

富永 晃宏
Akihiro TOMINAGA

1. まえがき

河川構造物とは、河道内または河川に隣接する流水制御または河道保護のための構造物を意味する。河川堤防、護岸、根固、床止め、水制、堰、水門、桶門、桶管等があるが、ここでは広く解釈して河道内の植生や平面形状等も含めた境界条件を意味することとする。自然的または人工的な境界条件は、洪水を安全に流すために水衝部の保護や浸食防止機能を期待する治水機能からみた効果と、水質や地形変動および生態系に配慮した環境機能からみた効果の2面性を有している。河川においては安全性が最優先されるけれども、最近では環境機能を優先させた構造物の設置も見られる。このような多様な機能を期待した河川構造物の設置にあたっては、様々な境界条件が流れ構造および土砂輸送に及ぼす影響を明らかにしておくこと、さらには予測手法を確立することが必要とされる。ここでは、いろいろな境界条件がどのような流れ構造を生じさせ、結果として河川流および河道にどのような影響を与えるかを、これまでに行われてきた実験や現地観測結果をもとに解説する。

図-1は河川における各種境界条件の種類と考慮すべき流れ構造と評価すべき影響について示したものである。境界条件として、断面形状、粗度、平面形状および河川横断構造物に分類した。断面形状とは主に流下方向に断面が一様な河道における二次流の効果を意味し、粗度とは、河床または側岸の護岸ブロックや自然石、植生等の存在が考えられる。平面形状とは、河道の湾曲や蛇行、分流や合流等が含まれる。河川横断構造物としては、水制や床止め、堰等が考えられる。これらの境界条件のもとで考慮すべき流れ構造の指標として、流速分布、二次流、掃流力（壁面せん

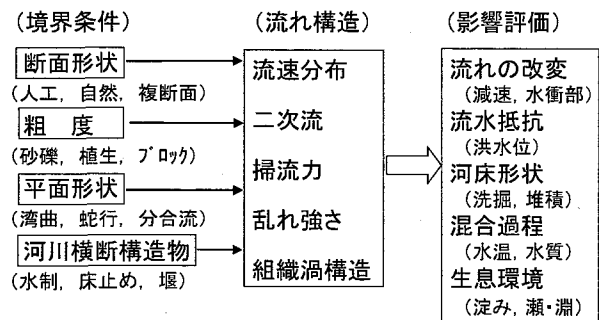


図-1 河川における境界条件とその影響

断応力)、乱れ統計量および組織渦構造をあげた。境界条件が与えられたことにより期待される影響として、流れの改変、流水抵抗の増加、洗掘や堆積などの河床形状の変形、水温、水質等の混合・拡散、淀みや瀬・淵などの多様な流れ場を与える生息環境の改善効果などが考えられる。これらの期待される影響は、流れ構造によってもたらされるものであるから、境界条件と流れ構造の関係を知ることが重要となる。

また、河川水理学的には様々なスケールの構造が存在する。最も大きなマクロスケールの構造としては、河道の縦断勾配や河相と呼ばれる河道の地理的性質があるが、ここでは対象としない。中間的なメソスケールとしては、河川の蛇行や砂州の形成などの平面形状に関わる構造が関係する。最も小さなミクロスケールとしては、断面内の流れ構造や局所的な渦構造などが上げられる。本論文では、著者がこれまでに行ってきた実験および数値計算を整理し、ミクロスケールの構造を中心に以下のような構造に着目して、流れ構造とその治水・環境機能との関連性について論説したものである。

- (1) 流れ方向に一様な開水路流れの内部構造—二次流と3次元流れ
- (2) 河川湾曲部の流れ構造—断面形状の効果

(3) 水制周辺の流れ構造

(4) わんど周辺の流れ構造

河川構造物の環境機能については生態系との関係などについては取り上げず、物理環境としての機能のみに限定して述べる。

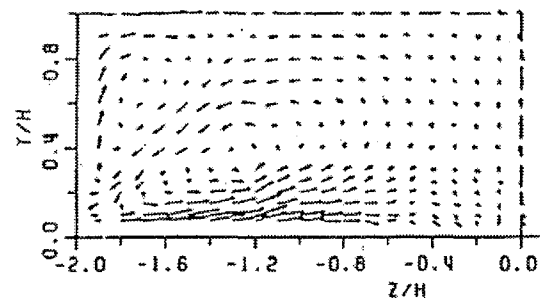
2. 流れ方向に一樣な開水路流れの二次流

直線開水路においては、断面形状と壁面粗度の配置が流速分布および物質輸送を支配する要素となる。そして形状と粗度の横断面内での非一樣性が二次流を発生させ、この二次流による運動量輸送が流れおよび物質輸送に大きく影響する。この種の二次流は、乱れの非等方、非一樣性に起因し、Prandtl の第2種二次流と呼ばれる。第1種の二次流は渦度の引き延ばしに起因するもので、せん断流れに遠心力が働く湾曲部の二次流に代表される流れである。ここでは、この第2種の二次流の性質について述べる。

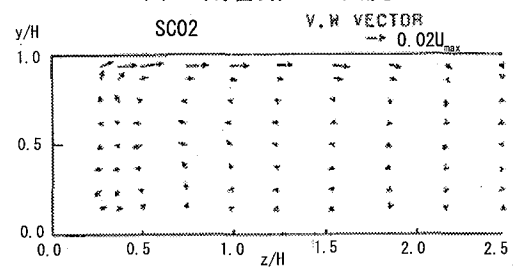
この二次流の発見は、開水路の流速分布において最大流速が水面より下に現れる、いわゆる velocity dip 現象を説明するために考えられたことに由来する^{1),2)}。また、長方形の開管路において等流速線が壁面に平行とならず、角に向かって突出する現象も二次流によるものと推測された³⁾。ところが、閉管路の二次流パターンでは開水路の velocity dip 現象が説明できず、開水路では自由水面の存在により乱れの非等方非一樣効果が変わることから、二次流パターンも変化することが示された⁴⁾。水平方向と鉛直方向のレイノルズ垂直応力の差、 $(\overline{v^2} - \overline{w^2})$ の分布にしたがって二次流の構造が変化することが流下方向の渦度方程式の解析から示された。図-2(a), (b) は、計測された長方形断面の閉管路と開水路の二次流の違いを示す。閉管路では $(\overline{v^2} - \overline{w^2})$ は隅角部の角の2等分線を軸として対称な分布を示すことから、コーナーへ向かう二次流が発生する。このコーナーへ向かう二次流を境に側壁側を側壁渦、底面側を底面渦と名付けることにすると、開水路では、コーナー対角線に対する対称性が崩れるため、側壁渦が自由水面に沿って水路中央側へ拡大し、底面渦が縮小することがわかる。この水面側の渦を水面渦と名付ける。側壁付近の低速流の水面渦による中央への輸送が図-2(c)に見られるような velocity

dip 現象をもたらしたものである。

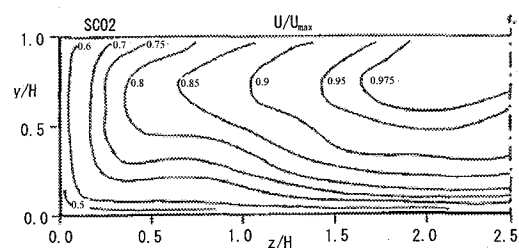
図-3 は断面形状の変化に伴う二次流構造の変化を模式的に示したものである。側壁を傾斜させるとやはり乱れの非等方非一樣効果が変わり、二次流構造が変化する。長方形断面における水面渦が消滅し、これとは逆回転の新たな二次流が水面と側壁で挟まれた空間に発生する。また、底面渦が発達する。これらにより velocity dip 現象は見られなくなり、コーナーへ向かう流れが卓越するようになる⁵⁾。次に、複断面になると、低水路・高水数境界の角から斜め上方に向かう斜昇流が発生し、これに伴う二次流構造が形成される。これらの二次流パターンは、ホットフィルムやレーザ・ドップラー流速計を用いた実験水路の計測から得られたものである。図-4 は非対称な複断面開水路において、レーザ・ドップラー流速計を用いて計測された二次流と主流速分布である⁶⁾。斜昇流とこれに伴う渦構造が明確に認められる。高水数と反対側の側壁付近では長方形断面の特徴的二次流構造も確認される。主流速分布はこれら二



(a) 閉管路の二次流



(b) 開水路の二次流



(c) 開水路の主流速コンター

図-2 閉管路と開水路の二次流の違い

次流の影響を受けて二次流の向かう方向に突出した等値線形状を示す。

以上はいずれも側壁の存在が二次流発生の原因となっていたが、底面粗度や掃流砂、浮遊砂等の不均一からも二次流が発生することが知られている。図-5は木下⁷⁾が木曽川の洪水時における水面の航空写真から推定した並列らせん流の模式図である。航空写真には流れに平行な縞模様ができおり、これは図のような並列した二次流に

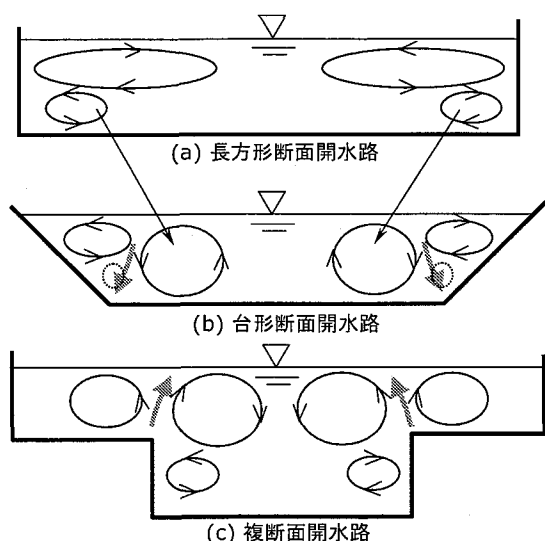


図-3 断面形状の変化に伴う二次流構造の変化

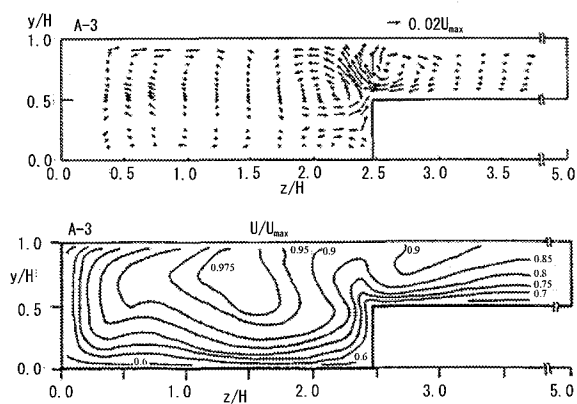


図-4 複断面開水路における二次流構造と主流速コンター

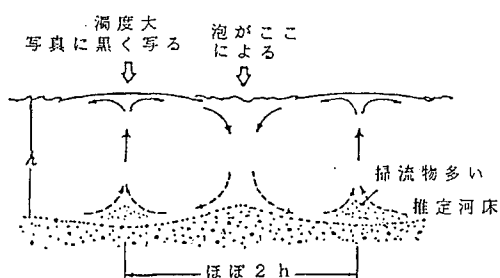


図-5 並列らせん流 (木下⁸⁾, 1967)

