

1. はじめに

水制は河岸浸食を防御する治水構造物として利用されている。その一方で、河川環境に多様性を与える手段として利用される面もあり、河川の景観保護および水生生物の生息地の創造などが期待される。近年では、木曾三川の下流部において干潟の減少が問題になっており、水制を連続して並べた水制群を各所に設置し、水制の機能の一つである土砂の堆積による干潟の再生を期待している。しかし、出水時において、河川流量の増加に伴う水制の越流流れが、水底の土砂の巻き上げおよび土砂流出を引き起こし、河床の土砂が減少し干潟を造成するための土砂堆積がままならないことが指摘されている。そこで本研究では木曾川における水制群の一部を参考にし、出水時に水制群が堆積促進にどのように影響しているかを実験的に検討したものである。主に浮遊砂による堆積および水制区間での流れに着目し、固定床において水制区間の土砂の堆積および、流出状況および流れの構造を調べた。

2. 実験方法

不透過型水制を用いてその形状および設置間隔を変化させることで、土砂堆積および流れ構造に与える影響を評価した。本実験では、等間隔に設置した6個の水制群のうち、上流側からの影響が顕著に表れる第1, 第2水制区間および第2, 第3水制区間(遷移領域)に加え、流れ構造が収束する第4, 第5水制区間(平衡領域)に着目し計測を行った。

(1) 固定床土砂堆積実験

土砂堆積実験で使用する水路は長さ 6m, 幅 B=30cm, 水路勾配 I=1/1000 のアクリル製長方形断面水路とする。使用した水制の形状については図-1に示す。水深は水制を越流する状況のため、最後尾の水制から1m下流で5cmとし、下流の堰によって調整した。実験水路は固定床とし、貯水槽に250Lの水と8号砂6kgを入れ、攪拌した状態でポンプにより循環させた。8号砂は掃流砂・浮遊砂が混在する条件になっている。実験条件を表-1に示す。x座標の原点は水制上流端とし、y座標の原点は右岸、z座標の原点は河床高さとした。各水制形状について、水制区間の等間隔設置距離 b を10cm, 15cm, 20cmと変化させ(それぞれ水制形状名後に1,2,3をつけたものをケース名とした。), 水を3時間循環させた後、砂の堆積形状を、レーザー距離計を用いて測定した。測定は第1水制, 第2水制区間, 第2水制と第3水制区間および第4水制, 第5水制区間で行っ

表-1 実験水理条件

	流量 Q (L/s)	水深 h (cm)	平均流速 U _m (cm/s)	フルード数 Fr	水路勾配 I
土砂	3.8	5.0	25.3	0.36	1/1000
PIV	3.4	5.0	22.7	0.32	1/1000

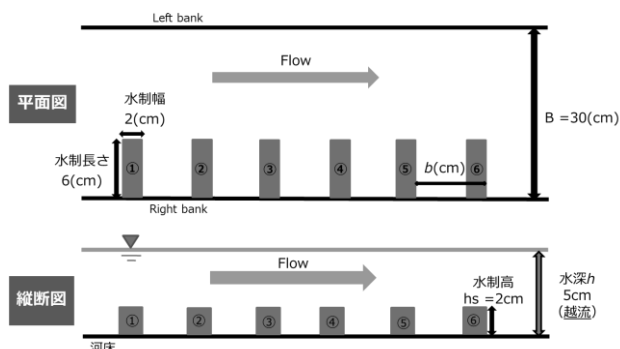
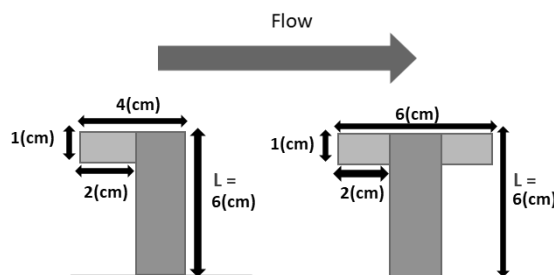


図-1 実験水路の平面図(上図)および縦断面図(下図)



CASE名 (流下方向右向)	I	LD	LU	T
水制形状 (不透過)				

図-2 水制形状(上図)および実験ケース名(下図)

た。

(2)PIV 実験

流れ構造の実験にあたり、長さ 7.5 m, 幅 0.3 m で勾配 1/1000 の長方形断面開水路において PIV 法により流速を計測した。実験水路は図-1に示すように、右岸側に6個の水制群を等間隔で設置した。実験条件は表-1に示す。x座標の原点は水制上流端とし、y座標の原点は右岸、z座標の原点は河床高さとした。

