

固定床上に設置された水制周辺の流砂特性

久加朋子⁽¹⁾・竹林洋史・藤田正治

(1) 京都大学大学院工学研究科

要 旨

水制工はその周りに局所洗掘や土砂の堆積を促すため、単調化した河川環境を修復する手法の一つとして注目されている。本研究では、水制のこうした機能が固定床化の進行した河川環境の修復にも有効であるかを評価するため、水理実験と数値解析から水制周りの流れ、流砂・河床変動特性を再現した。この結果、固定床上に設置された水制は移動床上の水制と異なり、その下流域に殆ど土砂を堆積させなかった。これは、固定床では水制周りが局所洗掘されず、水制上流域に無次元限界掃流力以下の領域が広く形成されるためである。流砂は水制上流域で対岸側へと流向を変え、水制周辺まで到達しない。このため、水制周辺には流砂を水制下流域へと輸送する方向の流れが形成されるものの、土砂は堆積しないといえる。ただし数値解析では、流れの非定常性を考慮すると流砂の輸送方向が変わるため、水制間の土砂交換が促される可能性も示された。

キーワード：固定床、水制、掃流砂、河床変動

1. はじめに

今日、水制工は河川生態系の修復技術の一つとして注目されている。これは、河川改修によって単調化した河道内物理環境を改善する手法として、水制による局所洗掘や流れの偏向、あるいはその下流域に土砂の堆積地形を形成する特性が多様な流れ場を形成するものと期待されるためである。事実、水制のこうした特性をいかした河川生態系の修復事例は世界的に実施されており、水制周りに魚類の種類数、個体数、幼魚数が増加するなどの効果が報告されている（Hartman and Titus, 2010 ; Radspinner, 2010 ; Shields, 1995 など）。

ところで、このような水制がもつ多様な環境を創出する機能は主に移動床河川に関する報告である。都市域や農村地域には河床に十分に土砂の堆積しない固定床化の進行した河川が多数存在するが、こうした固定床河川における河道内物理環境を改善する手法は殆ど明らかとされていない。そこで、固定床河川に上述した水制の特性を適応することが可能であれば、固定床化した河道の一部に土砂を堆積させ、多様な水生動物の生息場所を再生させるきっかけとなると考えられる。

固定床河川は河床が洗掘されないため、水制周りの流れ構造は移動床河川の場合と異なるはずである。同時に、流れ構造の違いに伴って流砂の輸送特性および河床変動特性なども異なっていると予想される。しかしながら、水制を有する流れ場の既存報告は多数存在するもののそれらは水理実験にて水制周りの流れ場のみを扱ったもの（池田ら, 2000 など）、移動床上の水制周りの洗掘を扱ったもの（福岡ら, 1998 など）、あるいは実河川の調査報告（武藤ら, 2005 など）が大半で、固定床上に設置された水制による浮遊砂（谷ら, 2010 ; 木村ら 1998）、掃流砂の補足や河床変動特性に関する研究報告は殆ど存在しない（久加ら, 2011）。

そこで本研究では、固定床化した河道の一部に土砂を堆積させる方法として、水制の有効性の検討を水理実験と数値解析から行なった。はじめの水理実験では、固定床上に水制を設置して上流から給砂を行い、その後、水制下流域に形成される土砂の堆積形状を把握した。ついで、数値解析にて固定床上に設置した単一水制周りの流れ構造を定常給水・非定常給水条件で再現し、水制周りの流れ、流砂・河床変動特性をより詳細に把握した。

2. 固定床，移動床上の水制による流砂の補足特性

(1) 実験方法

実験水路をFig.1に示す。水路は全長5m，幅0.2m，勾配0.003の長方形矩形水路を用い，水路底にベニヤ板を敷いて固定床とした。移動床の実験を行う際には固定床の一部をはずし，そこに土砂 ($d_m=0.00053$) を敷き詰めた (Fig.1)。水制はベニヤ板で作成した不透過型である。水制サイズは横断方向の水制長0.03m，流下方向の水制幅を0.015m，水制高を0.015mとした。

水制は連続した群水制が続くことを想定して水路右岸に3基，水路左岸に1基を上流から順に設置した (Fig.1)。いずれの実験も，再上流に設置した水制の位置は水路上流端より2.2mの地点とした。また，給砂投入点は水路上流端より2.0mの地点に統一した。

実験の水理条件をTable1に，実験ケースをTable 2に示す。実験に用いた水制は，通水時に全て越流する高さとなっている。CaseFS-1～CaseFS-4は固定床，CaseMS-1は移動床である。CaseFS-1～CaseFS-4は水制間隔 (D) / 水制長比 (L) による砂礫 (掃流砂) の捕捉特性の違いを検討するもので，水制長を0.03mに統一し，水制間隔のみ変化させている。CaseMS-1は固定床の場合との砂礫 (掃流砂) の捕捉特性の違いを検討するもので，CaseFS-3と同じ水制配置，粒径としている。固定床実験であるCaseFS-1～CaseFS-4には，十分な土砂供給量を想定して芦田・道上式 (芦田・道上，1991) による平衡流砂量の約10倍の給砂量を与えた。給砂材料は平均粒径0.95mmと0.53mmの一樣砂である。どちらも移動床における移動限界掃流利付近の粒径であるが，固定床上では水制の無い領域で留まることなく輸送された。一方，移動床実験であるCaseMS-1は水制周りのみ洗掘され