よるものと考えた。このような例は河床の縦筋の発生^{8),9)}や浮遊砂濃度分布の横断方向変化特性などからも推測されている¹⁰⁾。

第2種二次流の流速は、平均主流速の約2~4%程度と小さく、高精度の計測が必要とされる。しかし、二次流は継続的に運動量を輸送するため、主流速分布や底面せん断応力分布には大きく影響する。逆に主流速や底面せん断応力の分布形状から二次流のパターンをある程度推測することができる。アスペクト比が8の長方形開水路に二次流を強制的に与え、レイノルズ方程式を数値計算したシミュレーション結果を図-6に示す。二次流パターンは図に示すような並列らせん流型を与え、強度を平均流速との比で0.3%から2%まで変化させた。二次流は平均主流速のわずか2%でも大きく主流速分布を変化させ、底面せん断応力 τ_b では±20%の変動を生じさせる。したがって、二次流の変形に伴い底面せん断応力の最大値が大きく変化する可能性がある。特に台形断面ではコーナーへ向かう二次流が発達するためコーナー付近のせん断応力が増大することに注意しなければならない。一方、乱れについては、二次流が壁面から離れるところで乱れ強度は増大し、壁

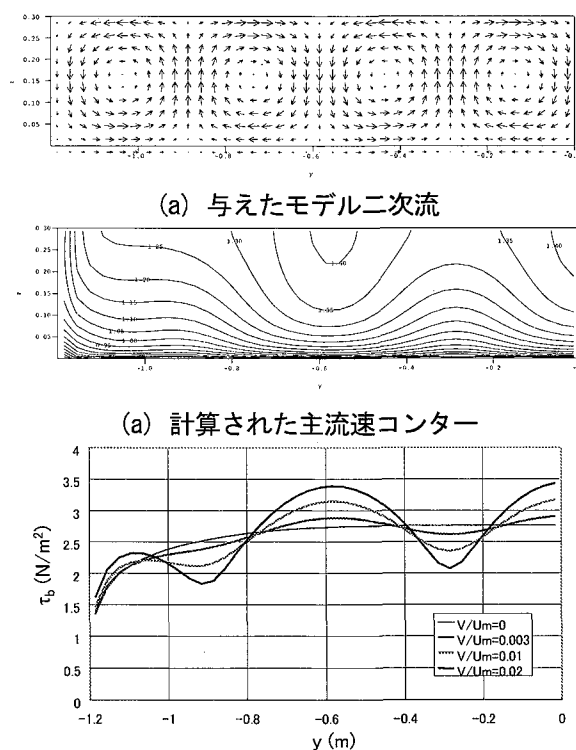


図-6 二次流とその効果

面に向かうところで乱れ強度は減少することが知られている。

さて、こうした二次流を人工的に作り出す構造物が考えられる。一つは流れに抗力を与えて主流方向成分を強制的に横断方向成分に変換する方法で、強い二次流を生成できるが、流れの抵抗も増大するのが問題となる。この例としては、湾曲流れの局所洗掘を軽減するためのベン工や¹¹⁾、側壁の斜め棧粗度などがある¹²⁾。また、底面の斜め棧粗度やV字型またはΛ型粗度なども考案されている¹³⁾。これに対し、流れに平行な棧粗度などの縦筋形状の底面への設置や横断方向に不均一な粗度の配置によって二次流を生成させることができる。この例として、粗面と滑面を水深間隔で横断方向に配置したときの二次流構造、主流速コンターおよび乱れ強度コンターを図-7に示す¹⁴⁾。粗面上で下降流、滑面上で上昇流を生じ、主流速は底面粗度よりもむしろ二次流に支配され、粗面上で増大、滑面上で減少する。乱れ強度は底面近くでは粗面上が大きく滑面上が小さいが、底面から離れるとやはり二次流による輸送が卓越し、粗面上が小さく滑面上が大きくなる。また、三角形断面の縦棧粗度を設置してコーナー二次流を制御した場合は、この縦棧粗度の二次流生成能力は高く、コーナー二次流を強めたり、消滅させたりすることができる¹⁵⁾。

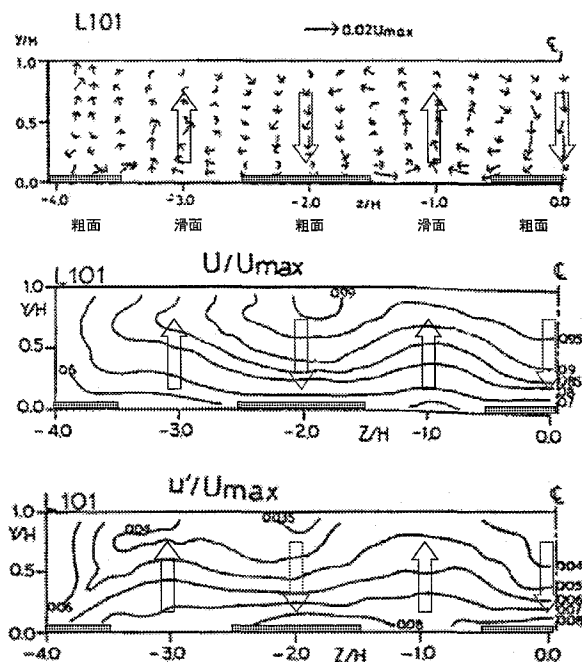


図-7 粗面と滑面を交互に配置した閉管路流れの二次流構造

3. 河川湾曲部の流れと断面形状

河道の湾曲部は堤防の洗掘、水位上昇、流水抵抗の面から治水上マイナスの働きをすると考えられるが、豊かな生態系を育む自然環境を提供し、また変化に富む河川の景観美を与えている。河道湾曲部は、治水上は各種の河川構造物による流れおよび河床変動の制御の対象となっているところである。湾曲部の流れは遠心力に起因する二次流の発生と、これによる湾曲部外岸側の洗掘および内岸側の堆積という河床変動によって特徴づけられる。中小河川のような比較幅水深比の小さな場合の湾曲部では、側壁や断面形状の影響を受けて二次流構造が変化しやすいものと考えられ、構造物による制御を考える上でも、二次流構造を良く理解することが必要である。

最も単純な長方形断面の湾曲部における二次流構造を図-8に示す¹⁶⁾。図-8(d)に示す(a), (b), (c)3断面における二次流をそれぞれ示している。図は下流から見た図となっており、右側が外岸側である。二次流は湾曲部入口から発達し始め $\phi=60^\circ$ の湾曲出口で最大となり、ここから減衰していく。二次流渦は通常の湾曲部の二次流に加えて外岸に直線開水路で見られた水面渦が存在し

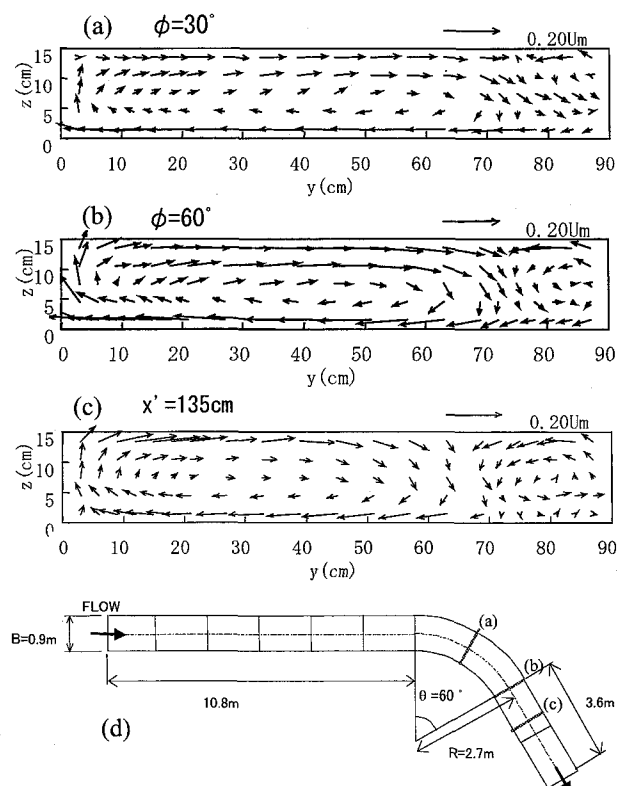


図-8 長方形断面開水路湾曲部の二次流の発達過程

ていることがわかる。前者を湾曲渦，後者を外岸渦と名付けることとすると，外岸渦は流下とともに発達し，水深規模の渦になり，湾曲渦は水路幅の約 70% 程度の規模に縮小する。湾曲上流 90cm の平均せん断応力で無次元化された底面せん断応力の平面コンターを図-9 に示す。湾曲開始点近くの内岸沿いおよび湾曲終了後の直線部の外岸付近に極大値が現れる。この外岸のピーク位置は明らかに二次流の下降流位置に対応している。この規格化された底面せん断応力の横断分布の流下方向変化過程を図-10 に示す。側壁近傍を除く中央領域ではほぼ直線的な分布を示し， $\phi=15^\circ$ で内岸が最も大きくなり， $\phi=60^\circ$ でほぼ水平になった後，下流にいくにしたがって外岸側が著しく増大し， $y/B=0.7\sim 0.8$ 付近がピークとなる。

台形断面開水路の湾曲部における側壁傾斜角の減少に伴う二次流構造の変化を図-11 に示す¹⁷⁾。 $\theta=60^\circ$ では基本的に長方形断面と同様の二次流構造を示している。すなわち，湾曲渦および外岸渦の一对の渦構造を示し， $y/B=0.7$ 付近で下降流が生じている。 $\theta=45^\circ$ では側壁の傾斜角の減少に伴い外岸渦が明確に形成されず，傾斜側岸上の狭い

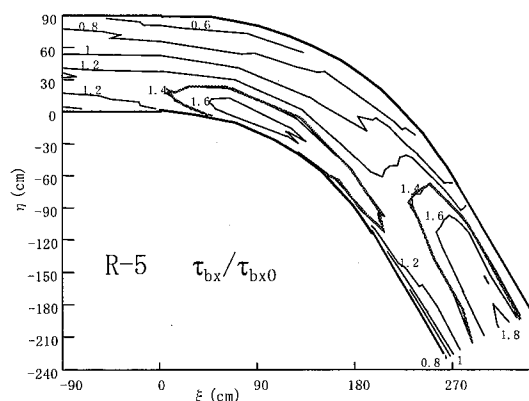


図-9 底面せん断応力コンター

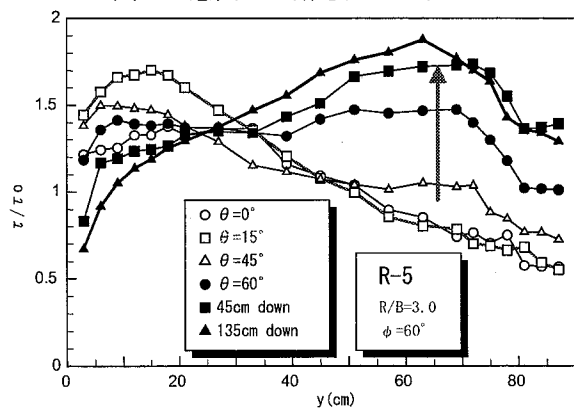


図-10 底面せん断応力横断分布

範囲に限られた小規模の弱い渦構造が残るだけである。その結果，外岸の側壁コーナー付近で下降する渦が単独で存在するようになる。 $\theta=30^\circ$ では外岸渦が全く見られなくなり，湾曲渦が全断面をカバーする単一渦構造となる。ただし，内岸コーナー付近を中心とする強い回転成分を持つセルの存在が認められる。このセルを包み込むような形で外岸にまで達する同回転の渦構造が存在し，縦渦の 2 重構造性を示す。

