

1. はじめに

近年、河川環境への意識が高く、工学に携わる者の間だけでなく、地域住民の間にも広まってきた。その機運と相まって河川法改正により「河川環境の整備と保全」が加わり、治水および利水でなく、環境を重要視することが法律として明記された。そこで、90年代から施工例が増えてきている聖牛に着目した。聖牛は河岸・河床の侵食防止機能を有し、自然素材を利用するため河川景観に馴染み、適度な空隙が生態系に良い影響を与えるといった多くの利点が挙げられる。また、戦国時代に武田信玄が考案したと云われ、文化的な価値も高いといえる。しかし、聖牛に関する研究はほとんどされていないため、機能、設置方法などは経験的な判断で施工されている状況にある。ゆえに聖牛の水利機能について模型実験を用いて検討しようと試みた。

本研究では聖牛の水利機能として経験的に云われている聖牛群の水はね効果、背後の減速効果、河岸侵食防止効果について重点を置き、聖牛周辺の流れと河床変動について「配置」「間隔」「勾配」の条件で比較、検討した。

2. 実験方法および実験条件

実験水路は水路幅 $B=59.3\text{cm}$ 、深さ 30cm 、長さ 13m の勾配可変型長方形断面開水路である。水路勾配は実験条件に応じて変更した。実験に用いた聖牛モデルは $1/80$ 縮尺の大聖牛で 2mm と 3mm のラミン丸棒を構造とし、蛇籠の代わりに同径の鉄丸棒を使用した。概略図を図 - 1 に示す。円柱粗度には直径 5mm のラミン棒を使用した。

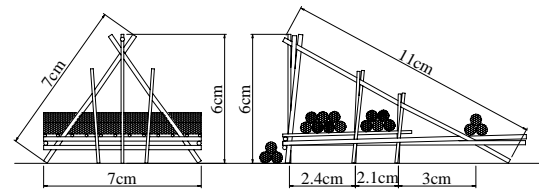


図 - 1 聖牛概略図

実験条件は表 - 1 に示すように設定した。水路勾配は実験条件で異なり $1/1000, 1/500, 1/300$ としている。聖牛群および円柱群の配置は上流側から $5\text{m}40\text{cm}$ を基準に $x=0\text{cm}$ とし、ケース G-3, G-2, E-3, E-2 では $x=0\text{cm}$ に 1 群配置した。聖牛群を複数配置するケース G4-3, G6-3, E6-3, G8-3... では粗度群数を全て $g=4$ とし、 $x=0\text{cm}$ の基準面から群間隔 X で配置した。群間隔 X は大井川の施工されていた 6 倍を基準長さとし、4 倍、6 倍、8 倍に設定した。1 群あたりの聖牛配置は粗度配置数 $m=3$ のケース G-3, E-3, G6-3, E6-3... は前列 2 基後列 1 基の計 3 基とし、 $m=2$ のケース G-2, E-2, G6-2 では前列 2 基とする。円柱群配置はケース D6-3 では流下方向 10 本、横断方向 6 本を 2.5cm ピッチで直交配置し、ケース D6-3c では流下方向 5 本、横断方向 6 本を 5cm ピッチで千鳥配置し、ケース D6-2 では流下方向に 5 本、横断方向 6 本を 2.5cm ピッチで 6 本を直交配置した。流量 Q は各勾配で設定し、 $m=3, X/l=6$ で配置した場合の聖牛群上流 90cm の水深 h が 6.5cm になるように設定した。 $s=1/1000, 500, 300$ では $Q=15, 16.5, 19.5\text{l/s}$ である。水深 h は $x=-90\text{cm}$ の平均値の値であり、平均流速 Q は $x=-90\text{cm}$ の断面平均流速である。 U_{*c}/U_{*} は砂が移動を始める限界の摩擦速度 U_{*c} を $x=-90\text{cm}$ の摩擦速度 U_{*} で除した値である。

