している(RunA2~RunA4)。落差工を初期河床位まで撤去したRunA1では、水面形は低下背水となり、デルタは完全にフラッシュされて消滅している(図6(b))。このとき、上流河道の全域で流砂が存在する動的平衡状態となっており、デルタ上のものよりも長い波長の交互砂州が発達している。また、落差工の中央部1/3を改変した場合、切下げ高の大きいRunA3では、落差工の直上流(図6(d)のX=0cm近傍)において、左右対称な局所洗掘が生じている。これについては次項でふれる。

落差工の改変面積率Fと落差工上の水位の低下量ΔH及びデルタフロントの移動量ΔLとの関係を示せば、図7のようである。ΔH及びΔLは、いずれも落差工の改変幅にはよらず、Fと正の相関関係にある。

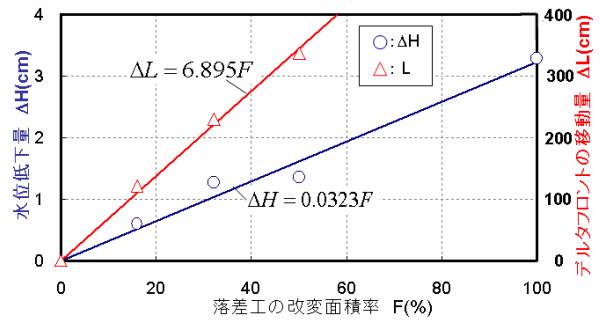


図7 落差工の改変面積率と水位低下量及びデルタフロントの移動量との関係

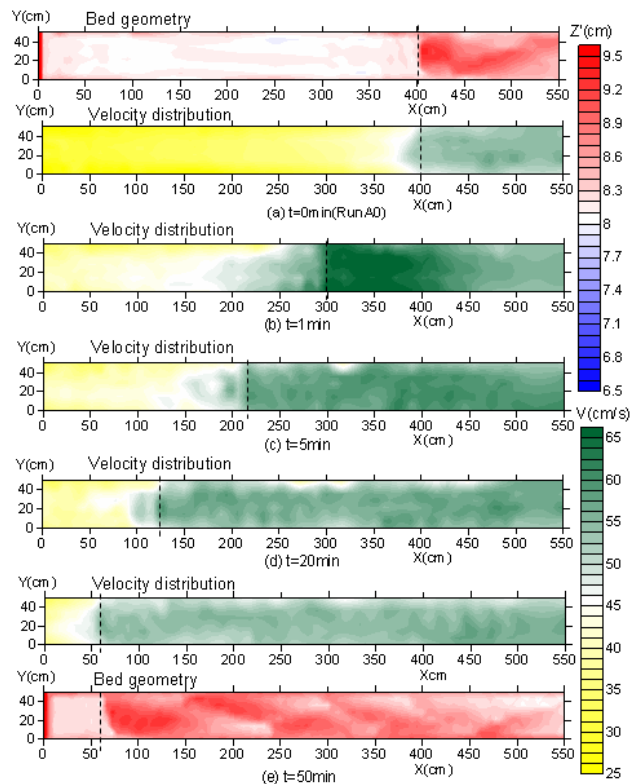


図8 表面流速分布の時間変化(RunA2)

$$\Delta L = 6.895F \quad (1)$$

$$\Delta H = 0.0323F \quad (2)$$

図8は、RunA2において、落差工の改変前(RunA0)から改変後の準平衡状態に至るまでの表面流速Vの平面分布の時間変化を、RunA0及びRunA2の河床形状の結果とともに示したものである。図中、各時刻におけるデルタフロントの位置を破線で示している。改変直後(t=1min)では、フロント付近(X=300~350cm)で60cm/s(V<sub>0</sub>の約1.5倍)を超える高速領域が存在し、大きな掃流力の発現により流砂運動が活発である



ことがわかる。このため、フロントの移動速度は大きい、時間の経過とともに ( $t=5\sim 50\text{min}$ ) デルタ上の流速は次第に減速し、フロントの移動速度も減少している。このとき、上流からの交互砂州の発達に伴って、流速の比較的速い領域と遅い領域が交互に表れるようになる。 $t=50\text{min}$  では、フロントの移動速度は  $1\text{cm}/\text{min}$  以下となっており、準平衡状態に達しているものと考えられる。

3.1.2 敷高  $D=11.7(\text{cm})$  の場合 (RunB)