複断面開水路の高水敷幅の増大に伴う二次流構造の変化を図-12 に示す¹⁸⁾。複断面開水路湾曲

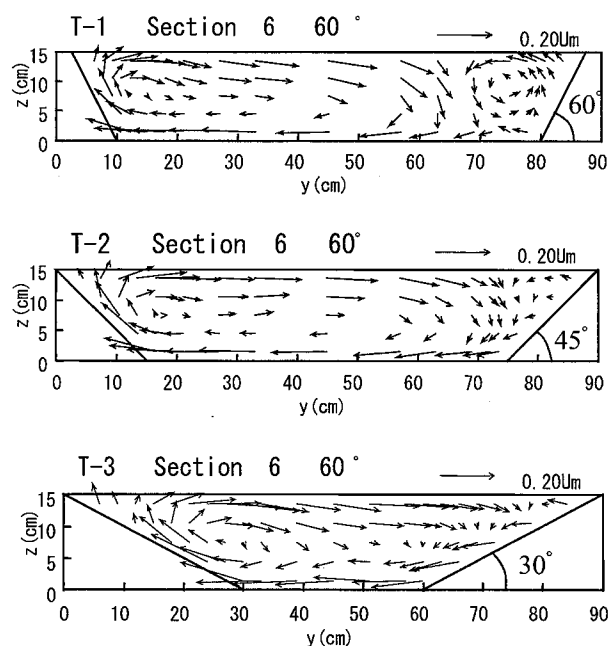


図-11 台形断面湾曲水路の二次流構造の変化

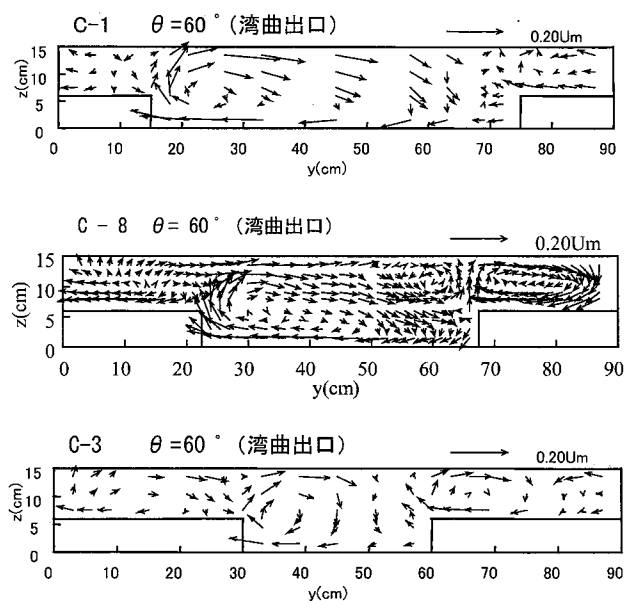


図-12 複断面湾曲水路の二次流構造

部では、遠心力に起因する二次流が低水路と高水敷に分断される。低水路内では、内岸側に偏った低水路幅の約 65～75%の幅を持つ湾曲渦が形成され、高水敷幅が大きくなるほど、高水敷上の湾曲渦が発達する。特に低水路の内岸側壁付近で強い上昇流が発生しているのに対し、外岸の斜昇流は弱くなる。高水敷幅が大きくなると、両高水敷と低水路にそれぞれ湾曲特有の渦が発生する。また、低水路内および外岸側高水敷上で、長方形断面で見られた外岸渦の存在も認められる。

4. 水制周辺の流れ構造

水制は河岸浸食防止、護岸の破損防止あるいは河川舟運のための航路維持、取水補助などを主目的に河岸に接続して横断方向に設置されるものである。水制は河岸近傍の流れの減速効果を与える「粗度効果」と水衝部を生じさせる流れの方向を変化させる「水はね効果」を有している。近年では、これらの治水・利水構造物としての機能とともに、水制周辺の多様な流れ場が生態系の保全・育成に大きな効果があることから、豊かな自然環境を提供する環境構造物としての機能も注目されるようになった。水制をマクロに見た場合、河道湾曲部などの水制配置による水衝部の制御や抵抗特性を明らかにすることが課題であるが、水制自体の安定性や淵の造成に関わる局所洗掘機構、水制間の水質交換や土砂堆積機構を予測したい場合は、水制周辺のミクロな流れ構造を詳細に把握することが不可欠である。

従来、経験に基づき河川の特성에合わせて様々なタイプの水制が用いられている²⁰⁾。水制は非常に多くの設計項目を要し、流れと河床変動に対する影響が複雑であるため、その最適な設計法を確立するのは未だに困難である。最適な設計法を確立するためには数値シミュレーションの活用が期待される。しかし、複雑な3次元構造の予測計算は未だに困難であるため、さらに実験や現地観測によるデータ収集が必要と考えられる。3次元乱流の数値計算においては、RANS型の乱流モデルによる時間平均の流れ構造の予測とともに、DNSやLESによる瞬間流れ場の計算方法の適用も考えられるため、組織的な渦構造に関する定性的な把握も意義がある。

水制の設計にあたっては、水路幅に対する水制長、水深に対する水制高、主流方向に対する設置角度、水制群の設置間隔、水制の形状、水制の材質（透過率）など多くの項目があり、これにフルード数やレイノルズ数といった流れの条件を加えると組み合わせは無限にあり、水制の研究がなかなか進展しない理由がここにある。そこで、各種設計項目の基本的特性を順次抽出して系統的に明らかにしていくアプローチが必要となる。

ここでは、著者らがこれまでに行ってきた数多くの実験の中から越流か非越流か、透過型か不透過型か、直角か斜めかという水制の形式としての違いが流れと河床変動に及ぼす効果について紹介する。また水制群による河床変動および湾曲部に設置した水制の効果についても述べ、数値計算手法についても言及する。これらの詳細な実験条件等については参考文献を参照されたい。これら多くの実験結果は、限られた条件範囲のものであり、実際の現場への直接の適用は困難かもしれないが、流れに影響する要素として普遍的な知見を与えており、これらの実験データをもとに数値予測手法を確立していくことで適用範囲が拡大され则认为る。

4.1 水制の透過性の効果

透過性を有する水制は、流れに対する抵抗が小さく、河床変動に与える影響が小さいと考えられる。形式としては最も透過度が大きいものとして杭出し水制があり、小さいものとしては捨石水制がある。その他ではスリット式水制というものも考案されている。このタイプの水制は、ハイドロバリア水制として紹介されており²⁰⁾、流れに直角方向に出された水制構造内部に透過流あるいは通水路部分を有し、この透過流部分は構造体の軸に対して角度を有するように設けられ、図-13(a)～(c)に示すようなタイプの水制の例が挙げられている。ハイドロバリア水制では、水制構造内の透過流部を通過する水流は河心方向へ曲げられ、河岸から遠ざかり、水制頭部の前方を通過する水流は、偏位現象により逆に河岸方向へ曲げられる。このベクトルの異なる二つの水流が、構造体の下流で再び合流して互いに激しくぶつかり合うことにより、エネルギー逸散を促進するというものである。ここでは、このハイドロバリア水制を含めたスリット型透過水制に関する実験結果を基に透過性の効果を検討する。

図-14 にスリット型水制の実験模型を示す²¹⁾。水制模型の形状は、長さ 20cm、幅 5cm の非越流不透過型水制を基本とし（ケース NS）、この基本構造に対してスリットを入れたものを透過水制モデルとした。透過流部は流下方向に対して平行なケース S（直進透過型）と、流下方向となす角 35° の斜めのケース H（斜め透過型）で、水制全長に対するスリット幅の比を 1/2（S2, H1）と 1/4（S2, H2）の 2 種類設定した。

図-15 に代表的ケースの水深平均された平面流速ベクトルと流線を示す。不透過型のケース NS では、主流が水制先端部から主流域側に大きく水はねされて膨らみ、下流で再び水制域側へ戻る流れを伴う湾曲した流れ構造を示す。その結果、水制背後に水制長さよりも大きな幅を持つ剥離渦を形成する。直進透過型で透過面積比を 1/4 としたケース S2 では、水制中央より先端側で水制を透過する流れが存在するが、水制内を通過した流れは主流域側へ曲げられ、小さな剥離渦が形成されている。次に、斜め透過型で透過面積比 1/4 のケース H2 では、水制先端部の水はね角度が不透過型より小さくなり、下流での水制域側への戻り流れも小さくなる。透過流の影響によって剥離渦の主流域側への膨らみがなくなり、逆流の強度も減少しているが、剥離渦は流下方向に長く存在している。

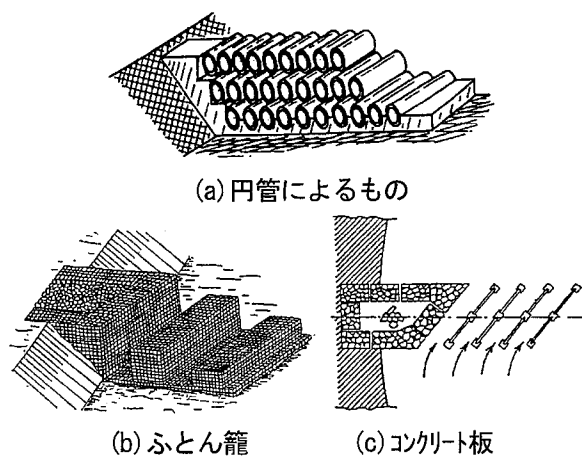


図-13 ハイドロバリア水制の例
(イヴァン・ニキティン²⁰⁾より抜粋)

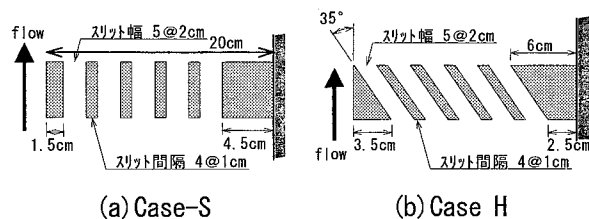


図-14 スリット型水制模型

表-1 に水制周辺流れの特性量を示す。 β は流速分布から計算される水制内部の透過流量率、 Δh は水制前後の水位差（水制前面 10cm と水制背面 10cm の平均水深の差）、 α は水制先端の水はね角度、 L は再付着点距離、 $U_{\max}$ は最大流速、 U_b は水制域側壁近傍の逆流速度の最大値、 ΔU_d は計測範囲最下流（300cm）の主流速の横断方向偏差である。実際の透過流量率は透過面積比 1/2 で約 20% と、流水断面積に対する水制内透過部の面積比 1/5 に相当する流量が通過している。斜め透過型は若干これより少ない。透過面積比 1/4 では流水断面積比 1/9 よりも小さな値となり、これも斜め透過型の方が小さい。水

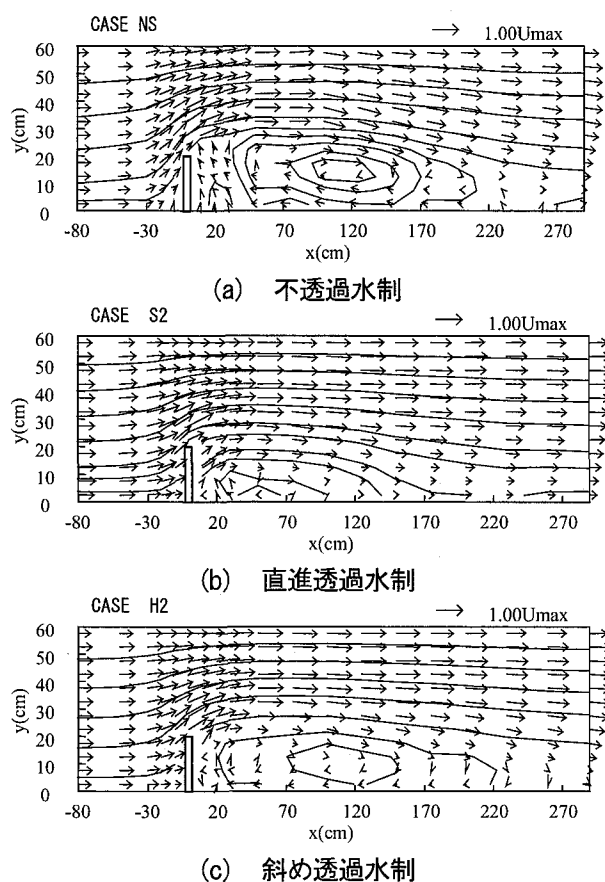


図-15 水深平均流速ベクトルと流線

表-1 水制周辺流れの特性量

	β (%)	Δh (mm)	α (°)	L (cm)	$U_{\max}$ (cm/s)	U_b (cm/s)	ΔU_d (cm/s)
NS	0	8.4	33.6	255	35.7	-12.8	23.8
S1	20.6	1.6	9.7	10	22.4	-0.6	7.6
S2	8.8	3.9	14.1	70	28.1	-2.8	14.5
H1	18.6	4.1	19.3	220	29.4	-4.3	20.7
H2	7.5	4.8	20.0	265	31.9	-6.2	23.9