表 - 1 実験条件表

CASE	配置粗度	水路勾配 s	粗度群数 g	1群あたりの粗度個数 m	粗度長さとの間隔の比 X/l	流量 Q l/s	平均流速 U_m m/s	水深 h m	Froude 数 Fr	Reynolds 数 Re	U_{*c}/U_{*}	流速計測	河床高計測
G-3	大聖牛	1/1000	1	3	-	15.0	0.394	0.0633	0.500	21916	1.1872		
G-2	大聖牛	1/1000	1	2	-	15.0	0.396	0.0621	0.508	21384	1.1759		
G6-3	大聖牛	1/1000	4	3	6	15.0	0.385	0.0657	0.480	21694	1.2095		
G6-2	大聖牛	1/1000	4	2	6	15.0	0.386	0.0655	0.482	21528	1.2076		
G4-3	大聖牛	1/1000	4	3	4	15.0	0.384	0.0658	0.479	20922	1.2104		
G8-3	大聖牛	1/1000	4	3	8	15.0	0.378	0.0670	0.466	20717	1.2214		×
F6-3	大聖牛	1/500	4	3	6	16.5	0.424	0.0657	0.528	22295	1.7104		×
E-3	大聖牛	1/300	1	3	-	19.5	0.528	0.0621	0.677	25818	2.1457		
E-2	大聖牛	1/300	1	2	-	19.5	0.549	0.0607	0.712	25575	2.1214		×
E6-3	大聖牛	1/300	4	3	6	19.5	0.504	0.0653	0.630	26286	2.2003		
D6-3	円柱粗度	1/1000	4	60	6	15.0	-	-	-	-	-	×	
D6-3c	円柱粗度	1/1000	4	30	6	15.0	-	-	-	-	-	×	
D6-2	円柱粗度	1/1000	4	30	6	15.0	-	-	-	-	-	×	

流速計測には2成分電磁流速計を用いた。本実験では主流速成分(u)と横断流速成分(v)を計測した。座標系は水路中央方向に沿う方向をx軸、これに直角な水平方向をy軸、鉛直方向をz軸とした。計測断面位置はm=1ではx=-90cmと-30cm~130cmまでの22断面とし、m=4, X/l=4,6,8では第3聖牛群上流側20cm~第4聖牛群20cmまでの22断面~25断面とし、聖牛群周辺を詳細に計測した。横断面内における計測点は横断方向に15点、鉛直方向にz=1.5cm, 5cmの2点とした。z=1.5cmの流速U,Vから底面せん断応力を間接的に求めるため、超音波ドップラ流速計で底面1mmから42mmを詳細に計測し流速鉛直分布の対数則フィッティングにより摩擦抵抗係数 C_f を算定し次式から計算した。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho C_f}{2} U_b \sqrt{U_b^2 + V_b^2} \quad (1)$$

ここで、限界掃流力 $\tau_c = \tau_{bx}$ となる主流速を $U_{Cl.5}$ とすれば $U_{Cl.5} = 35.45 \text{ cm/s}$ になる。Vは考慮していない。水深はデジタルポイントゲージによって計測した。

移動床実験は水流が安定する上流側より4m50cmから10m50cmの6mを移動床区間とし、平均粒径

0.08cmの砂を厚さ11cmに平らに敷き詰めた。対象は静的洗掘のみで、上流からの給砂は行っていない。通水3時間後の河床形状を計測した。聖牛は河床面に置き固定していない。円柱群は固定している。

3. 聖牛配置が及ぼす流れと河床変動

聖牛は実河川では1基だけでなく、3基または5基を1群として用いられている。本実験では前列2基後列1基の計3基配置のケースG-3と前列2基配置のケースG-2の水はね効果、減速効果、河岸・河床洗掘防止効果について比較、検討を行う。

図-2にケースG-3,G-2のz=1.5,5cmの(U,V)流速ベクトル図を示す。以下説明するにあたって、聖牛群前列の側壁側の聖牛を1番聖牛、主流側の聖牛を2番聖牛、後方の聖牛を3番聖牛とし、説明する。両ケースの聖牛群頭部で対岸に向かう水はねが発生している。聖牛群背後においてはケースG-3, z=1.5cmでは聖牛群中心軸y=7.5cmの流速が最も減速され、横断方向に窪んだ流速分布を示すことから後流状態になる。このため聖牛群背後と主流域の流速差が生じ、主流境界と水路側壁近くから中心軸に向かう流れが発生している。このような乱れの収束が中心軸に沿う上昇流を誘起し、2次流を発生させている可能性がある。このため、z=5cmでは流下する過程で減速される傾向を示す。一方、ケースG-2ではz=5cmのy=7.5,10cmで大きな値を示しy=2.5,