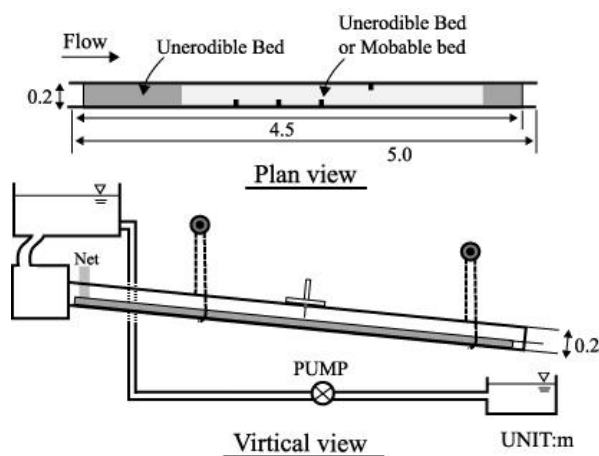


Fig.1 Experimental Flume

Table1 Hydraulic conditions in the expeiment

Parameter			
Bed slope i_e	0.003	$Bl^{0.2}/H_0$	3.11
Water discharge Q (m ³ /s)	0.00125	Water discharge H (m/s)	0.020
Grain size d_m (m)	0.00095	Critical shear velocity u_{*c} (m/s)	0.0228
Grain sized d_m (m)	0.00053	Critical shear velocity u_{*c} (m/s)	0.0175

Table2Experimental cases

Case	Interval length between spur dikes (m)	D/L	Grain size d_m (m)	Sediment discharge (g/min.)
FS-1	0.06	2.0	0.00095	16
FS-2			0.00053	20
FS-3	0.12	4.0	0.00095	16
FS-4			0.00053	20
MS-1	0.12	4.0	0.00095	0

る静的平衡状態であったため，上流からの給砂は行っていない。実験終了後，水制下流域における掃流砂の捕捉効果を確認した。

(2) 実験結果と考察

移動床上に水制を設置したCaseMS-1の河床の様子 (実験開始から20分後) をPhoto1に示す。Photo1より，水制上流域に局所洗掘が，水制下流域に土砂の堆積域が形成されていることがわかる。一方，固定床上に水制を設置し，上流から給砂したCaseFS-1～CaseFS-4では，全ての実験で掃流砂が水制間に捕捉されなかった。つまり，移動床上に設置した水制と異なり，固定床上の水制はその下流域に土砂の堆積地形を創出しなかったのである。これは，上流から輸送されてきたほぼ全ての掃流砂が，最上流に位置する水制の水はね効果によって対岸側へと運ばれ，水制周辺まで到達しなかったためである。

ここで固定床上に設置した水制周りの流れと流砂の輸送状況をPhoto2から説明する (ここでは，確認

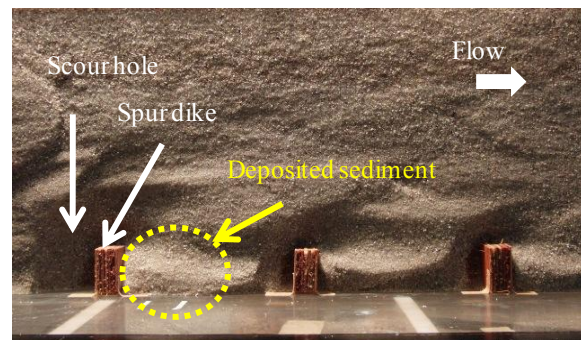


Photo1 Bed validation of CaseMS-1

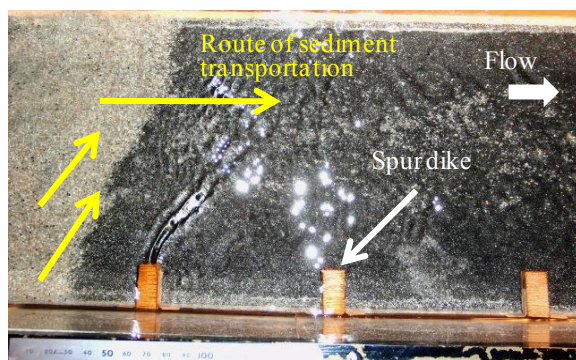


Photo2 Flow and route of sediment transportation around spur dikes on rigid bed

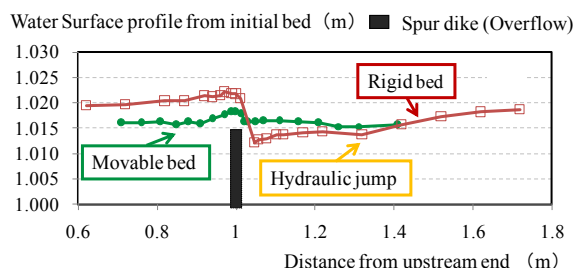


Fig.2 Water surface profile from initial bed (measurement points are 0.02m distance from right wall of experimental flume)

しやすい様に実験より多めの土砂を与えている)。Photo2より、最上流部の水制に強い水はね効果が生じていることが確認できる。流砂は水制付近に到達するまで直線的に流れるが、その後、水路右岸側にある最上流部の水制上流域にてその流向を水路左岸側（対岸側）へと急変させた。これらの流砂は流れの水はね領域より上流側で一度停止し、この領域を超えた後、Photo2の矢印上を留まることなく跳躍・転動形態で下流端まで輸送された。

次に水制を1基のみ残し、水路右岸から0.02mの縦断面における水位の縦断変化を調べた結果をFig.2に示す。ここでは、固定床（CaseFS-3）と移動床（CaseMS-1）を比較している。Fig.2より、水制周りに局所洗掘が生じる移動床と、局所洗掘が生じない固定床とでは、水制前後の水位の縦断変化が大きく異なることがわかる。固定床では水制前後の水位差が移動床の場合よりもかなり大きい。一方、移動床では水制前後の水位差は小さく、水制下流域に跳水現象もみられなかった。これは移動床の場合、流砂の移動方向に沿った流砂の空間分布がほぼなくなるまで河床洗掘が生じるため、水制周りの水深の増大に伴う流速低下が生じ、水制前後の水位差が小さくなるものと考えられる。一方、固定床上に設置され