図9は、満砂状態の落差工を改変した場合の水路中央の水位と河床位の縦断分布である。また、図6と同様に、河床形状のコンター図を示せば、図10のようである。改変前 (RunB0) では、落差工近傍を除いてほぼ等流状態となっており、落差工の上流全域において交互砂州が発達している。図9から分かるように改変後の落差工面積の欠損により、水位及び河床位はともに低下するが、その変化は落差工に近づくほど顕著である。その結果、水面及び河床の勾配が増大している。落差工の改変面積率  $F$  と落差工背面での河床低下量  $\Delta Z$  及び平均河床勾配  $S$  との関係を示せば、図11のようである。ここでも、 $\Delta Z$  及び  $S$  は  $F$  と比例関係にあり、それぞれ、次の回帰式で表される。

$$\Delta Z = 3.05F \quad (3)$$

$$S = 5.3 \times 10^{-3} + 4.3 \times 10^{-5} F \quad (4)$$

表4は、砂州の波長及び波高特性をまとめたものである。また、平均水深を用いて村本・藤田<sup>8)</sup>の河床形態の領域区分に本実験結果を適用すれば、図12のプロットのようである。各Runで水深  $h$  がほぼ等しいため、図12では全て準砂州と交互砂州の境界線上の同一点にプロットされるが、砂州の形状特性は、図10からも明らかのように、落差工の改変形状や初期河床形状によって大きく異なっている。特に、落差工の中央部1/3を3.2cm切り下げたRunB3では、落差工の近傍の局所洗掘の背後に顎状に突き出た堆砂地形が発達し、その上流部には複列砂州と交互砂州が混在するような複雑な河床形態となっている。この顎状の堆砂地形は落差工の改変直後に出現し、その後も安定な形状を保っており、上流部の砂州の複列化の支配要因となっているものと考えられる。一方、同じ改変断面で低水路を掘削した状態から通水したRunB33では、顎状地形は存在しておらず、明瞭な交互砂州が発達している。このように、落差工改変後の上流河道の河床形態は、落差工近傍の局所地形や河床勾配によって複雑な特性を

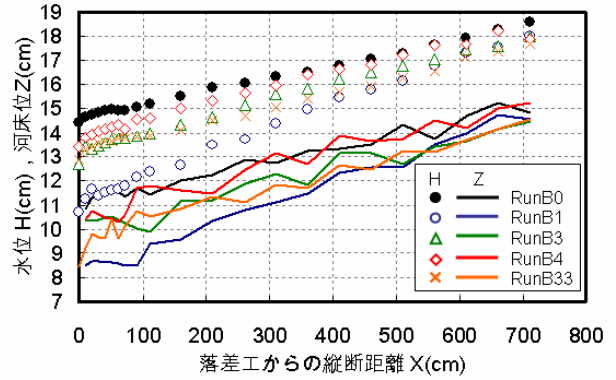


図9 水位・河床位の縦断分布 (RunB)

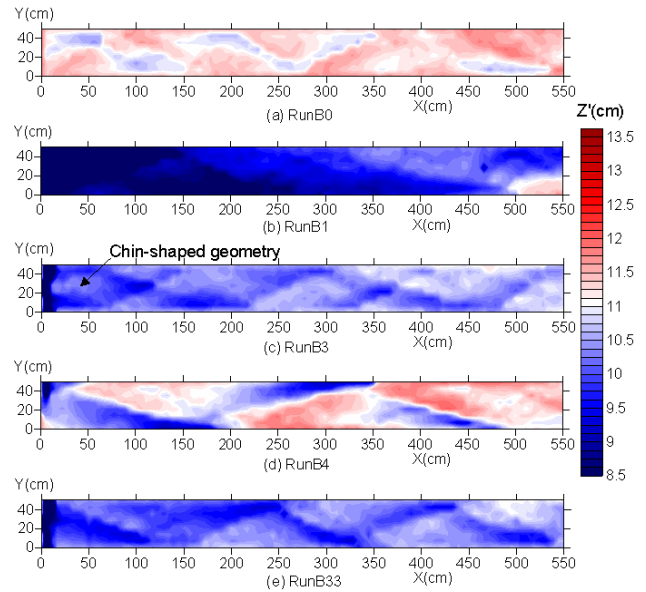


図10 河床形状のコンター図 (RunB)

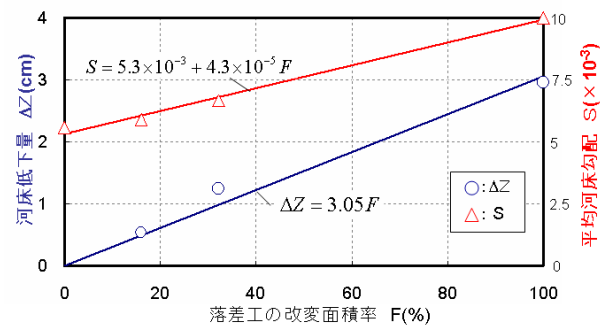


図11 落差工の改変面積率と河床低下量及び平均河床勾配との関係

表-4 砂州の形状特性

	$\lambda_B / B$	$Z_B / B$
RunB0	1.3	0.023
RunB1	2.4	0.026
RunB3	1.2~1.6	0.023
RunB4	3.6	0.063
RunB33	1.6	0.024