PIV 計測の流れの可視化には、直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3 mm のシート状にしたグリーンレーザー光を開水路水平断面

および鉛直断面に照射し、水表面および壁面からビデオ撮影した。撮影は遷移領域である水制 1-2 間、2-3 間および平衡領域である水制 4-5 間の 3 回に分けて行い合成した。レーザー光の照射位置は、各ケースにおいて水平 8 断面 ($z=5,10,15,20,25,30,35,45\text{mm}$) および鉛直 6 断面 ($y=5,15,25,35,45,55\text{mm}$) を計測した。この可視化画像は高速度カメラ (Ditect HAS-U1) を用いて 1024×1024 (pixel) の画像を $1/200\text{s}$ で撮影し、画像計測には FlowExpert (カトウ光研) PIV 解析ソフトを用いて流速ベクトル計測を行った。相互相関法により画像を水平面については 24×24 (pixel)、縦断面については 16×16 (pixel) の検査領域で解析して、3200 個 16 秒間平均値の平面流速ベクトルデータを得た。

3. 実験結果

(1) 固定床土砂堆積実験

水制区間隔 $b=15\text{cm}$ における固定床土砂堆積実験の各ケースの水制 4-5 間における測定結果を表-2 および図-3 に、このときの各水制区間の土砂堆積量を図-4 に示す。

I2 については、図-4 より遷移領域である 1-2 および 2-3 水制区間の土砂堆積量に対し、平衡領域である 4-5 水制区間の土砂堆積量は多くなっており、図-3 (b) よりその堆積形態は水制区間内に広く堆積している。

図-3 および図-4 より他の 3CASE と比較して、LD2 の平衡領域である水制 4-5 間は同 CASE の 1-2 および 2-3 水制区間の土砂堆積量との差がみられなかった。また、LD2 の平衡領域である水制 4-5 間は水制区間中央部主流側に土砂の堆積がないことおよび水制背後に局所的に土砂が堆積していることか

表-2 各水制区間における土砂堆積量($b=15\text{cm}$)

	I2	LD2	LU2	T2
1-2	20.5	14.4	28.2	25.9
2-3	18.2	11.3	27.5	28.4
4-5	33.7	13.3	55.5	44.6
合計堆積量(cm^3)	72.4	39.0	111.2	98.9

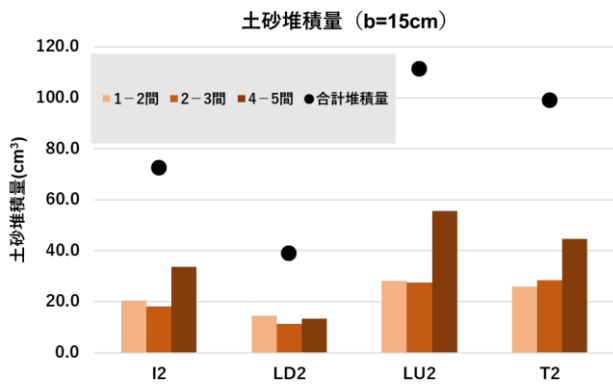
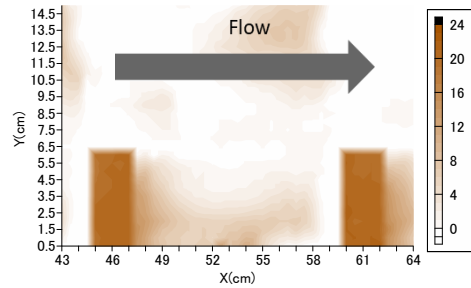
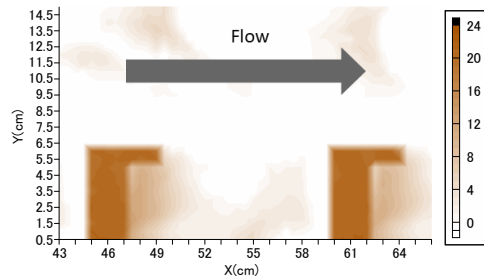


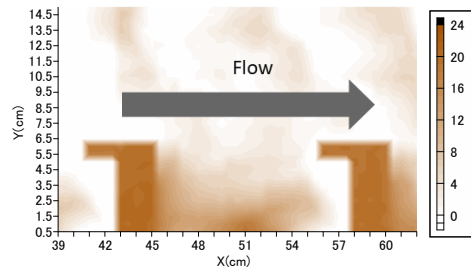
図-3 各水制区間における土砂堆積量($b=15\text{cm}$)