制前後の水位差は透過型でかなり減少し、抵抗が減少することを示している。再付着点距離は不透過型で $L=250\text{cm}$ と水制長さの 12.5 倍に達する。直進透過型では当然小さくなるが、斜め透過型では不透過型とさほど変わらない。ただし、逆流の最大値 U_b をみると、斜め透過型では不透過型の 1/2 に減少している。全体として主流速の横断方向偏差はかなり減少している。直進透過型の透過面積比 1/4 のケースでは U_b は約 1/5 に減少する。最後に横断方向偏差 ΔU_d は不透過型と斜め透過型の H2 が最も大きい。全般に斜め透過型は不透過型に比べて水制直後の流速変化は小さいが、再付着点より下流の位置における流速差はほぼ同程度となり、流速差の回復が遅い。

図-16 に不透過型と斜め透過型の 2 時間通水後の河床高鳥瞰図を示す。不透過型では水制頭部において 60mm 以上の洗掘が起きており、水制頭部後方から対岸にかけて洗掘と峰が交互にできている。斜め透過型では最大洗掘深は 8mm でかなり洗掘が小さくなり、堆積域は不透過型より主流域側に寄っている。透過面積比の大きい斜め透過型や直進透過型では洗掘は小さかった。このように、水制内部に透過流を与えると水制頭部の洗掘を大幅に軽減できることがわかる。また、図-17 に示す不透過型の河床変動後の流速ベクトルから、水制先端の洗掘と背後の堆積によって逆流域が大幅に縮小して、流速はすぐに水制側側岸に回り込み、横断方向流速差が減少する。これに対し、斜め透過型では河床変動が小さいため、流速場はほとんど変化せず、移動床においても固定床とほぼ同程度の剥離渦を維持している。

以上のようにここでは透過性をスリットという形で直接的に表現し透過率の影響を調べた。スリットに角度を付けたハイドロバリア水制についても検討した。一般的に透過率が大きくなると、抵抗が減少して水はね角度は小さくなり、水制背後の横断流速差も減少する。しかし、水制背後の乱れが小さいため横断混合が弱く流速差が長く維持される。不透過型では、大きな横断流速差が得られるが、水制後方の圧力が大きく低下して、側岸に比較的大きな逆流が発生する。斜め透過型にすると、不透過型と直進透過型のちょうど中間的な流れ構造を示し、圧力差はかなり小さく抑えられはく離渦も弱い逆流となる。しかし、水制背後の乱れが小さく比較的長い距離において減速効果が維持される。そして最も大きな差異は移動

床において現れる。不透過型は水制先端の急加速により大きな洗掘が発生し、ここで排除された砂が水制背後に高く堆積する。この河床形態においては、流れは水制背後の堆積を乗り越えるように側岸に向かい、側岸付近の減速域は大幅に縮小してしまう。透過型ではそもそも河床変動が小さく押さえられるため、流れ構造の変化も小さく適当な減速効果が維持されたままである。このような透過性のそれぞれの特徴を生かせば、治水目的や生態系配慮の目的に対して適切な水制の配置を考えることができるであろう。

4.2 聖牛の河床低下防止効果²²⁾

伝統的河川工法である聖牛は、釜無川、笛吹川で施工例がみられ、その後、大井川、富士川、安倍川など技術が伝わった²³⁾。高度経済成長時代に消えた工法であったが、近年に大井川、富士川、木曽川、揖斐川などで復活し、現在も施工されている^{24),25)}。聖牛は透過型水制の一種であるが、施工が容易で河岸、河床の侵食防止機能を有し、自然素材を利用す

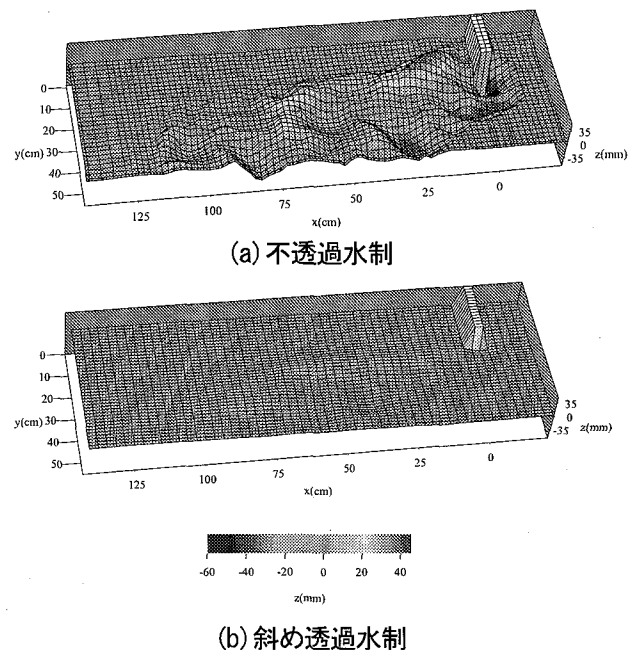


図-16 透過・不透過水制周辺の河床変動の比較

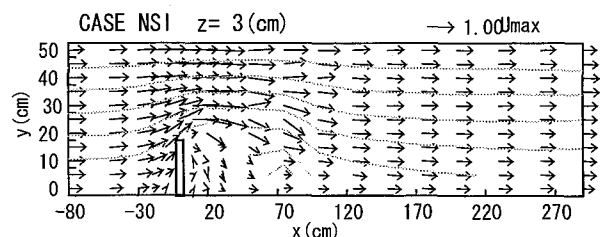
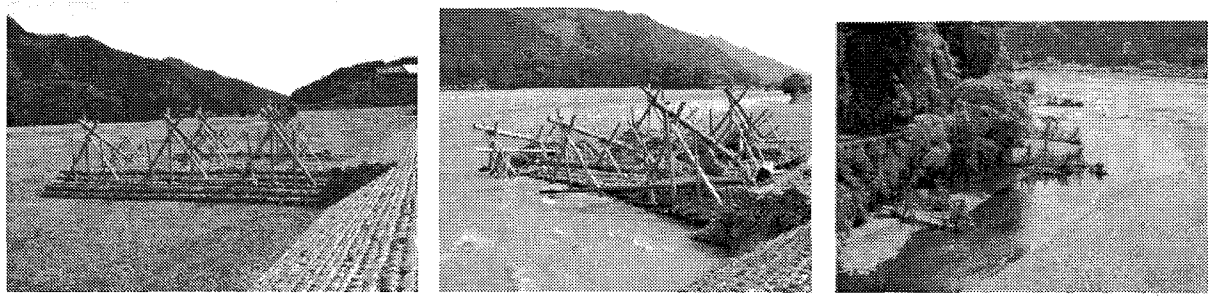


図-17 不透過水制の河床変動後の流速ベクトル



(a) 長尾地区施工後の聖牛(2002年5月) (b) 長尾地区出水後の聖牛(2003年8月) (c) 田野口地区の聖牛群(2002年5月)
写真-1 大井川の聖牛の設置状況と河床変動のようす

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利点を有することから、近年施工例が増えてきている。聖牛は流れに対する安定性と施工の容易さを兼ね備えた構造物として誕生したものと考えられる。透過型水制に分類される杭出し水制と比較して水理的にも特徴的な形態を有する。まず、枠構造の密度が底面近くほど密で、水面に近づくほど疎になる点である。次に、底面近くが蛇籠で押さえられている点である。また、聖牛は固定されていないため、河床洗掘に応じて変形する点や聖牛個々の組み合わせ方による形態の違いも杭出し水制とは異なる特徴である。ここでは、大井川に設置されている聖牛の実態と実際の河床変動制御効果についての現地調査について述べ、次に、聖牛の水理的な効果について模型実験によって検討した結果について解説する。

大井川の34kmから53km付近で2002年5月と2003年8月の2回調査を行った²²⁾。代表的な聖牛の例を写真-1に示す。いずれの場所においても、前列3基、後列2基を1群としたものが多い。複数設置されている場合は、聖牛群の間隔は横断方向長さの約6倍であった。長尾地区の聖牛は2002年3月に施工され、2002年5月の時点では出水を1度も受けておらず、2003年8月までには何回か大きな出水を経験している。したがって、出水による河床変動への影響を見ることができる。2002年5月における聖牛は写真-1(a)に示のように、水平に設置されており、また聖牛周辺の河床も平らに均されていた。2003年8月においては同じ場所の聖牛が写真-1(b)に示すように、流心側の聖牛が大きく沈み込み全体が大きく傾いていることがわかる。このように聖牛の河川中心側は大きく洗掘されるが、蛇籠が河床形状に応じて柔軟に変化し河岸側の聖牛は洗掘されず残っている。聖牛と護岸の間も若干洗掘されて、聖牛後方の

河床変動は中州のような形で広範囲に渡って堆積していた。ただし、堆積というよりは河床変動が全く起こっていないという表現のほうが正しいと思われる。写真-1(c)は田野口地区の聖牛群である。湾曲の内岸に設置されており、聖牛は流心側に傾いているものの、河岸付近では堆積が促されて河岸保護機能を十分に発揮しているように見える。実験ではこのような河床が低下する条件下での聖牛の河床変動防止効果に着目して行った。

実験に用いた聖牛モデルは大井川・長尾地区の聖牛の約1/80縮尺の大聖牛で2mmと3mmの木製丸棒を構造とし、蛇籠の代わりに同径の鉄丸棒を使用した。聖牛模型の概略図を図-18に示す。1群あたりの聖牛数は前列2基後列1基の計3基とし、大井川に施工されていた6倍間隔で、聖牛群を流下方向に4群配置した。移動床実験では平均粒径0.08cmの砂を用い、上流からの給砂は行わず、河床洗掘が進行する状態での聖牛の河床保護効果に着目した。

図-19に勾配1/000で3基配置のケースの $z=1.5\text{cm}$ の流速ベクトルを示す。聖牛群頭部で対岸に向かう水はねが発生し、聖牛群背後においては聖牛群中心軸の流速が最も減速され、横断方向に窪んだ後流状の

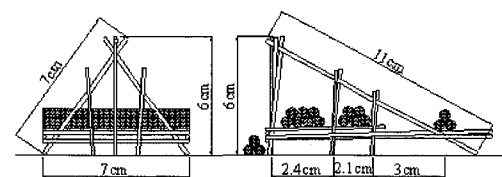


図-18 聖牛模型概略図

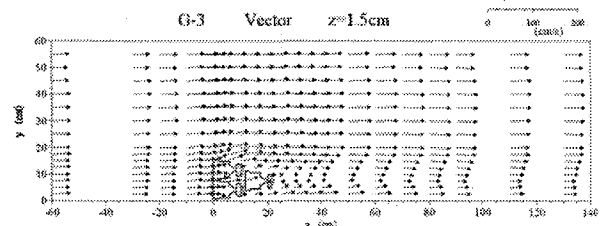


図-19 流速ベクトル(単独設置)