$\lambda_B$  : 砂州の波長,  $Z_B$  : 砂州の波高,  $B$  : 水路幅

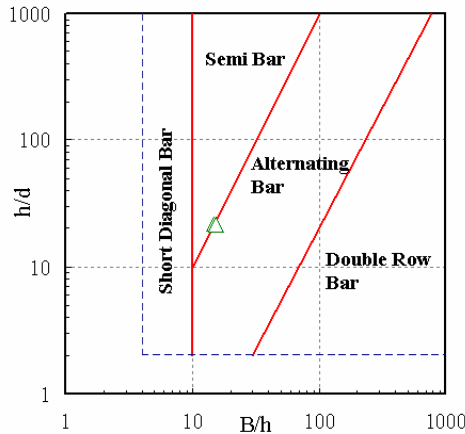


図 12 中規模河床形態の領域区分図

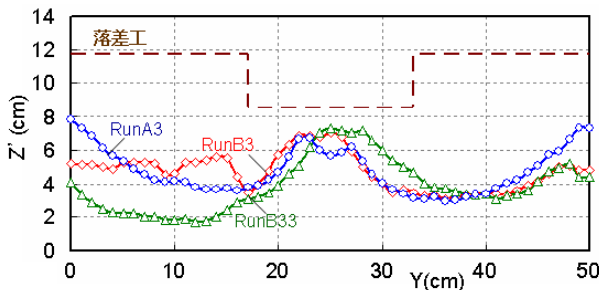


図 13 局所洗掘最深部の横断形状

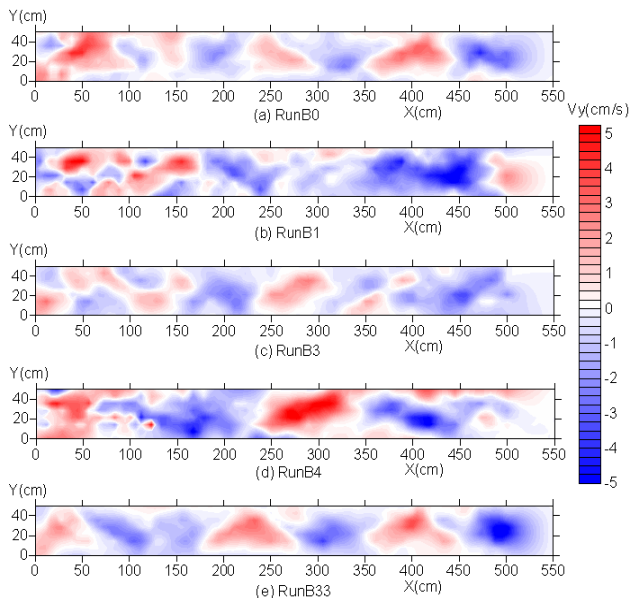


図 14 横断方向流速分布(RunB)

示すが、これらの関係を定量化するには、改変形状に関してより多くの実験条件の設定が必要である。

RunB3 及び RunB33 では、落差工近傍において RunA3 と同様に、局所的な二次流による洗掘が生じている。それらの最深部 ( $X = 2\text{cm}$ ) における河床の横

断形状を比較したものを図 13 に示す。洗掘形状はいずれも落差工の形状と逆位相の対称形であって、初期の河床条件による有意な差異は見られず、断面の急縮に伴って改変部の両側に生じる剥離渦によって形成されたものと考えられる。

次に、表面流速の横断方向成分  $V_y$  の平面分布を示せば、図 14 のようである。赤色は右岸方向の、青色は左岸方向の流速を表している。図 10 の河床形状と比較すると、赤色域と青色域が砂州の形状に対応して交互に表れており、砂州の前縁線に直交して蛇行する流れの特性がうまく捉えられている。

### 3-2 非定常実験(RunC)

非定常実験における河床形状の変化を図 15 に示す。改変前(RunC0)では、洪水流量に対応して落差工上流部に RunB3 と同様に波長の長い交互砂州が形成されている。落差工の改変後、低水流量を通水すると(RunC1)、落差工改変部直上流において砂州上の土砂が浸食され、複数の流路が発達するようになるが、特に両側壁に沿って水みちが形成されている。流量を増加させた後の RunC2 では、大きな掃流力が働いたため、RunC1 の落差工直上流で見られた砂州がフラッシュされている。再び低水流量に戻した場合 (RunC3) では、湛水域形成時と同様に、低水流路及び砂州はほぼ似た形状を保ったままわずかに下流部へ移行しているが、洪水によって形成された河床形状がそのまま保持されている。

図 16 に落差工上流部( $X=2.0\text{cm}$ )の河床横断形状の変化を示す。RunC1 では、洗掘形状は落差工の形状と逆位相となっており、対称形である。また、RunC3 の河床は RunC2 に比べて高く、低水流量通水時の埋め戻しが見られる。