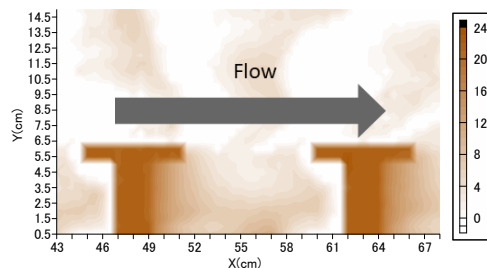
(a) I2 の水制 4-5 間



(b) LD2 の水制 4-5 間

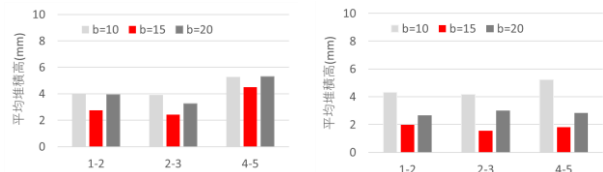


(c) LU2 の水制 4-5 間



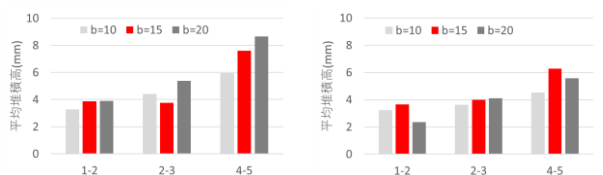
(d) T2 の水制 4-5 間

図-4 $b=15\text{cm}$, 水制 4-5 間の土砂堆積コンター図から局所的掃き出しが起きていると考えられる。



(a) I

(b) LD



(c) LU

(d) T

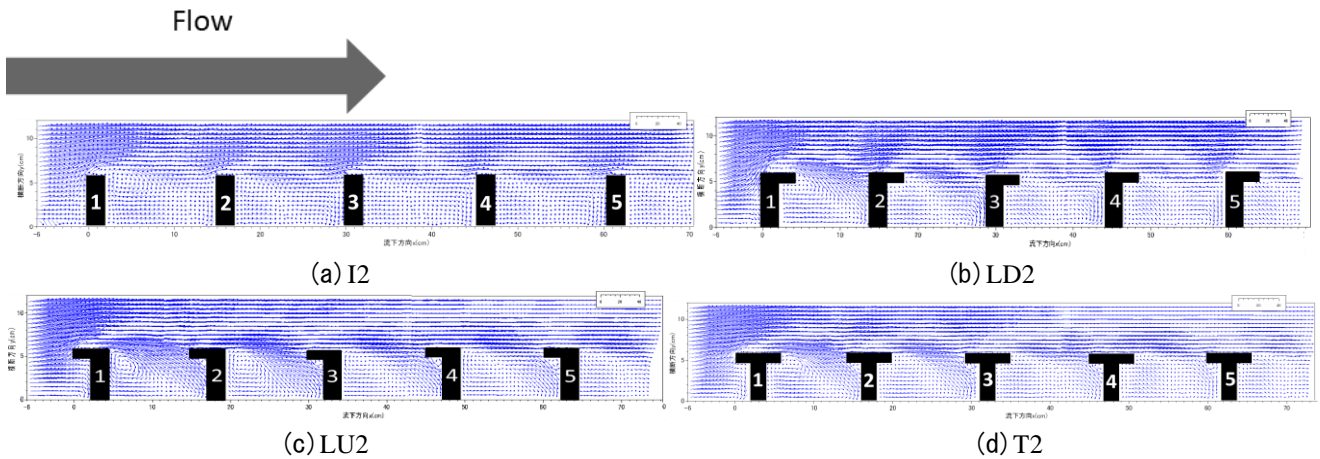


図-6 水制区間隔 $b=15\text{cm}$ の各水制形状の底面近傍($z=5\text{mm}$)における流速ベクトル図

図-5 平均土砂堆積高

I2の堆積量と比較すると、どの水制区間においても土砂堆積量が小さいことから、水制形状が水制区間への土砂の流入を抑制、もしくは水制区間の土砂の掃き出しに影響していると考えられる。

これに対して LU2 は I2 と比較すると各水制区間の土砂堆積量は大きく、その合計堆積量は約 1.5 倍であった。また、水制 4-5 間の右岸側に比較的堆積が集中し、水制区間に広く土砂堆積していることから、水制形状が水制区間への土砂の流入の促進に影響していると考えられる。