流速分布を示している。底面近傍の流れの中心軸への収束が中心軸上での上昇流を誘起し、水面近傍でも中央軸上の減速が見られる。聖牛特有の三角形形状から後方に二次流を発生させていることが特徴といえる。

図-20に勾配 1/1000 と 1/300 のケースの河床高コンターを示す。本実験では上流からの給砂を行っていないため、移動床開始地点で局所洗掘が発生し、全体に河床低下状態にある。第1聖牛群は主流側がかなり洗掘され、聖牛自体が主流側に沈み込むように傾く。第2聖牛群以降では、聖牛群の主流側頭部が2cmほどの洗掘を受けている。大井川における聖牛においてもこれと同様の形態が多く見られており、実現象をよく再現したものと考えられる。また、聖牛群直後と聖牛群間の主流域との境界に沿う堆積が認められる。最後尾の聖牛以降も河床低下が防止されている。

勾配 1/300 のケースでは全体の河床低下が著しくなり、洗掘がかなり聖牛群領域内に侵入している。第1から第3聖牛群までの側壁近傍は洗掘されていないが、第3、第4聖牛群間では聖牛群直下流部のみ洗掘されないだけで、下流へいくと洗掘が発生している。全体として急流部についても複数配置によって河床洗掘防止効果が働いていると言える。

聖牛の形態的特徴を明らかにするために直径 5mm の木製丸棒を使用した円柱粗度の実験と比較した。図-21は、聖牛群3基が占める長方形区域に 2.5cm 間隔の格子状に配置したケースと、5cm 間隔の千鳥状に半分の密度で配置したケースの河床高コンターを示す。第1円柱群内の侵食が大きく、第1群目後方では大きな堆積が見られる点が特徴である。第2群目においても円柱群領域内で洗掘が発生し、直後で堆積しているが、密生度が大きい場合には堆積が第3群目の円柱群内にまで達しているのに対し、密生度が低い場合には第2,3群間および第3円柱群内で洗掘が見られる。第3,4群間および第4円柱群内ではどちらのケースとも洗掘状態となり、特に第

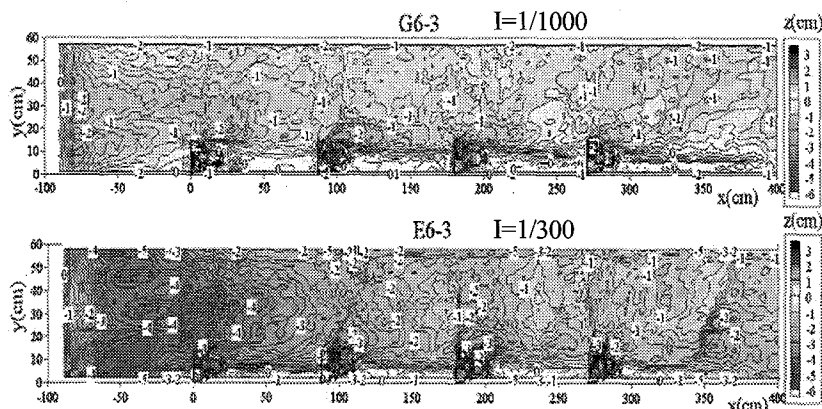


図-20 河床高コンター（4群連続配置）

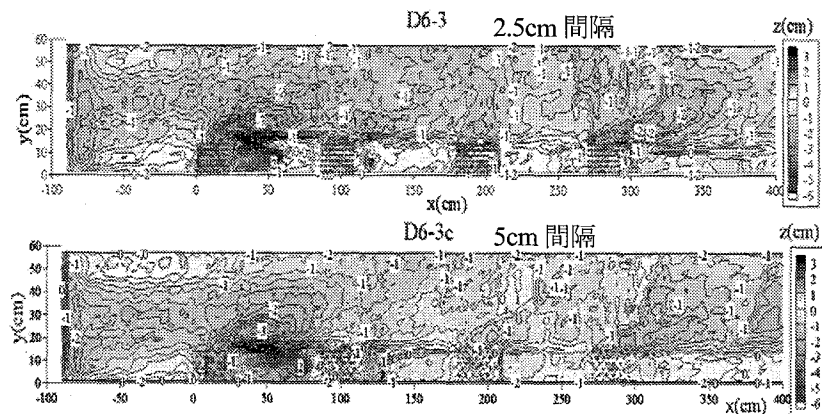


図-21 河床高コンター（円柱粗度群連続配置）

4群から下流の主流側で再び洗掘が大きくなっている。

したがって聖牛群は杭水制とは異なる河床形態を示し、下流側での洗掘防止効果が高いといえる。これは、円柱群ではその密度によっては、底面近くが高速になり掃流力が増大しやすいが、聖牛では底部に浸透性の低い蛇籠を有するために、背後の掃流力が抑制されることが洗掘防止に効いているものと思われる。

4.3 越流型水制と設置角度の効果

越流型水制では、水制域内流体と主流域の流れおよび水制上部の流れとの交換の両方が存在し、両者の相互作用により複雑な3次元流れ構造を示す。ここでは、3次元性の強い越流型水制近傍の流れ構造をPIV法で解明した結果について述べる。特に水制高さと水深との比である相対水制高と水制間隔、水制設置角度をパラメータとして取り上げた。また、越流型水制群を用いた河床変動制御効果についても示す。

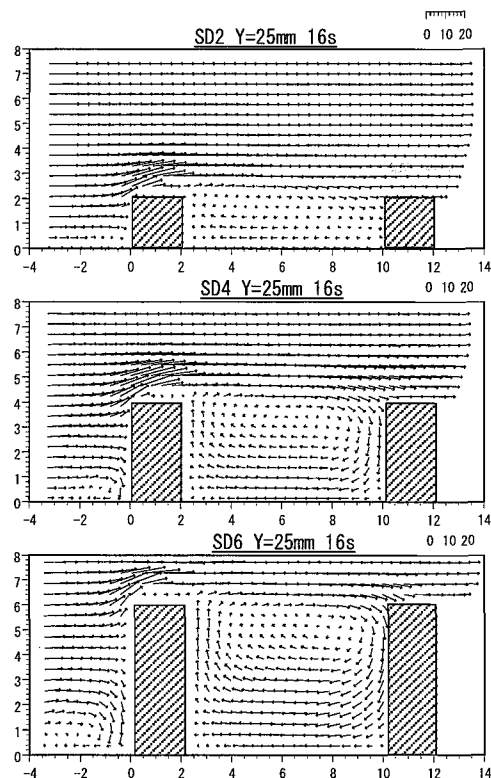
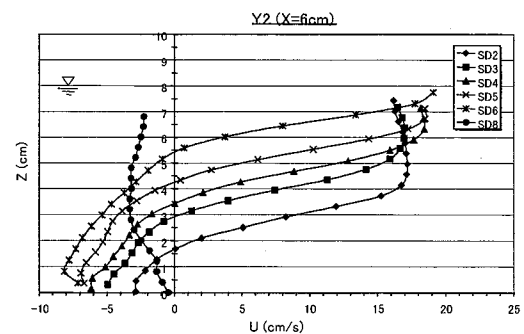


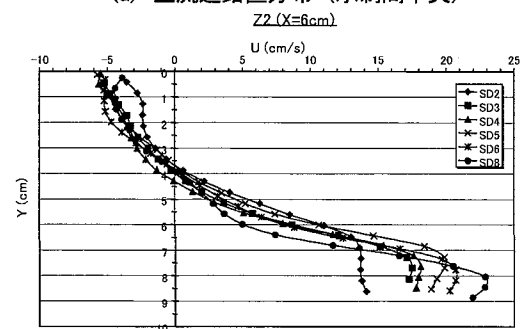
図-22 縦断面流速ベクトル（水制間中央）

(1) 相対水制高の影響²⁶⁾

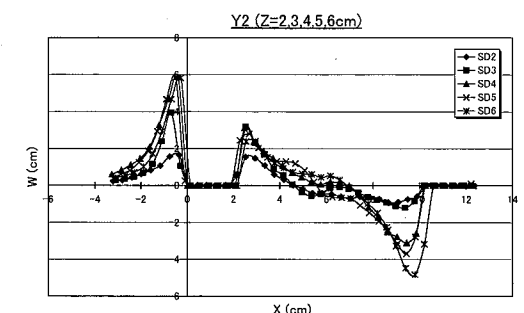
水制高・水深比が0.25, 0.5, 0.75の3ケースの水制長の中央部縦断面における全時間平均の流速ベクトルを図-22に示す。水路幅は30cm, 水制長さ5cm, 水制厚さ2cm, 水深は8cmであり, ケース名SDの後の数字が水制高さ (cm) を示す。水制高さすべてのケースにおいて, 水制域内全体に水制頂部から各水制高の約10~15%下に中心を持つ大規模な横断方向軸を持つ渦（横断渦と呼ぶ）が見られる。水制高が高くなるにつれて底面側の逆流域の幅と流速が大きくなる。水制間中央部における主流速の水制長さ中央部における鉛直分布および水制高中央部における横断分布を図-23(a), (b)に示す。水制域内での鉛直分布形状は水制高によらずほぼ相似形を示し, ゼロクロス位置が水制高とともに上昇し, 分布形が上方にシフトしていき, これに伴って逆流域の流速が増大する。これより水制域内の逆流の流速変化は, 水制高の変化に比例しているが, 水制域上部の流速にはあまり大きな変化は見られない。水平断面では, 水制域内において縦断面のような明確な変化は認められず, 各ケースともに同じような流速分布を示す。主流速域では水制高に比例して流速が



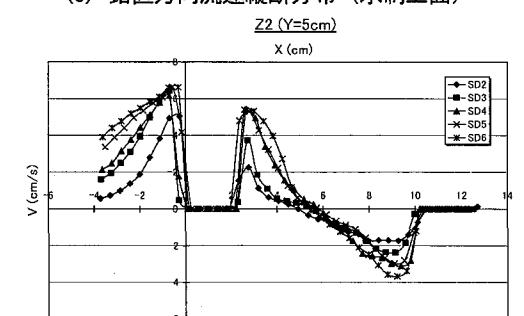
(a) 主流速鉛直分布（水制間中央）



(b) 主流速横断分布（水制間中央）



(c) 鉛直方向流速縦断分布（水制上面）



(d) 横断方向流速縦断分布（水制側面）

図-23 流速分布に及ぼす相対水制高の影響

大きくなる。これは水制高の増大により遮蔽面積が増大したことによると考えられる。

水制上部の境界面における鉛直方向流速分布を図-23(c)に, 水制の側部境界面における横断方向流速分布を図-23(d)に示す。これらは第1水制による水はねの大きさと水制域への水の流出入量を表している。鉛直流速の第1水制上流側をみ

ると、水制高 4cm までは水制高に比例して上向流れが大きくなっているが、これ以上の水制高さでは変化が小さい。水制域内に着目すると、流出・流入ともに水制高に比例して流速は大きくなる傾向が認められる。第 2 水制前面における流入においては相対水制高が 3/8 (SD3) から 1/2 (SD4) にかけて大きく増大している。横断方向流速を第 1 水制上流側についてみると、水制高が高くなるにつれて第 1 水制前面のかなり上流の方まで水制の影響を受けることがわかる。しかし、水はね最大流速は、水制高にかかわらずほぼ一定の値を示す。水制域内に関しては、流出・流入ともに水制高に比例して流速は大きくなっているが、鉛直方向流速とは逆に、第 1 水制後方の流出において、相対水制高が 3/8 (SD3) から 1/2 (SD4) にかけて著しく増大している。以上より、水制域境界を通しての水の流出、流入総量は水制高の増大につれて大きくなるといえる。