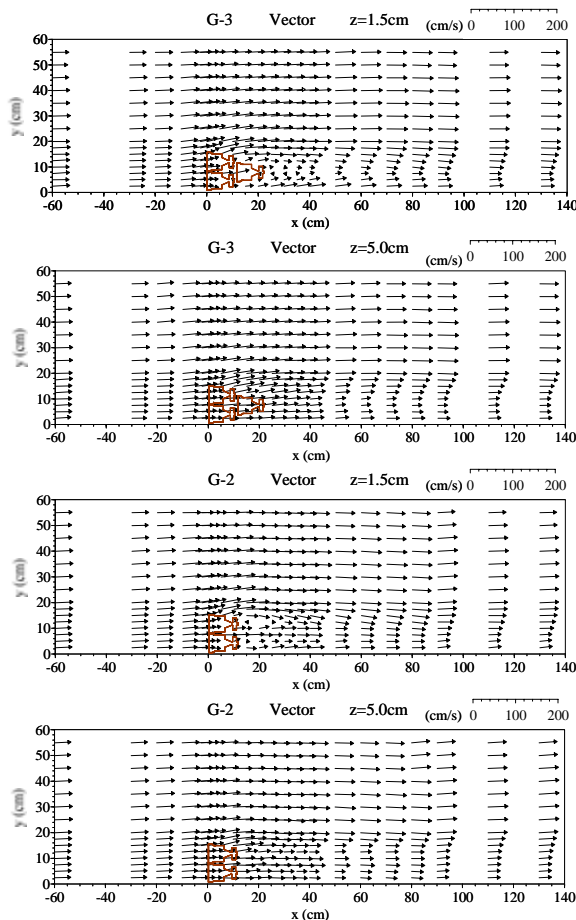


図-2 (U,V)流速ベクトル図

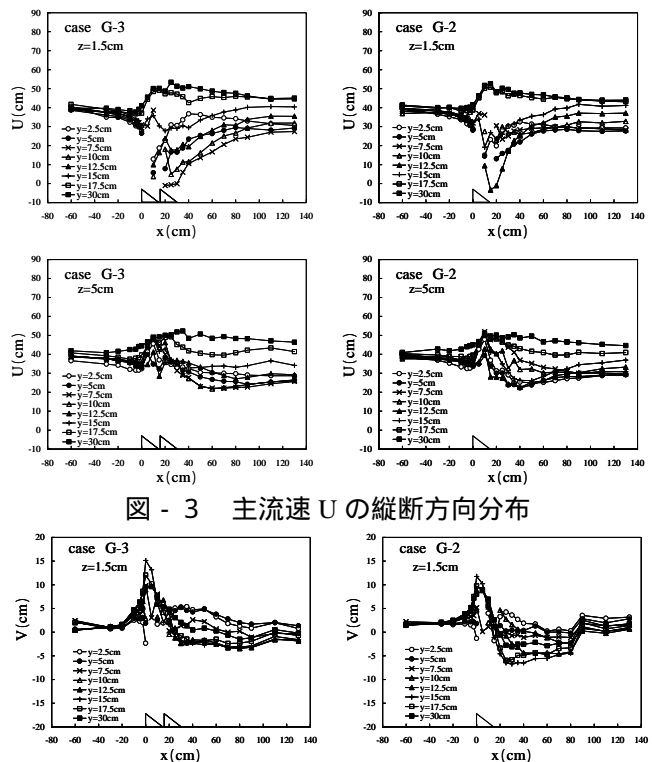


図-3 主流速Uの縦断方向分布

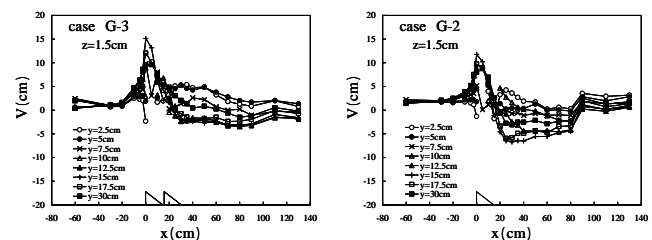


図-4 横断方向流速Vの縦断方向分布

5cm と $y=12.5, 15\text{cm}$ で小さな値を示すことから噴流状態になっていることがわかる。その結果、聖牛群後方の流速の回復がケース G-3 より早くなる傾向を示す。図 - 3 にケース G-3, G-2 の主流速 U の縦断方向分布を示す。聖牛群域 $y=2.5\text{cm} \sim 15\text{cm}$ の $z=1.5\text{cm}$ の流速は聖牛群直後で最も遅くなり、流下するにつれて加速する傾向を示すが、 $z=5\text{cm}$ では聖牛群内で加速し、流下するにつれて減速する傾向を示す。これは聖牛の上部と下部の構造的な密度から生じる。ケース G-3 では $y=7.5\text{cm}, 10\text{cm}$ の流速は3番聖牛の水はねにより大きく減速するが、 $y=2.5\text{cm}$ の流速は水はねにより著しく加速される。一方ケース G-2 では $y=7.5, 10\text{cm}$ の流速は3番聖牛がないためほとんど減速していない。図 - 4 にケース G-3, G-2 の横断方向流速 V の縦断方向分布を示す。聖牛群頭部 $x=0\text{cm}$ で水はねによる大きな値を示し、ケース G-2 は $V=12\text{cm/s}$ 、ケース G-3 は $V=15\text{cm/s}$ を示すことから、水はねは3基配置の場合にやや強く現れることわかった。聖牛群後方においては $y=7.5\text{cm}$ を境に正の値と負の値に分かれて分布し、その傾向が持続されることがわかる。