た水制の場合、その上流域に強い圧力上昇が生じるため、移動床実験よりも水制による強い水はね効果が働いているものと推察される。その結果、上述の実験で示されたように、固定床上を流れる流砂は水制周辺まで到達するまえに対岸側へと流向を変えたと考えられる。

このことから固定床河川に設置された水制は、移動床河川に設置された水制と異なり、上流から流れてくるある程度粒径の大きな掃流砂を水制間へと捕捉し、水制下流域に土砂の堆積地形を創出する機能をほとんど持たないと推察される。そこで次に、数値解析にて固定床上に設置した単一水制周りの流れ構造を定常給水と非定常給水条件ごとに再現し、流れ、流砂の輸送特性および河床変動特性に関する検討を行った。

3. 固定床上の水制周りの流れ、流砂・河床変動特性

(1) 数値解析法

流れの計算には、水深平均された以下の平面2次元浅水流方程式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = & -gh \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ & - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial(hu)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial(hu)}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = & -gh \left(\frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ & - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial(hv)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial(hv)}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2-2)$$

ここに、 x , y は流下方向、横断方向軸、 u , v は x , y 方向の水深平均流速、 h は水深、 g は重力加速度、 ρ は水の密度である。 τ_{bx} , τ_{by} は、 x , y 方向の河床せん断力であり（3-1）式、（3-2）式で表される。また、 ν_t は乱流拡散係数で（5）式で表される。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3-1)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3-2)$$

C_f は対数型抵抗則を用いて以下のように表される。

$$C_f = \frac{1}{(6.0 + 2.5 \ln(h/k_s))} \quad (4)$$

ここに、 k_s は相当粗度、 d は河床材料の粒径である。

$$v_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (5)$$

ここに、 κ はカルマン定数 (=0.4) , u_* は対数型抵抗則から求めた摩擦速度である。

これら2次元浅水方程式の差分にはMacCormack差分法を適用する。運動方程式 (2-1) 式と (2-2) 式には人工粘性係数としてCautionモデルのTVD項を付加している。

河床周辺の流速 u_b と v_b は、流線の曲率より以下のよう表される。

$$u_{bs} = 8.5 u_* \quad (6)$$

$$v_{bs} = -N_* \frac{h}{r} u_{bs} \quad (7)$$

$$u_b = u_{bs} \cos \alpha_s - v_{bs} \sin \alpha_s \quad (8-1)$$

$$v_b = u_{bs} \sin \alpha_s + v_{bs} \cos \alpha_s \quad (8-2)$$

ここに、 $\alpha_s = \arctan(v/u)$ であり、 x 軸からの流速の流向角を表す。 N_* はEngelund (1974) と同様に7とする。 r は流線の曲率であり (10) 式で表される (清水・西本1992)。

$$r = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (9)$$

流砂は掃流砂のみとし、流砂量の算定には芦田・道上式 (芦田・道上, 1972) に河床の局所勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した芦田・江頭・劉 (1992) の式を用いる。ただし、固定床上の流砂量を計算する必要があるため、以下のように固定床上に存在する土砂量をパラメータにした、土砂の存在率 R_b を流砂量式に乗じている。なお、土砂は一樣砂として扱う。

$$q_b = 17 \sqrt{sgd^3} \tau_{*c}^{3/2} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) R_b \quad (10)$$

ここに、 s は砂粒の水中比重 ($=\rho_s/(\rho-1)$)、 ρ_s は砂粒子の密度、 τ_{*c} は粒径 d に対する有効無次元掃流力、 τ_* は粒径 d に対する無次元掃流力、 τ_{*c} は粒径 d に対する無次元限界掃流力で岩垣式 (1956) より求める。 K_c は河床勾配および流向の影響を考慮する係数であり、芦田・江頭・劉 (1992) より (12) 式で表される。

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left(1 + \frac{1}{s} \right) \cos \alpha \frac{\partial z_b}{\partial x} + \sin \alpha \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (11)$$

ここに、 $\alpha = \arctan(v_b/u_b)$ であり、 x 軸からの河床周辺流速の流向角を表す。 μ_s (≈ 0.795) は砂の静止摩擦係数である。 $\partial z_b / \partial x$ 、 $\partial z_b / \partial y$ は、河床周辺流速の流向に対する局所河床勾配である。

縦・横断方向の流砂量の算定には、河床周辺流速の流向および河床勾配を考慮した芦田・江頭・劉 (1992) の方法を用いて求める。

$$q_{by} = q_{bx} \tan \beta_k \quad (12-1)$$

$$q_{bx} = q_b \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \theta_x + \cos^2 \theta_y \tan^2 \beta_k + A}} \quad (12-2)$$

$$A = 0.5 \sin 2\theta_x \sin 2\theta_y \tan \beta_k \quad (12-3)$$

ここに、 θ_x と θ_y はそれぞれ河床の x 、 y 方向の傾斜角である。 β_k は流砂方向と x 軸とのなす角であり、以下の式で表される。

$$\tan \beta_k = \frac{\sin \alpha - \Pi \Theta_y \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \tan \theta_y}{\cos \alpha - \Pi \Theta_x \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \tan \theta_x} \quad (13)$$

$$\Pi = K_t + \frac{1}{\mu_s} \quad (14)$$

$$\Theta_y = \frac{1}{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y} \quad (15-1)$$

$$\Theta_x = \Theta_y + \frac{\cos^2 \theta_x}{s} \quad (15-2)$$

ここに、 K_t (≈ 0.85) は砂礫に働く抗力と浮力の比 (芦田・江頭・劉, 1992) である。

R_b は交換層厚さに関する関数で、Luu・Egashira・Takebayashi (2004) より以下の式で表される。

$$R_b = 1, \quad E_{sd} \geq E_{se} \frac{c_s}{(1-\lambda)} \quad (16-1)$$

$$R_b = \frac{E_s}{E_{se}}, \quad E_{sd} \leq E_{se} \frac{c_s}{(1-\lambda)} \quad (16-2)$$