(2) 水制設置角度の影響²⁷⁾

直角、上向および下向き水制の水平および鉛直縦断面における流速ベクトルを図-24 に示す。3つの設置角度の違いには流れ構造に劇的な変化をもたらしていることがわかる。その差異は特に水制域の周辺部において顕著に現れる。底面近傍の水平面では、直角水制では鉛直渦が認められるのに対し、上向きでは流入が卓越し、下向きでは後方へ向かう流出が卓越している。水制高さ付近において、直角水制では第 1 水制後方からの流出が強く、上向きでは水制先端では直進流が卓越して根元からの流出は側壁側に限られている。下向きでは明確な構造が見られず、第 2 水制前面で外向き流れと内向き流れがぶつかり合っている。次に鉛直縦断面をみると、水制根元側で第 1 水制を超える上向流れが顕著に現れている。水制域内では直角と上向きが後方へ向かう上昇流が支配的であるのに対して、下向きでは第 2 水制前面から下向きに入り込む流れが顕著である。水制先端付近では逆

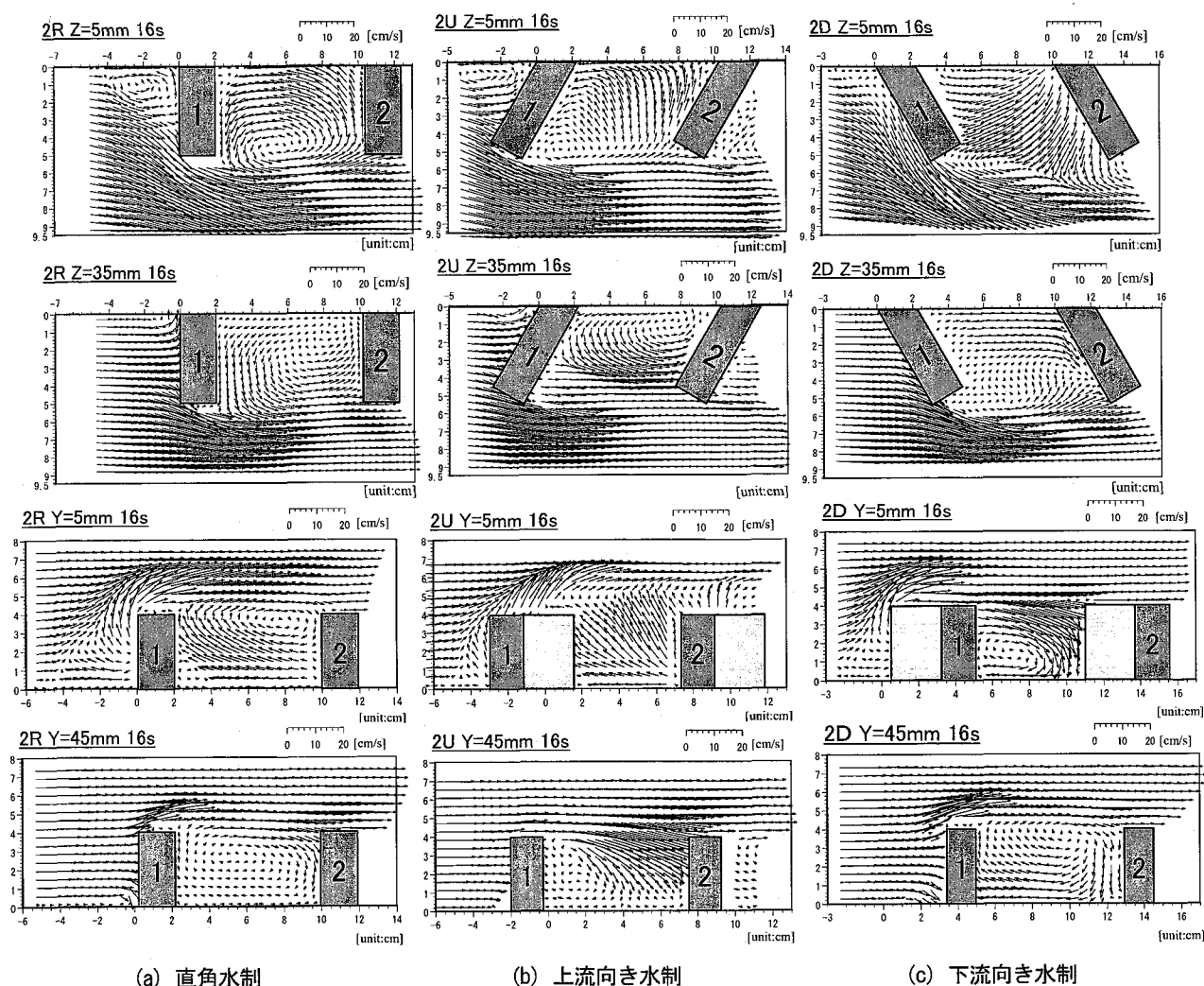


図-24 水平断面・鉛直縦断面流速ベクトル（設置角度の影響）

に上向き水制が第2水制前面に向かって入り込む流れが卓越し、下向きでは底面側の後方流れが支配的である。この特徴は、水制間隔が大きくなっても基本的に維持される²⁸⁾。また、連続して複数設置した場合、第2、3水制間までは同様の特徴が維持されるが、平衡領域である第7、8水制間では特徴が失われる²⁹⁾。

以上より直角水制では、横断渦と鉛直渦の特性を併せ持つ渦構造となる。上向き水制では水制を越流する流れが外側に向けられ、第2水制先端で下降する流れが底面に沿って側壁へ向かいと第1水制後方で上昇する流れが卓越した渦構造となる。下向き水制では、水制を越流する流れが内側に向けられ、第2水制根元で下降する流れと底面で後方外向きに向かう流れが強く現れる。

(3) 越流型水制群を用いた河床変動創出³⁰⁾

上述の越流型水制の設置角度の劇的な効果を利用して、単調化した河道に瀬と淵を有する変化に富む河床形態を創出する可能性について述べる。越流型水制群を直線河道の両岸に規則的に配置した場合の流れ構造と河床変動について実験的に検討するとともに、このような複雑な流れを予測するための簡易な3次元数値シミュレーション手法について示す。

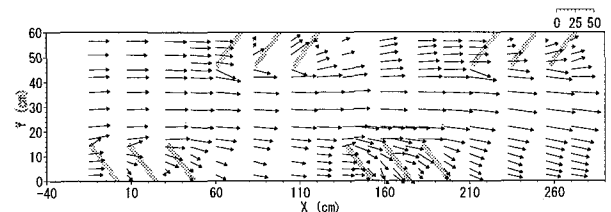
直線河道に多様性を創出する手段として、越流型水制3基を1群とし、水制長は水路幅の約4分の1、水制間隔を水制長の1.5倍として、これを両岸に交互に75cm間隔で4群配置した。水制を用いて周期的な蛇行形状を造るにあたっては、水制3基を1組としてある程度広範囲に安定した変化を与えることが有効と考えた。

越流型水制周辺の流れは3次元性の強い流れになり、障害物周りの局所的な流れが支配的となる。この場合、実用的見地から、比較的 low 次流モデルを用いて基本的な流れ構造を予測する可能性を検討することは意味がある。そこで、乱流モデルとして最も簡易な0方程式モデルを用いた3次元の流れ計算を試みている。固定床における水制周辺の流れ構造を計測し、3次元流れ計算と比較することにより、水制設置角度の影響を考察する。

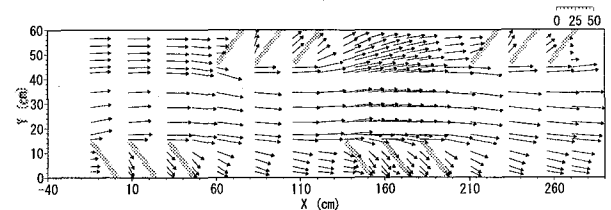
図-25 は上向き水制の底面近傍と水面近傍の水平面における流速ベクトルを比較したものである。底面近傍では、水制群前面の減速が大きく、また、水制間で水制に沿って側壁へと向かう流れが顕著に現れる。これに伴い水制群の後方のはく離循環流領域

はほとんど無くなり、水制群間でも側壁へ向かう流れが大きくなっている。水面近傍では、水制上で水路中央へと曲がる流れが顕著に認められる。この屈曲した流れは計算でも良く再現されている。水制群を超える過程で主流方向流速が減速されるのに対し、横断方向流速はあまり変化しないため、流速ベクトルの主流に対する角度は、第1水制から第3水制へと下流へ行くにつれて大きくなる。このような側壁から水路中央へ向いた流速ベクトルは、水制群間でも維持されている。また、全体に両岸ともに側壁付近の減速が大きく水路中央が速い流速分布を示している。

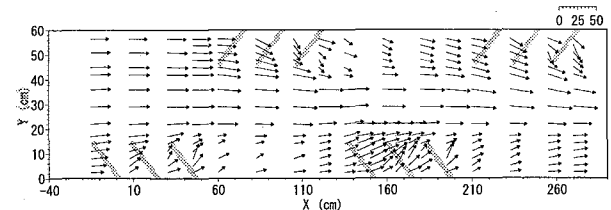
図-26 に下向き水制の底面近傍と水面近傍の水平面における流速ベクトルを示す。底面近傍では、水制先端で大きく減速されるのに対し、水制根本付近ではそれほど減速されない。流れは水制背後で水路中央側へ曲げられる。結果として高速域が水路中央と両側岸に現れる。水面近傍では、水制群を通りすぎるときに側壁側へ大きく曲げられる。しかし、水



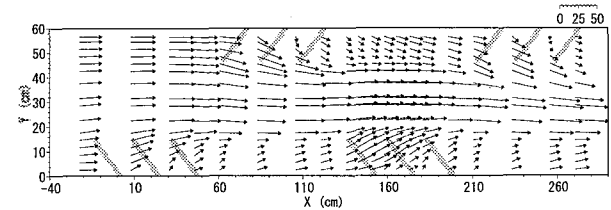
(a) 実験値 (底面近傍 $z=1.5\text{cm}$)



(b) 計算値 (底面近傍 $z=1.5\text{cm}$)



(c) 実験値 (水面近傍 $z=6.5\text{cm}$)



(d) 計算値 (水面近傍 $z=6.5\text{cm}$)

図-25 上向き水制群の流速ベクトル

制群上の流速は、上向き水制群とは対照的に加速されている。側壁へ向かう流れは水制群間においても維持されている。全体として主流は側壁側へ配分され、流速分布は横断方向に一様化する。いずれも計算は実験値をよく再現している。

図-27 に 4 群配置の各ケースの河床高コンターを示す。直角水制では、第 1 水制の先端を中心とする円状に最大洗掘が発生し、ここから水制前面の洗掘が続いている。第 2, 第 3 水制では先端の洗掘は小さくなり、前面の洗掘はほとんど見られず、むしろ水制間中央付近は少し堆積傾向である。上向き水制では、第 1 水制先端を中心として円状の洗掘が発生している。上向きでは第 3 水制の根元に著しい堆積が見られるのが特徴である。下向き水制では、第 1 水制前面ではほとんど洗掘が見られず、先端付近にわずかな洗掘が見られるだけである。第 2, 第 3 水制前面では水制根元付近が最大となる大きな洗掘が発生している。また、第 3 水制背後の側壁付近にも洗掘が見られる。第 2, 第 3 水制先端ではむしろ堆積が発生している。以上の洗掘堆積形状は、可視化 PIV 法で計測された越流型水制間の流れ構造から予想される河床形状と非常に良く符合している。すなわち、越流型水制では水制を乗り越える流れが水制と鉛直をなす方向に向きを変えられることによるものである。上向きでは底面近くで水路中央から側