次に河床変動について検討する。図 - 5 にケース G-3, G-2 の河床コンターを示す。ケース G-3 では聖牛群後方の洗掘しない領域が広範囲に分布している。

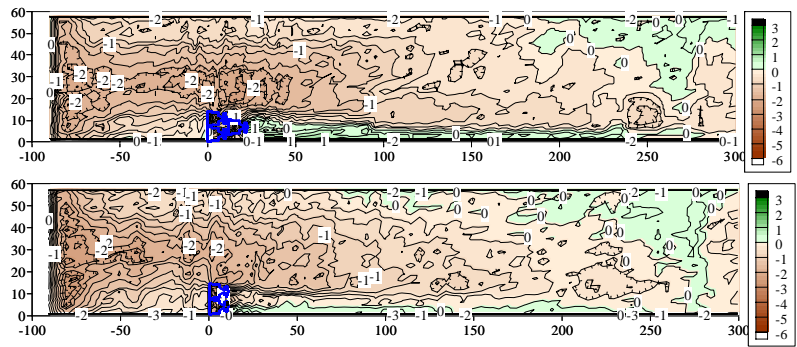


図 - 5 河床コンター

これはケース G-3 では聖牛群後方の減速効果が強く、持続性が高いからである。聖牛群直後の堆積は聖牛群配置部の洗掘による掃流砂が後方に運搬されたと考えられる。2番聖牛は聖牛頭部の洗掘により主流側に傾いていた。

4 聖牛群間隔が及ぼす流れと河床変動

聖牛群は一般に河岸一帯の侵食防止を目的として複数群を設置して使用されることが多い。そこで、実河川の例、聖牛長の6倍の間隔を基に、群間隔と粗度長の比 X/l を4, 6, 8 と設定し、 $X/l=6$ の妥当性と最適間隔の検討を試みた。計測区間は流速の変化の激しい遷移領域を避けるため、第3聖牛群と第4聖牛群の周辺を計測した。図 - 6 にケース G4-3, G6-3, G8-3 の $z=1.5\text{cm}$ の (U, V) ベクトル図を示す。全てのケースにおいて第3聖牛群と第4聖牛群間で後流状態を示し、ケース G8-3 においても減速効果が大きく、流下に伴う回復も緩やかである。図 - 7 にケース G4-3, G8-3 の $z=1.5\text{cm}$ における主流 U の縦断方向分布を示す。聖牛群域 $y=2.5\text{cm} \sim 15\text{cm}$ における聖牛背後の減速効果はほぼ同程度の減速を示すが、