ここに、 E_{se} は平衡掃流砂層厚さであり、Egashira and Ashida (1992) より (18) 式で表される。 E_s は掃流砂層厚さであり、Luu・Egashira・Takebayashi (2004) より (19-1) 式、(19-2) 式で表される。 E_{sd} は河床の堆積層厚さと掃流砂層厚さの合計値である。

$$\frac{E_{se}}{d} = \frac{1}{c_s \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_* \quad (17)$$

$$E_s = E_{se}, \quad E_{sd} \geq E_{se} \frac{c_s}{(1-\lambda)} \quad (18-1)$$

$$E_s = E_{sd}, \quad E_{sd} \leq E_{se} \frac{c_s}{(1-\lambda)} \quad (18-2)$$

ここに、 c_s (≈ 0.26) は鉛直平均の掃流砂の濃度の近似値である (Egashira and Ashida, 1992)。 $\tan \phi$ (≈ 0.795) は砂の内部摩擦角である。 θ は流砂の輸送方向の局所河床勾配であり、以下の式で表される。

Table3 Hydraulic condition in the numerical simulation

Case	Water discharge	Grain size
	Q (m ³ /s)	d_m (m)
F-1	0.00125	0.00053
F-2	0.0025	0.00053
F-3	0~0.0025	0.00053
F-4	0.00125	0.00020

$$\theta = \arcsin(\cos \beta_k \sin \theta_x + \sin \beta_k \sin \theta_y) \quad (19)$$

河床位方程式は、固定床上を流れる流砂を扱うため、Luu・Egashira・Takebayashi (2004) による以下の掃流砂層モデルを用いている。

$$c_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + (1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0$$

$$, E_{sd}^n \geq E_{se}^n \frac{c_s}{(1-\lambda)} \quad (20-1)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = 0$$

$$c_s \frac{\partial E_s}{\partial t} + \sum \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0$$

$$, E_{sd}^n \leq E_{se}^n \frac{c_s}{(1-\lambda)} \quad (20-2)$$

河床位方程式の空間微分の差分法は、風上差分とする。また、時間微分については、後退差分とする。

(2) 解析条件

数値解析の計算領域は、長さ2m、幅0.2m、勾配0.003の固定側岸を有した直線矩形水路とする。初期河床形状は平坦とし、水制1基を上流から1mの地点の右岸側に設置している。水制サイズは、横断方向の水制長0.03m、流下方向の水制幅0.015m、水制高さ0.1mの非越流型である。上流境界からの流砂量は、芦田道上式から求まる平衡流砂量の1/3とした。なお、流砂量が上述の実験と異なるが、ここでは流砂の輸送特性を確認することを目的しており特に問題はないとしている。

Table3に解析条件を示す。CaseF-1は上述の水路実験と同様の水利条件を与えたものである。CaseF-2は、CaseF-1の2倍の流量を供給し、流量の増加による水制周りの流砂特性の違いを検討するものである。CaseF-3は、流れの非定常性が水制周りの流砂特性に与える影響を検討するものであり、Fig.3に示すハイドログラフを与えている。Case F-4は河床材料の粒径が水制周りの流砂特性に与える影響を検討するものであり、Case F-2よりも細かい粒径の土砂を給砂している。

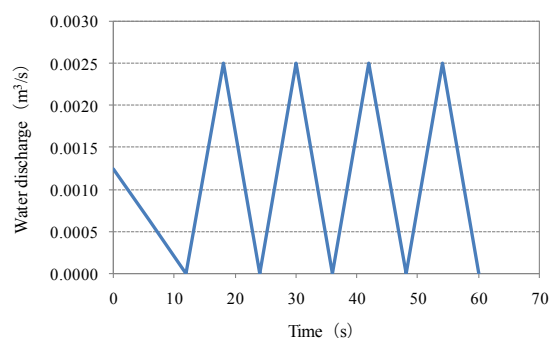


Fig.3 Water discharge of CaseF-3 (Unsteady flow)

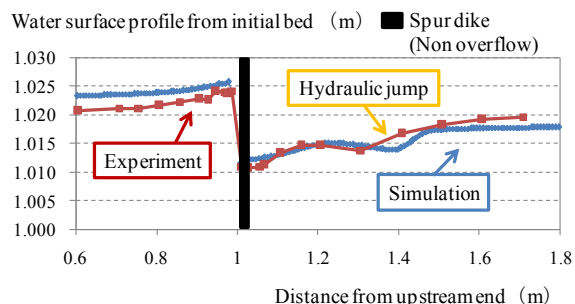


Fig4. Water surface profiles from initial bed compared with experimental test and numerical simulation

(3) 計算結果と考察

(a) 固定床上に設置された水制周りの流砂特性

Fig.4は、右岸から0.02mの縦断面における水位の縦断変化を実験と数値解析で比較したものがある。Fig.5は非越流水制周りの水面形の鳥瞰図である。Fig.4より、数値解析の方が水制上流域の水位がやや高いとともに、水制下流域の跳水も実験より下流側に位置しているが、水面形の縦断変化特性は大まかに表現できており、解析精度はここで言う検討に対して十分と判断できる。