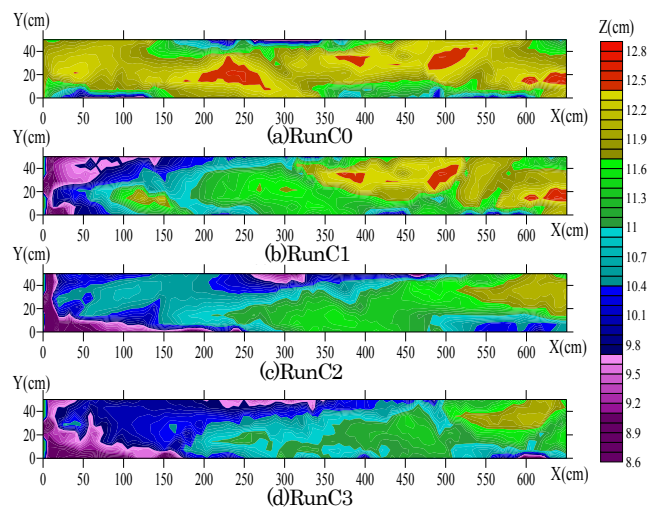


図 15 非定常実験における河床形状の変化(RunC)

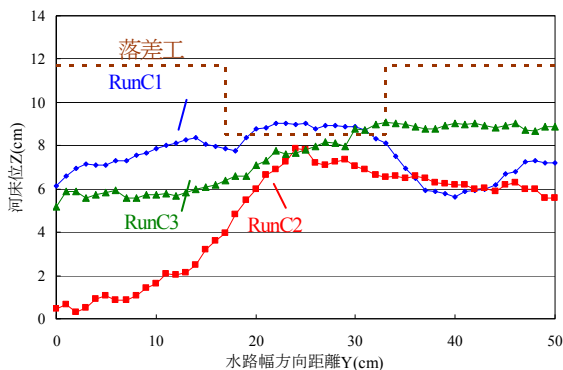


図16 落差工上流部の横断形状(X=2cm)

#### 4. まとめ

本研究では、落差工の改変に伴う洪水時の上流河道の流れと河床の応答特性について、実験並びに数値解析を行った。得られた主要な所見を以下にまとめる。

落差工の改変面積及び河床の初期敷高は、落差工上流部の流れ及び河床形態の変化に影響を及ぼす。上流の河床位が落差工高さよりも低い場合、落差工上流部にはその前方に湛水域を有するデルタ地形が形成されるが、断面の改変に伴う水位低下により、そのフロントの移動とともに湛水域は減少する。落差工の改変面積率と水位の低下量及びフロントの移動量との間には正の相関がある。

一方、落差工上流部が満砂状態の場合、改変後の河床には砂州形状が発達するが、その形状特性は改変形状によって異なる。また、断面中央を部分的に改変した場合には、落差工近傍で二次流による局所洗掘が発達する。これは落差工自体の安定性に影響を及ぼすと考えられるため、今後さらに、その挙動を明らかにする必要がある。また、年最大程度の洪水によって形成された砂州形状は、その後の低水流量の通水によって水みちが固定化され蛇行流路が発達するが、砂州の形

状及び位相の変化は小さい。

**謝辞**：本研究を遂行するにあたり、京都大学防災研究所准教授 竹門康弘先生並びに竹林洋史先生より多大なるご協力とご助言を頂いた。また、本研究は京都大学防災研究所一般共同研究費（代表：神田佳一）の支援を受けている。ここに記して、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Maclin E., M. Bowman, and A. Bednarek: The Ecology of dam Removal: A Summary of Benefits and impacts, American Rivers, 1999.
- 2) Government of Alberta, <http://www.gov.ab.ca/>, 2008.
- 3) Lee J. H., S.M. Jeong, S.C. Park, K.S. Shin and E.T. Lee: Weir relocation for the improvement of the Geum River scenery and river bed restoration, Proc. 32<sup>nd</sup> IAHR Congress, Venice, Italy, CD-ROM, 2007.
- 4) Ahn H. K., H. Woo, D. S. Rhee and K. H. Cho: A STUDY ON THE EFFECT ON RIVER HABITAT CHANGE BY SMALL DAM REMOVAL, ADVANCES IN HYDRO-SCIENS AND ENGINEERING, Nagoya, Japan, CD-ROM, 2008.
- 5) Kanda K, Y.Samoto, Z.Li: Study on Morphodynamics around Stone-Lined Spur Dike in the Akashi River, Proceedings of the 5<sup>rd</sup> IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Enschede, pp.1197-1206.
- 6) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，pp.35-57，1994.
- 7) 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.
- 8) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件，第22回水理講演会論文集，pp.275-282，1978.