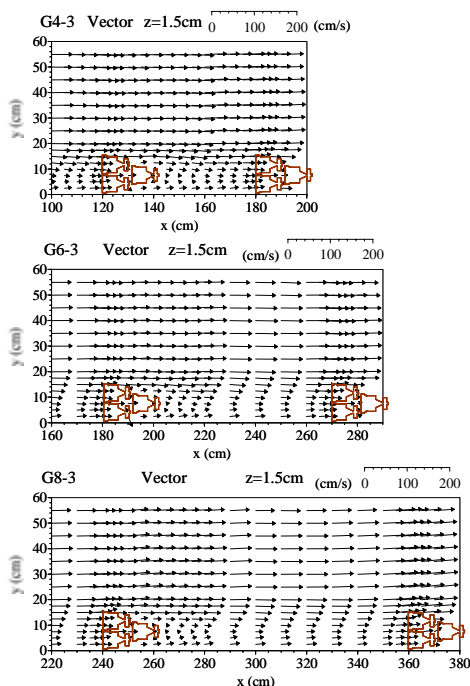


図 - 6 (U, V) 流速ベクトル図

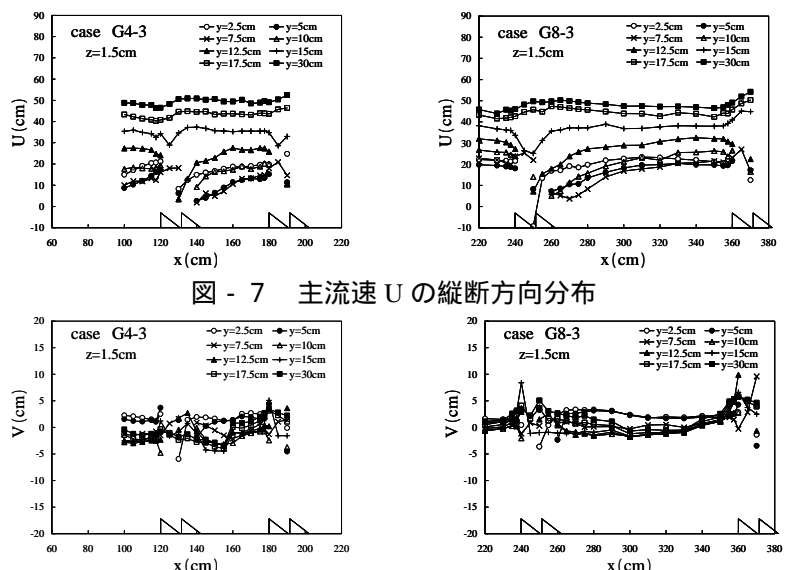


図 - 7 主流速 U の縦断方向分布

図 - 8 横断方向流速 V の縦断方向分布

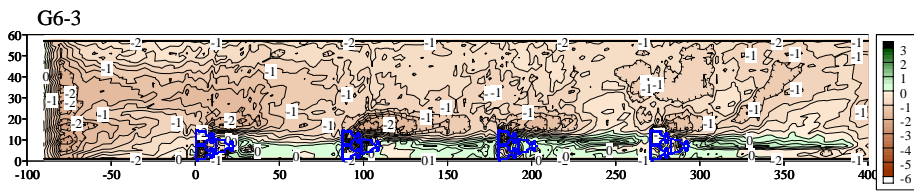


図 - 9 河床コンター

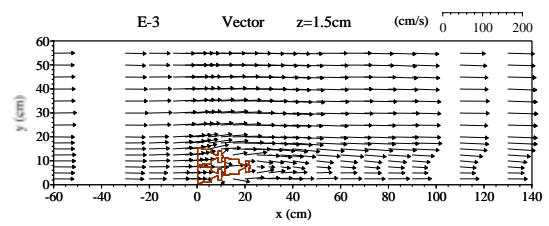
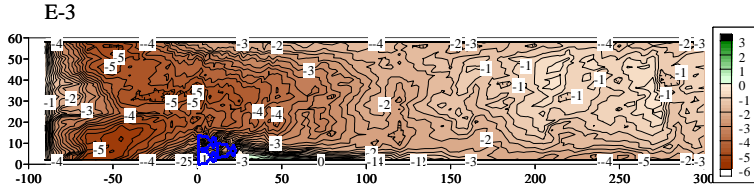