Fig.6 (a) にCase F-1の解析で得られた、流砂存在領域（白）と流砂が存在しない領域（黒）の平面分布を示す。また、Fig.6 (b) に河床周辺の流速ベクトル、無次元限界掃流力以上の領域（白）と無次元限界掃流力以下の領域（灰）の平面分布を示す。ここでは、長時間給砂中に流砂がわずかでも存在していれば流砂存在領域（白）と判断している。Fig.6 (a) より、水制周辺の広い範囲で流砂が存在せず、水制を有する断面は流砂が左岸側に偏っていることがわかる。これは、上述の水路実験と同じ結果であるが、水制周辺の流れの特性が大きく起因している。Fig.6 (b) より、水制上流域には無次元限界掃流力以下の領域が広がることがわかる。そのため、上流からの流砂はFig.6 (b) の破線で示されるように水制を大きく迂回し、Fig.6 (b) の破線で囲まれた領域には流れ込まない。つまり、この破線で囲まれた領域には、

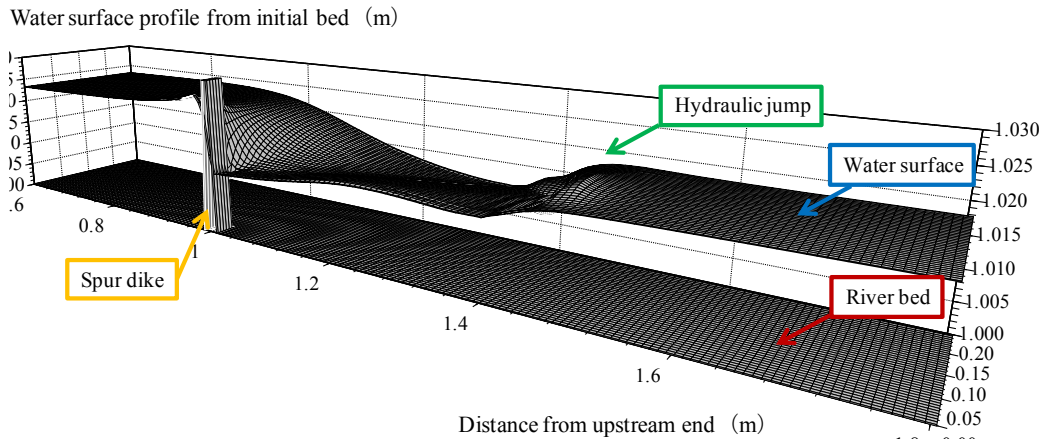


Fig.5 Water surface profile of CaseF-1

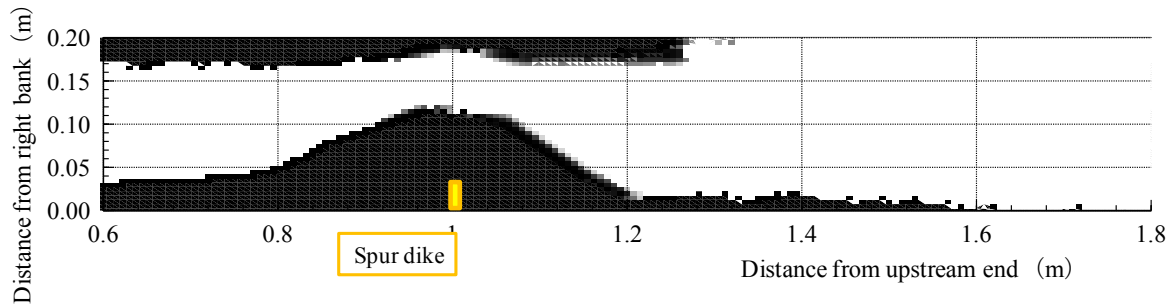


Fig.6 (a) Plan view of sediment transportation around spur dike of CaseF-1.