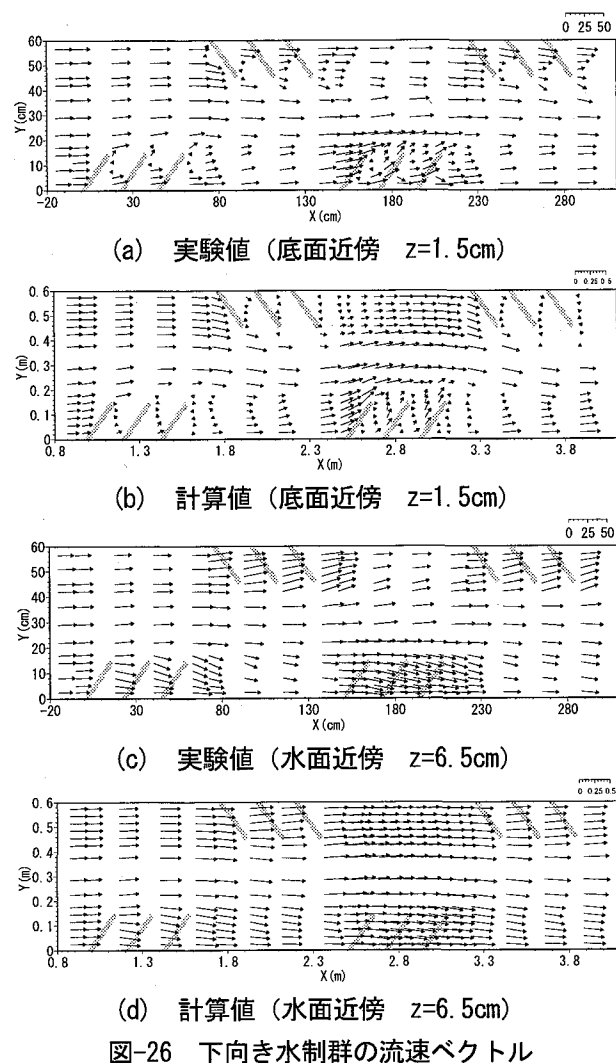
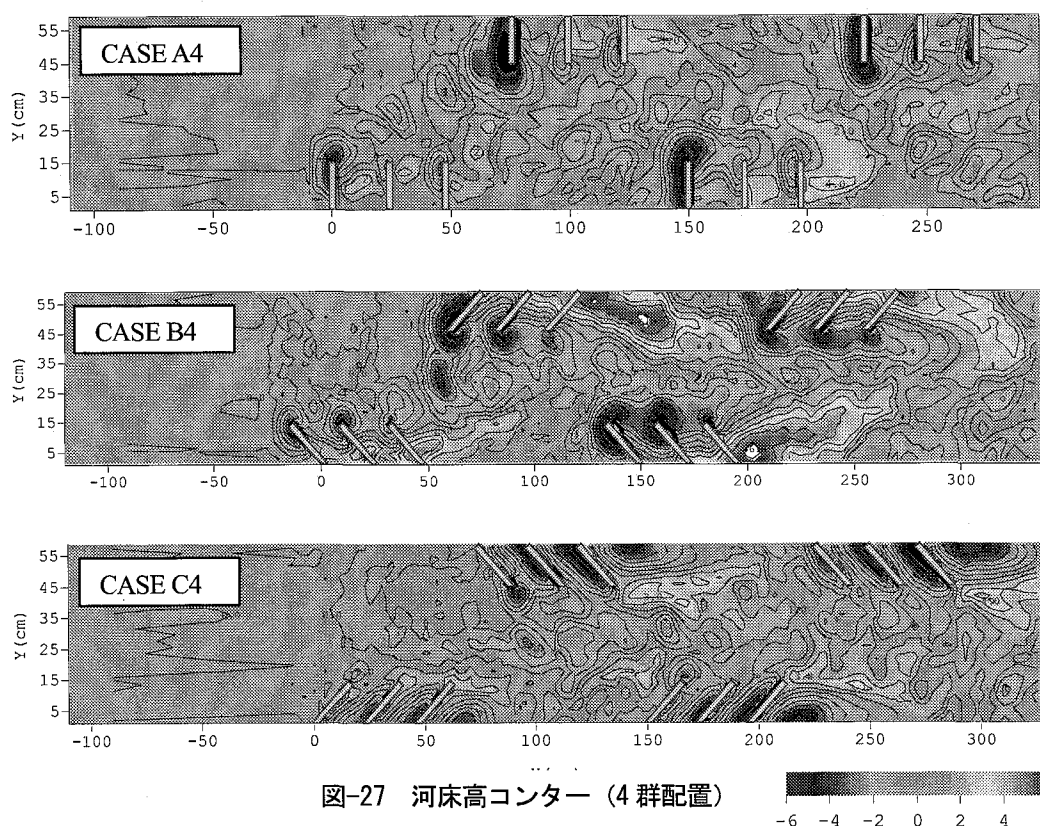


図-26 下向き水制群の流速ベクトル



岸に向かう流れが支配的であり、この流れが側壁に沿って上昇流を誘起している。この結果上部の流速が減速されるとともに、砂を巻き上げて水制後方への堆積を引き起こしている。下向き水制では側壁および下流側水制に沿って下降する流れと底面で水路中央に向かう流れが支配的なため、側壁から水制前面の砂が水路中央へと運び去られる。

第2水制群以後を見ると、直角水制では第1水制群から斜めに発生する洗掘域が第2水制群の先頭水制の位置に合致し、大きな洗掘深を示している。上向き水制では、第1水制群から斜めに伸びた洗掘とは上流側にずれた位置に第2水制群の先頭洗掘域が発生し、第2、第3水制の先端へと連続した大きな洗掘域を形成する。第3水制群および第4水制群の水制先端付近でも連続した大きな洗掘領域が発生する。また、第2、第3水制群の後方から水路中央に伸びる大きな堆積領域が形成される。下向き水制では1群配置で見られた水制群横から斜め下流側へ伸びる洗掘域が見られなくなり、河道中央付近が連続した洗掘域が現れる。第2水制群以降も下向き水制特有の側岸にまで達する洗掘が現れている。下向きの場合は水路中央部の河床変動が小さいといえる。

以上のように、越流型水制ではその設置角度により流れの構造が大きく変化し、河床変動へ与える影響が大きい。水制を乗り越える流れがそれぞれ特徴的な流れ構造を発生させ、特徴的な河床形状を形成する。下向き水制群では側壁に向かう下降流となり、水制背後の側壁付近に洗掘を生じさせる。上向き水制群では水制前面の低層から側壁に向かう流れが砂を輸送し、水制根元に堆積を促す。このような斜め越流型水制の特性を利用して組み合わせることにより、多様な河道形態の創出が期待できる。特に上向き水制群を左右岸に交互に配置する工法は、河道全体に瀬・淵構造を形成するのに適していると考えられる。

4.4. 湾曲部に設置した水制の効果³¹⁾

湾曲部および蛇行部では外岸側に流れが集中するため治水面において河岸保護が重要である。著者らは開水路湾曲部に繁茂した樹木群の流れと河床変動に及ぼす影響について実験的、数値的研究を行い、河床変動制御の可能性について検討を行ってきた。その結果、樹木群の配置と二次流構造の変化、河床変動への影響などが実験によって明らかにされ^{32),33)},

また、外岸に杭群を設置した実験では杭の高さを変化させてその影響を検討し、外岸に設置した杭群は外岸の洗掘防止効果は発揮するが、非水没の場合は杭群境界領域で大きな洗掘が発生して、杭群内部にまで洗掘が及び倒壊流出の恐れがあること、水没の場合は杭を乗り越えた二次流によって外岸に高速域が発生して洗掘が発生すること及び杭群下流で急激な底面せん断応力の増大により洗掘が進行する恐れがあることが示されている³²⁾。

ここでは、湾曲部に治水対策として水制群を設置する場合を考える。透過性を有する杭型水制をモデルとした実験結果に基づき、湾曲部における流れ構造の変化およびそれに伴う河床変動抑制効果について述べる。

図-28は、非水没型杭水制、水没型杭水制および水没型不透水制の実験による通水5時間後（不透水制は2時間後）における河床高コンターである。水没型および非水没型とも流下に伴い洗掘は水制に沿うように水路中央付近で発生している。非水没型のケースでは湾曲角 $\theta = 30^\circ$ 過ぎから洗掘が生じ始め、湾曲角 $\theta = 60^\circ$ では洗掘が水制内にまで進入しており、水制先端付近で最大洗掘が生じている。また内岸側において湾曲角 $\theta = 45^\circ$ 付近から堆積が生じ始め、湾曲角 $\theta = 60^\circ$ で最大堆積が生じている。水没型杭水制のケースでは洗掘堆積傾向は非水没型に類似しているが、洗掘堆積ともに全体的に抑制されている。しかし、水制内において湾曲角 $\theta = 60^\circ$ の外岸側壁近傍で大きな洗掘が生じている。また、下流直線部の外岸の洗掘が大きい。水制先端の影響による局所洗掘が発生しており、湾曲角 $\theta = 30^\circ$ 後方でやや大きい洗掘が生じている。一方、不透越流型の水制のケースでは、全体的な傾向としては水没型杭水制と同様な洗掘堆積を示し、湾曲による局所洗掘自体は抑制されていると見ることができ、水制前面から先端にかけての局所洗掘が大きい点が異なる。 $\theta = 60^\circ$ の水制では最も洗掘が激しく2時間前後で前面の砂が流出した。したがって、湾曲部の終端付近に不透水制を設置することは好ましくないといえる。

図-29は固定床各ケースの湾曲出口における二次流ベクトルである。右側が外岸側である。非水没型の場合は、水制領域にあたる外岸領域を除く主流域において一つの大きな二次流を形成している。水制間および水制域下流においても二次流の形成範囲は水制域内には及ばず、外岸の底面近傍での内岸向き

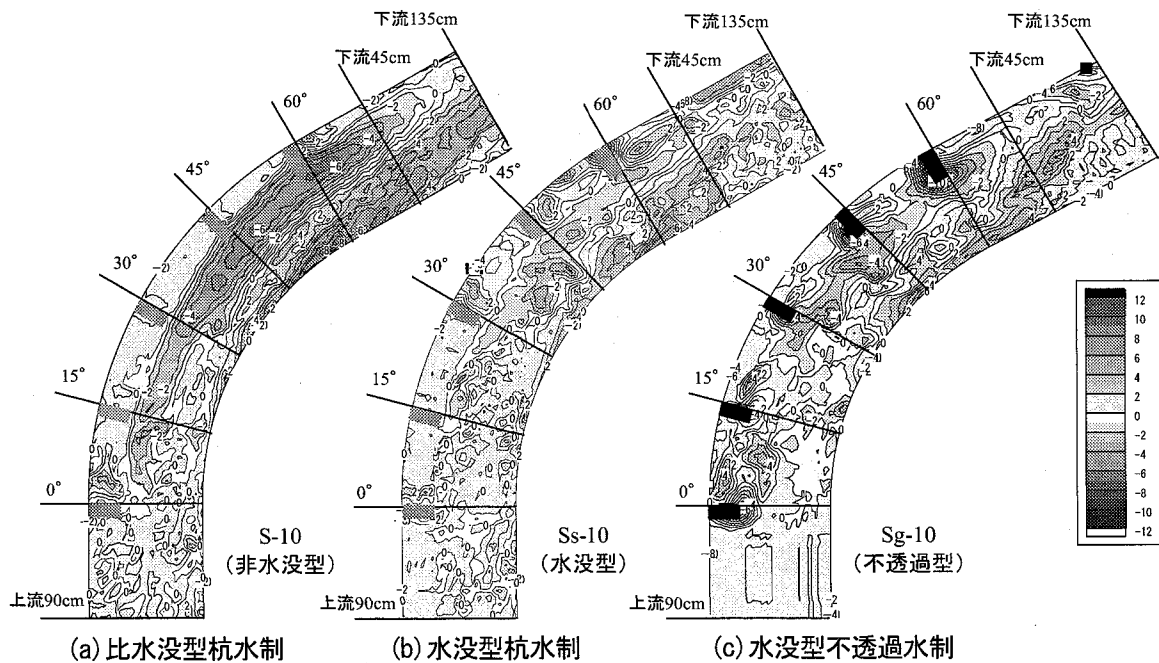


図-28 河床高コンター (実験値)