T2 については、合計堆積量は I2 よりも大きい、平衡領域である 4-5 水制区間における土砂の堆積形態は類似している。これは水制形状 LD による水制区間への土砂流入抑制効果および水制形状 LU による水制区間への土砂流入促進効果が互いに相殺し合ったことによるものと考えられる。また図-3 より他の 3CASE と比較すると水制の下流側における土砂の非堆積区間の面積が小さいことが分かる。この原因についても水制形状の相殺効果によるものと考えられる。

図-5 に各水制形状の平均土砂堆積高のグラフを示す。I に関しては $b = 15\text{cm}$ の平均堆積高が低いものの、平衡領域である 4-5 水制間においては水制間隔による違いはさほど見られなかった。

LD に関しては $b = 10\text{cm}$ で最大の平均堆積高がみられたが、これは LD 形状の土砂堆積を妨げる効果が、水制間隔が短すぎたために顕著に現れなかったためと考えられる。

LU については全体として水制間隔が大きくなるほど水制区間内の平均土砂堆積高も増加する傾向が見受けられた。これは、水制間隔の大きさが LU 形状の土砂堆積促進効果をさらに助長していると考えられるため、PIV 実験の測定結果をもとにこの原因を考察していく。

T に関しては $b = 20\text{cm}$ で各水制区間において平均堆積高が概ね減少に転じたことから、本実験の水力条件および水制形状条件において、 $b = 15\text{cm}$ ($b/L = 2.5$) が土砂堆積促進に最も適していると考えられる。

(2) PIV 実験

水制区間隔 $b=15\text{cm}$ の各 CASE における $z=5\text{mm}$ (底面近傍) の水平面流速ベクトル図を図-5 に示す。

図-6(a) より、I2 については、遷移領域では水はねによる偏流および主流からの離流が生じているが、平衡領域へと進むにつれてその勢いは弱まる。これにより水制区間へと流入していたはく離流が弱まり、次第に水制区間内で滞流を生じるようになる。これにより平衡領域における水制区間内の広い土砂堆積が促されたと考えられる。

図-6(b) より、LD2 については、水制設置位置の主流側に流速ベクトルが集中していることから、はく離流が水制に衝突し主流側への強い偏流を起こすことにより、その後方の水制区間への土砂の流入が抑制されていると考えられる。また、平衡領域における水制区間中央部主流側の非堆積領域については、主流側への偏流により主流側からのはく離流が抑制されたことにより、水制を越流した流れが河床に当たり、放射状に広がる流れが強く表れていることによると考えられる。また、この放射状流れのうち、水制の上流側への流れの流速が遅くなり、滞流が起こることにより水制の上流側に局所的な土砂堆積がおこると考えられる。

図-6(c) より、LU2 については、他の CASE と比較すると主流からの離流が平衡領域においても弱まることなく水制区間内へと流入していることが分かる。このことについては水制頭頂部の凸部形状が水制上流側の水制区間内へのはく離流の流入を誘導していることが原因であると考えられる。