White Area: Route of sediment transportation, Black Area: No sediment region

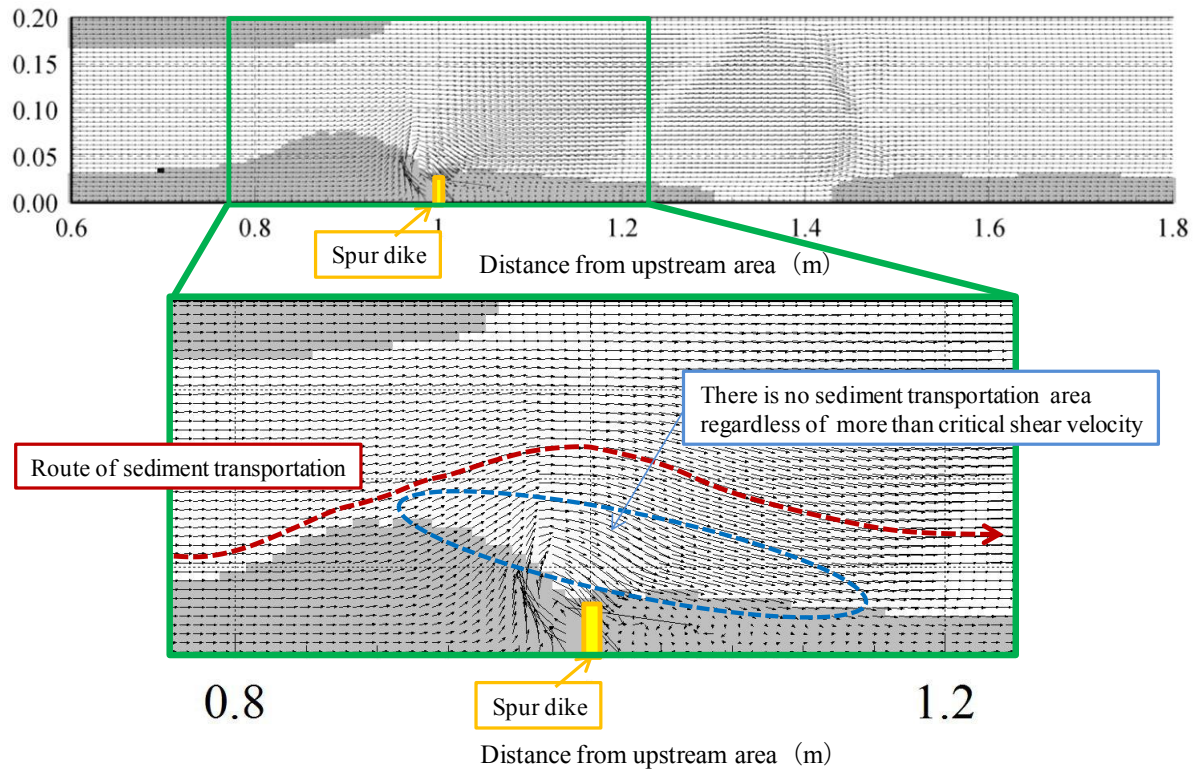


Fig.6 (b) Plan view of flow velocity near the flume bed around spur dike of CaseF-1.

White Area: Area of more than critical shear velocity, Black Area: Area of less than critical shear velocity

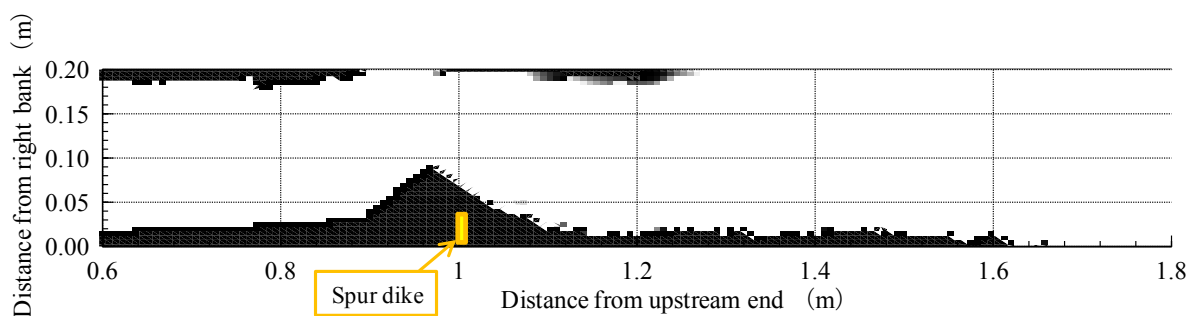


Fig.7 Plan view of sediment transportation around spur dike of CaseF-2 (Steady flow).

White Area: Route of sediment transportation, Black Area: No sediment region

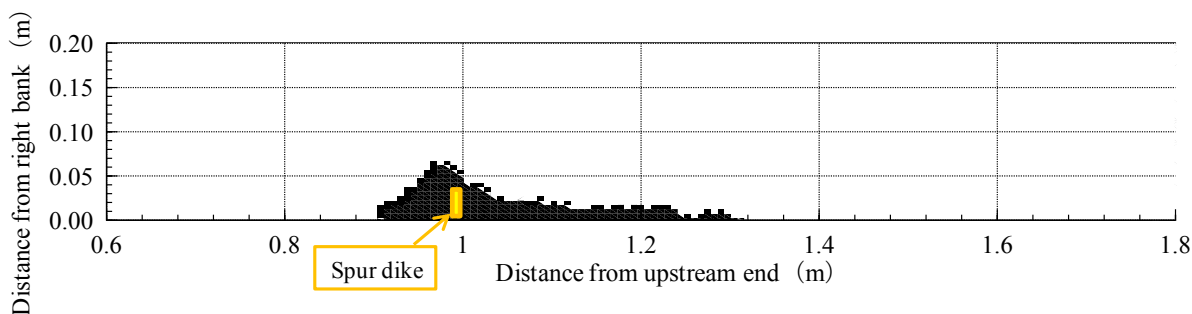


Fig.8 Plan view of sediment transportation around spur dike of CaseF-3 (Unsteady flow).

White Area: Route of sediment transportation, Black Area: No sediment region

流砂を水制下流域へと輸送する方向の無次元限界掃流力を越えた流れが形成されているものの、そもそも水制周辺まで到達する流砂が存在しないために土砂の堆積が促されないといえる。この点が、移動床と固定床に設置された水制周りの流砂特性の大きな違いである。移動床では、水制の下流域に多くの土砂の堆積が見られるが、これは水制先端（主流側）の周辺が局所洗掘され、その砂礫が水制下流域に運ばれて堆積したものである（水谷，2010；Duan，2010 など）。

つまり、固定床では局所洗掘が形成されないために水制上流域に限界掃流力以下の領域が広範囲で形成され、水制下流域へと堆積するための土砂が水制周辺まで流れこまないといえる。このため定常給水条件の場合、上流から流れてきた掃流砂は水制周辺を迂回して流れ、通過、もしくは他の領域に堆積することになる。

(b) 非定常場における水制周りの流砂特性

次に、流れの非定常性が水制周りの流砂特性に与える影響を検討するが、その前に、Fig.3のピーク流量に相当する $0.0025 \text{ m}^3/\text{s}$ （Case F-1の2倍の流量）を流したCase F-2について検討する。Fig.7にCase F-2の流砂存在領域（白）と流砂が存在しない領域（黒）の平面分布を示す。流量が2倍になったため、当然ながら流砂存在領域（白）が増えている。

Fig.8に非定常の給水条件を用いたCase F-3の流砂存在領域（白）と流砂が存在しない領域（黒）の平面分布を示す。Fig.7（Case F-2）と比較すると、流砂存在領域（白）が増えていることがわかる。これは、Fig.9（b）の増水時の水面形の例に示すように、流量の増加・減少時に水面の縦横断勾配が大きくなり、定常給水時とは異なる方向に土砂が流れるためである。Fig.9（b）に示すような流量増加時の水面形では、水制下流域の水面の横断勾配が大きくなり、水制の下流域に土砂が流れ込みやすくなっている。このように、流れの非定常性は、水制下流域への土砂の輸送・交換を促進する効果があるといえる。