図 - 10 (U,V)流速ベクトル図

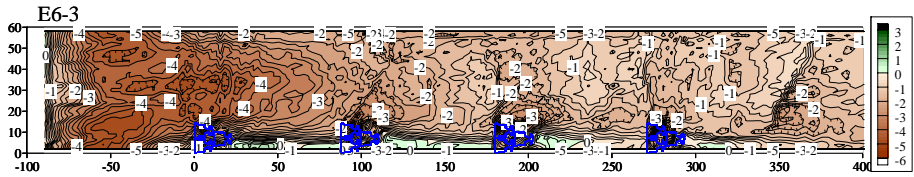


図 - 11 河床コンター

流下に伴う流速の回復が生じるため、ケース G8-3 で最も大きくなる。しかし、聖牛群間の $y=2.5\text{cm} \sim 10\text{cm}$ の流速は $U_{Cl.5}=35.45\text{cm/s}$ を超えていないため、聖牛群間の洗掘は発生しないと予想される。図 - 8 にケース G4-3, G8-3 の横断方向流速 V の縦断方向分布を示す。聖牛群頭部の値はケース G8-3 で最大値を示すことから、聖牛群間の長さ起因して水はね効果は強く現れる。

図 - 9 にケース G6-3 の河床コンターを示す。ケース G8-3 の河床計測は水路構造上の問題で行っていない。両方のケースで聖牛群間と聖牛群後方で堆積域および洗掘しない領域が現れている。堆積域は聖牛群直後と聖牛群間の主流域との境界に沿って堆積していた。これは聖牛群後方に回り込む流れが掃流砂を含み、境界付近で減速されて堆積したと考えられる。ケース G4-3 の洗掘形状はケース G6-3 と類似したが、ケース G6-3 の聖牛間隔においても十分に減速効果を発揮した。

ケース D6-3, D6-3c, D6-2 では第 1 円柱群直後に大きな堆積を示すが、流下するに従って円柱群直後の堆積は減少する傾向を示す。第 4 円柱群後方においては洗掘が進行しており、聖牛群とは異なる河床形態を示すことがわかった。

5. 水路勾配が及ぼす流れと河床変動

聖牛は河床勾配が $1/1000 \sim 1/300$ の中流～急流河川で施工され、聖牛に与える影響が異なる。ここでは水路勾配 $1/1000, 1/500, 1/300$ に変化させ、また流量も増大して異なる流れ場における聖牛の特性につい

て検討する。

ケース E-3, E6-3 では聖牛群後方の水深低下が激しく跳水を伴う射流状態であった。図 - 10 にケース E-3, E6-3 の $z=1.5\text{cm}$ における (U, V) 流速ベクトル図を示す。ケース E-3 の聖牛群後方では主流域から聖牛群後方に回り込む流れが強く、流速の回復が著しい。ケース E6-3 では主流の境界付近までかなり速い流れになっているが、聖牛群では減速効果が現れている。1.5cm の流速より側壁近くでは限界掃流力を下回っていると推定される。

図 - 11 にケース E-3, E6-3 の河床コンターを示す。ケース E-3 では聖牛群後方に洗掘が現れ、河岸侵食防止効果を果たしていないことがわかる。ケース E-6 では主流との境界まで洗掘が及んでいるが、側壁近くでは洗掘は発生していない。急流部における複数配置の効果が明らかにされた。

6. おわりに

聖牛群を 3 基配置する場合と 2 基配置する場合では聖牛後方の流れ構造が異なる。3 基配置では後流状態を示し、減速効果の持続性が高い。2 基配置では噴流状態を示し、減速効果の持続性が低いことがわかった。その結果、3 基配置の聖牛群後方は洗掘されない領域が継続して現れる。

聖牛群間隔が聖牛群長の 6 倍という値は勾配 $s=1/1000$ のケース、 $s=1/300$ のケースで減速効果を発揮したため適切な間隔である。 $s=1/1000$ のケースでは $X/l=8$ でも減速効果は十分だといえる。

急勾配の河川では聖牛群を複数配置することで聖牛群間の流速は減速され、河岸侵食を防止できる。

指導教官 富永 晃宏 教授