図-6(d) より T2 については水制区間内へ流入するは

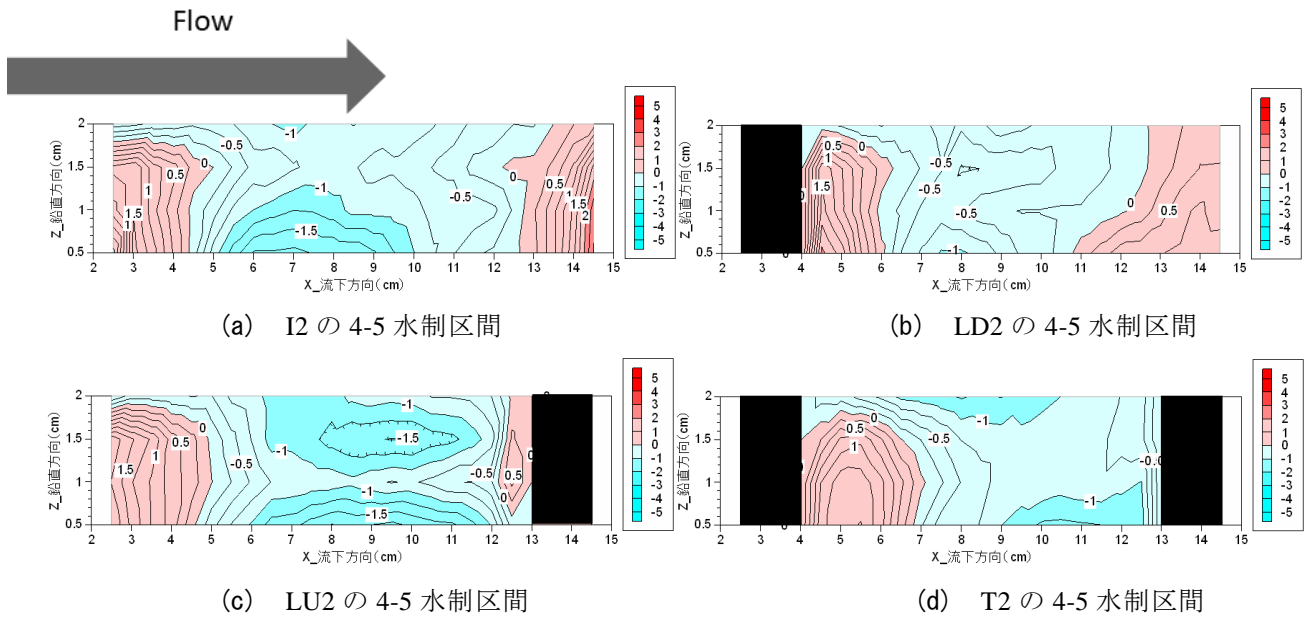


図-7 y=5.5cm(水制区間縦断境界面)における横断流速コンター

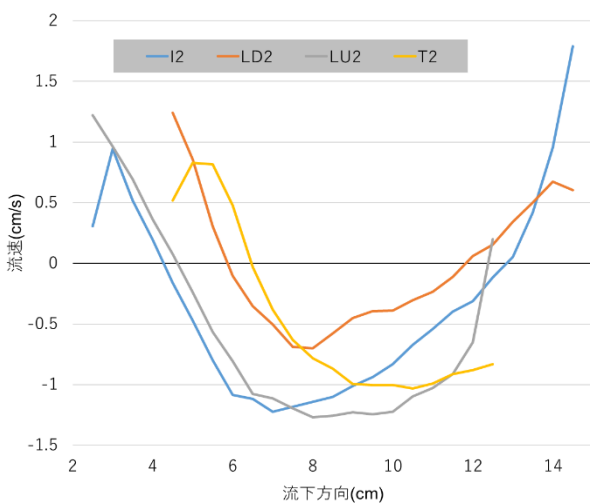


図-8 鉛直方向平均 4-5 水制区間横断流速

く離流が確認できるが、LU2 よりも弱いと考えられる。主流側と水制区間の境界面である河岸から 5.5cm の縦断面における横断流速コンターを図-7 に示す。

主流側から水制区間内へ流入するはく離流により各 CASE とも水制区間中央部から水制区間内への流入がみられるが、土砂堆積量の最も大きかった LU2 については水制区間への流入速度が速いことが分かる。一方で土砂堆積量が最も小さかった LD2 は水制区間への流入速度が他の CASE と比較して遅いことが分かる。

また T2 について、水制区間縦断境界面の下流側において主流側への流出速度が正であることから、平衡領域の水制区間下流側の非堆積区間が小さくなっていると考えられる。

4. おわりに

本研究では水制の頭頂部形状が水制区間の土砂堆積および流れ構造に与える影響を評価した結果、LU 型水制および T 型水制が平衡領域において水制区間内での土砂堆積を促す作用があること、また LD 型水制は水制区間内の土砂を洗掘する可能性があることを確認した。今回得られた知見から、LU、T 型水制については底面近傍において主流からのはく離流を誘発することにより土砂堆積を促進させたこと、また LD 型水制については、主流側への偏流により主流側から水制区間内へ流入するはく離流が弱まり、水制を越流した流れが水制区間中央部側壁側から放射状に広がることで、掃き出しおよび局所的堆積を引き起こしたと考えられる。

今後は縦断面の PIV 解析結果をもとに水制周辺の 3 次元流れ構造を把握し、養浜した場合の土砂堆積実験などから、土砂の堆積および洗掘のメカニズムのさらなる検討が必要となる。

参考文献

- 1) 富永晃宏, 井嶋康二: 越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制区間隔の効果, 土木学会論文集第 46 巻
- 2) 富永晃宏, 田中典秀: 越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集第 48 巻.
- 3) 富永晃宏, 井嶋康二, 中野義郎: 斜め越流型水制周辺の流れ構造の PIV 解析, 水工学論文集第 45 巻
- 4) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高, : 不透水水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集第 43 巻
- 5) 谷祖鵬, 赤堀良介, 池田駿介: 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,