(c) 河床材料の粒径が水制周りの流砂特性に与える影響

Fig.10（a）にCase F-1よりも小さい 0.2mm の土砂を給砂したCase F-4の流砂存在領域（白）と流砂が存在しない領域（黒）の平面分布を示す。図より、流砂存在領域がCase F-1よりも広がっており、水制下流域に土砂が流れ込みやすくなっていることがわかる。これは、粒径が小さくなったことにより、水制上流域において、無次元掃流力が無次元限界掃流力を上まわる領域が増え、水制下流域への土砂の流れが出来たためである（Fig.10（b））。つまり、水制周辺では、止水域が形成されるなど、無次元掃流力の分布幅が広いため、砂礫の分級現象が活発といえる。

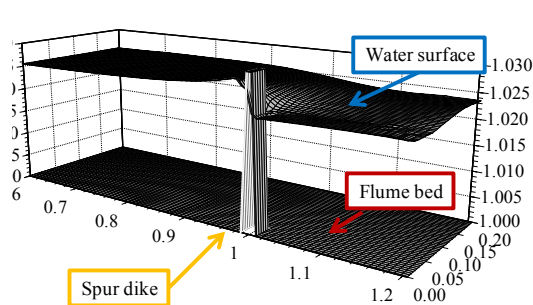


Fig.9 (a) Water surface level from initial bed of CaseF-1 (Steady flow)

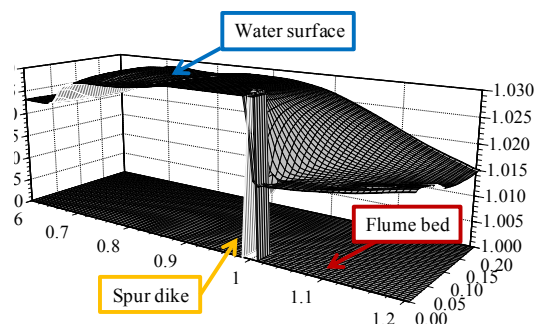


Fig.9 (b) Water surface level from initial bed of CaseF-4 (Unsteady flow)

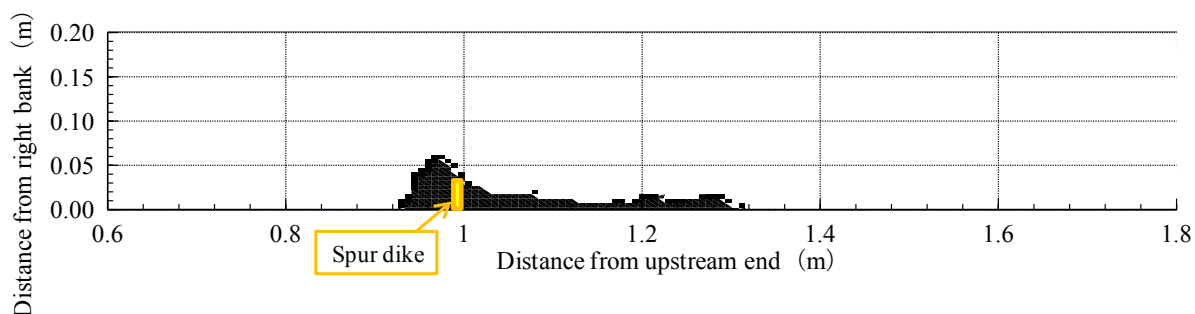


Fig.10 (a) Plan view of sediment transportation around spur dike of CaseF-4 (Steady flow).
White Area: Route of sediment transportation, Black Area: No sediment region

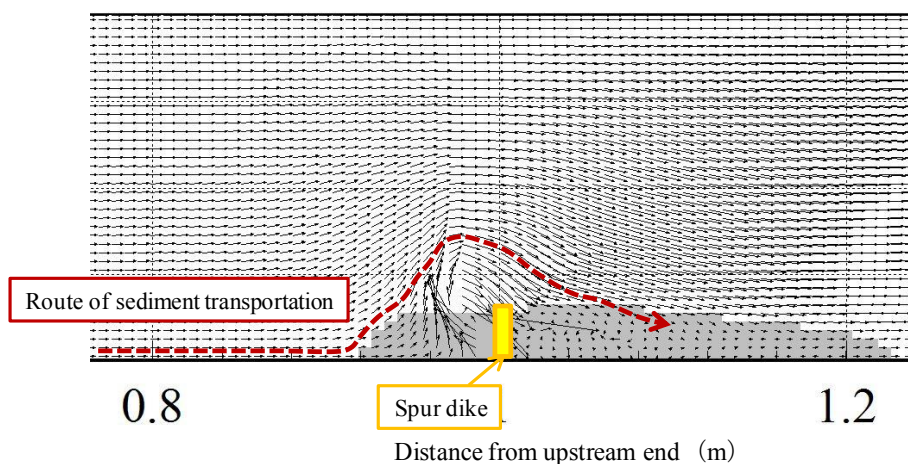


Fig.10 (b) Plan view of flow velocity near the flume bed around spur dike of CaseF-4.
White Area: Area of more than critical shear velocity, Black Area: Area of less than critical shear velocity

そのため、上流から給砂された粗い土砂は、水制下流域に堆積せずに通過することとなるが、細かい土砂は粗い土砂よりも水制下流域に堆積し易いこととなる。

4. おわりに

本研究では固定床化した河道上に土砂を堆積させ

る手法として、移動床上に設置された水制がもつ洗掘と土砂の堆積機能に着目し、固定床上に設置した水制の有効性を水理実験と数値解析から検討した。水理実験の結果、固定床上に設置した群水制は、移動床の場合と異なりその水制間に上流域から供給された砂礫を全く捕捉しなかった。そこで、この理由を数値計算にて水制周りの流れ構造を再現することで検討し、次の結果を得た。

- (1) 固定床上に設置された水制周りには、広い範囲で流砂が存在せず、流砂が水制対岸側へと偏っている。これは、固定床上の水制周りは局所洗掘されないため、水制上流域に無次元限界掃流力以下の領域が広範囲で形成されるためである。このために流砂は水制上流域で対岸側へとその流向を変え、水制周辺まで到達しない。
- (2) 固定床上の水制周辺には、流砂を水制下流域へと輸送する無次元限界掃流力以上の流れが形成されている。しかし、(1)で述べたとおり流砂はこの領域を通過しない。これが移動床上の水制と異なる点であり、固定床上に設置された水制には土砂の堆積を促す効果が弱いことにつながるといえる。
- (3) 非定常流れの場合、流砂の存在する領域が定常流れに比べて広がる。これは、流量増加時、水制前後の水面の横断勾配が大きくなり、水制の下流域へと土砂が流れ込みやすくなるためである。本研究では水理実験を定常流れにて実施したが、流れの非定常性を考慮することで固定床上の水制にも水制下流域への土砂の輸送・交換を促進する効果があるものと推察される。
- (4) 水制周辺では、粒径の小さい流砂ほど選択的に水制に近い範囲を通過して流れる。固定床上の水制周辺では砂礫の分級が活発といえ、上流から給砂された粗い土砂は水制下流域に堆積せずに通過することとなるが、細かい土砂は粗い土砂よりも水制下流域に堆積し易いこととなる。

謝 辞

本研究は日本学術振興会特別研究員DCの助成を受けたものである。

参考文献

芦田和男・江頭進治・劉炳義（1991）：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析，水工学論文集，第35号，pp.383-390

芦田和男・道上正規（1972）：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集報告集，第206号，pp.59-69

池田駿介・杉本高・吉池智明（2000）：不透水制を有する流れの水理特性に関する研究，土木学会論文集，第656号/II-52，pp.145-155

岩垣雄一（1956）：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21

久加朋子・藤田正治・竹林洋史・三橋弘宗・大澤剛士・石田裕子（2011）：コンクリート三面張り河川における河川生物の生息場所再生に関する技術検討，河川技術論文集，第17号，pp.503-508

木村一郎・細田尚・村本嘉雄（1998）：止水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性，水工学論文集，第42号，pp.1057-1062

清水康行・西本直史（1992）：2次流を考慮した2次元モデルによる河床変動計算，開発土木研究所，第95号/II-20，pp.63-80

竹林洋史（2005）河川中・下流域の河道地形，なぐれ，第24号，pp.27-36

谷祖鵬・赤堀良介・池田駿介（2010）：水制周辺における流れの瞬間構造と浮遊砂輸送の関係に関する研究，混相流，第23号，pp.615-626

福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司（1998）：越流型水制周辺の流れと河床変動，水工学論文集，第42号，pp.997-1002

水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩（2010）：混合砂河床における水制周辺の局所洗掘及び粒度変化に関する研究，水工学論文集，第54号，pp.808-808

武藤裕則・北村耕一・馬場康之・中川一（2005）：ADCPを用いた水制域における流速分布計測，水工学論文集，第49号，pp.637-642

Duan, J.G. (2010) : Mean Flow and Turbulence around a Laboratory Spur Dike, Journal of hydraulic engineering, ASCE, Vol. 135, No. 10, pp.803-811

Egashira, S. and Ashida K. (1992) : Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, Advances in Micromechanics of Granular Materials, (Edited by H.H.Shen et al.) Elsevier, pp.391-400

Engelund, F. (1974) : Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. Journal of hydraulic division, ASCE, Vol. 100, No. HY11, pp.1631-1649

Hartman and Titus (2010) : Fish use of artificial dike structure in a navigable river, River Research and Applications, 26, pp.1170-1186

Loc X. L., Egashira S. and Takebayashi H. (2004) : Investigation of Tan Chau Reach in Lower Mekong Using Field Data and Numerical Simulation, Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.48, No.2, pp.1057-1062

R.R.Radspinner, P.Diplas, A.F. Lightbody and F. Sotiropoulos (2010) : River Training and Ecological Enhancement Potential Using In-Stream Structure. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol136, No12, pp.967-980.

Shields F., Cooper C.M., Knight S.S. (1995) : Experiment

Sediment Transport Characteristics around a Spur Dike Installed on the Rigid Bed

Tomoko KYUKA ⁽¹⁾, Masaharu FUJITA and Hiroshi TAKEBAYASHI

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Spur dike which is set on movable bed is expected to create new aquatic habitats according to produce local scour and sediment deposition area. In this study, we focused on rigid bed and discussed whether spur dikes will be able to create sediment deposition area on the rigid bed. Experimental flume tests and numerical analysis were conducted to confirm the characteristics of flow, sediment transport and bed deformation around spur dikes on rigid bed. These results showed that sediment was not deposited in downstream area of spur dikes, because shear velocity is too smaller than the critical shear stress in upstream wide range of a spur dike. As a result, all bed materials were transported to the opposite bank side. Thus spur dike on rigid bed didn't promote to deposit sediment in the downstream area of a spur dike. However numerical analysis showed the possibility that unsteady flow promotes to deposit sediment in the downstream area of a spur dike, because the large transverse water surface gradient was formed in the downstream area of a spur dike during water discharge increase.

Keywords: rigid bed, spur dike, sediment transportation, bed deformation