流れは弱い。水没型のケースでは、水制設置断面後方で水路全体に及ぶ二次流を形成している。水制間および下流においても外岸では強い下降流と底面付近の強い内岸向き流れを有している。不透過越流型のケースでは、水制域において局所的な変化が大きいが、非水没型杭水制のケースと同様に水制長の外岸領域を除く主流域にひとつの二次流が存在する。水制上部では外岸に向かう流れが認められ、水制背後では強い上昇流を伴う内岸向き流れが発生している。

図-30 は移動床における二次流ベクトルを非水没型と水没型で比較したものである。非水没型のケースでは、水路中央付近で二次流が生じており、外岸側にまで進行しておらず下降流が水制境界付近で生じている。また、水制に沿うようにして発生する下降流が流下に伴い発達することで水制先端付近での洗掘を増大させているものと考えられる。水没型のケースでは、水路全体に及ぶ二次流を形成しているが、注意深く見ると水制境界部付近での上昇流の発生により、主流域で一つの二次流と外岸側で水制上方に中心を持つ二次流の2つに分かれる2重渦構造を呈しているのがわかる。外岸側において側壁付近での下降流により側壁近傍の洗掘が生じるものと考えられる。

湾曲部における透過型水制の効果については、2次元及び3次元の数値計算によってその影響の予測を試みて良好な結果を得ている^{34),35)}。水没、非水没

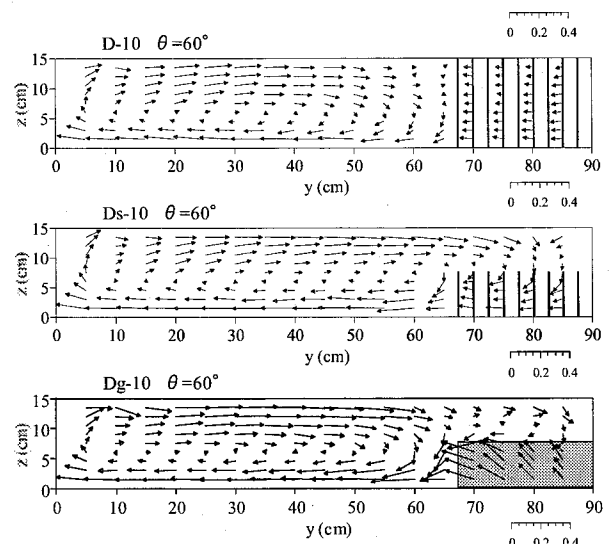


図-29 固定床における二次流ベクトル

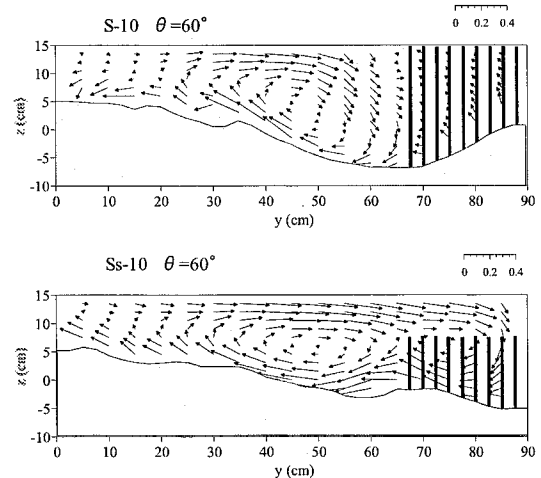


図-30 移動床における二次流ベクトル

にかかわらず二次流は発生し、水制を配置しただけでは二次流抑制はできない。河床変動に関しては非水没の場合は外岸外岸の洗掘は抑制されるが、水制先端部領域が大きく洗掘される。水没時の方が全体として洗掘、堆積は抑制できるが、外岸の2重渦構造により湾曲出口付近の根元付近で局所洗掘が生じることが示された。不透過型水制は越流型であっても湾曲部外岸に設置すると激しい局所洗掘を生じる。

5. わんど周辺の流れ構造

わんどは平水時において本川との水の行き来がある河川の死水域のことであり、平水時には魚類の産卵や仔稚魚期の生活場、洪水時には避難場の役割をするとされている。このようなわんどの生態環境改善の効果を期待してわんどを人工的につくる取り組みが行われている。淀川、木曽川に代表されるように自然に時間をかけて造られたわんどの調査結果から、わんどを人工的につくることで、生態環境改善の効果を期待する取り組みも行われている。わんどを河川環境支援構造と考えたとき、わんど内の水質が重要な要素であり、平水時に適度な水交換が行われて良好な水質が保たれることが必要である。また、洪水時には大きな洗掘や堆積が起らずに静穏域が保たれることが必要とされる。ここでは、室内模型実験によりわんどの開口部形状が流れ構造とわんど内の水交換機能の関係について調べた結果について述べる。また、現地と実験室の両方のアプローチを備えた独立行政法人土木研究所の自然共生研究センターのわんど研究ゾーンを利用して、平水時から洪水時に至る非定常な流況下におけるわんどの水交換機構の数値シミュレーション結果について示す。

わんどの水交換は次のような過程を経て行われることが染料による可視化観測から示されている³⁶⁾。主流の流れはわんど境界部付近でせん断不安定に起因する渦によってわんど内の水と混合を生じる。わんど上流端で生じた小規模渦は下流端までの間に大規模な渦に統合（合体）し、わんど下流端で壁面に衝突する。そこで主流域へ流出する部分と、わんど内へ流入する部分に分かれる。流入直後の水塊は渦度を有しながら壁面に沿って循環流を形成し、その過程で渦度が弱まり、周囲流体と混合拡散する。このわんど境界部の周期性を持つ渦とわんど内の循環渦による輸送により、主流とわんど内の水との交換

が行われているものと考えられる。瞬間的なこのような渦運動の長時間平均の結果、流速ベクトルにはわんど内の循環流構造が残る。

図-31 はわんどの開口幅と奥行きが1.5と3.0におけるわんど内流速ベクトルを示す。形状比が1.5では1つの循環渦が生じているのに対し、3.0では下流側からわんど内に入り込み循環する渦が奥行き2倍程度まで発達し、上流側には逆回転の渦が発生する。図-32 は、わんど開口部を種々の方法で閉鎖した場合の流速ベクトルを示す。(a) は上流部半分を閉鎖した場合、(b) は開口部中央の1/3を閉鎖した場合、(c) は開口部の上下流1/3ずつを閉鎖したケース、(d) は上流側半分を透過性の円柱群で閉鎖した場合である。わんど下流壁面に沿う流入が卓越することから、下流側が開いている(a)、(b)では同様の循環流が発生するが、上流のせん断渦構造が変化することから流入量が減少し、循環流速は減少する。下流側が閉ざされている(c)では開口部最下流から流

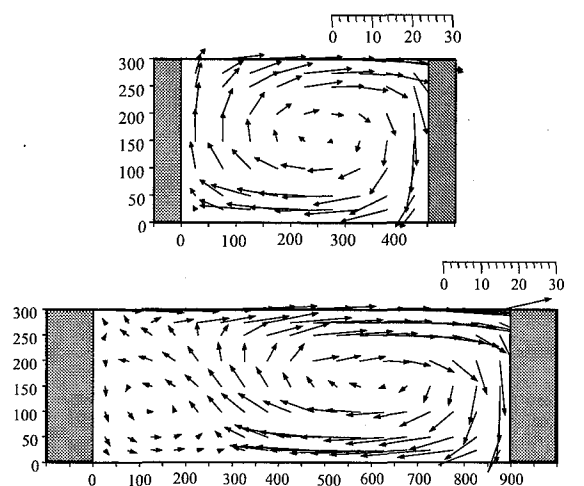


図-31 わんど形状比による循環流の変化

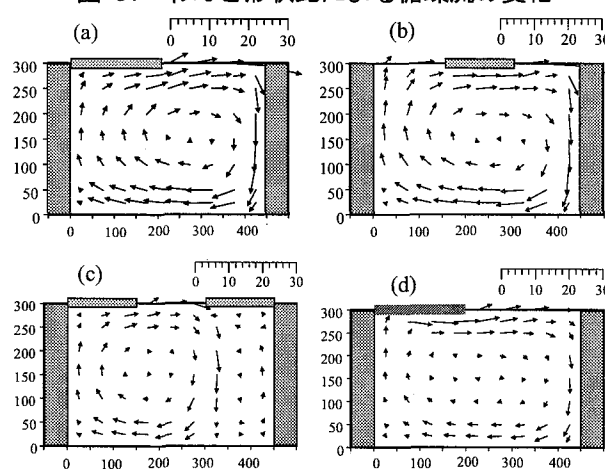


図-32 わんど開口部閉鎖形状による循環流の変化

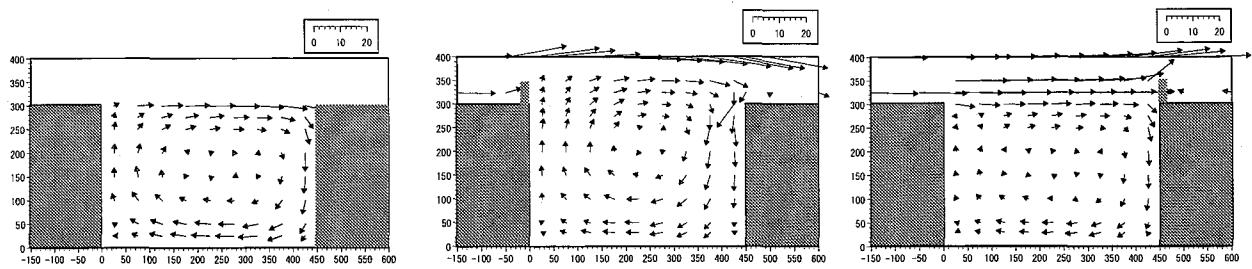


図-33 わんど上下流部に突起を設けた場合の二次流ベクトル

入しこれより上流で循環流が発生し、速度はさらに小さくなる。透過性の構造で閉鎖した場合、不透過の場合よりも循環流速は減少する。これは円柱群によりせん断不安定渦の発達抑制されることに起因するものと考えられる。

次に、わんど開口部の上流部または下流部に 5cm の突起を設けた場合の時間平均流速ベクトルを図-33 に示す。上流端突起のケースでは、突起による水はねが生じ、この水はねによって主流側へ拡大したせん断領域を外縁として循環渦が拡大し、突起の背後までのスケールの循環渦が生じている。下流端突起のケースでは流入が卓越する下流からの流入が促進されることを期待したが、循環渦のわんど内上流部で流れが弱くなる。結果として上流端突起のケースが最も循環流速が大きく、下流端突起のケースが最も小さくなる。このように、わんど外部に突起を設けることにより、わんど内の流れ構造を変化させることが可能であり、上流に突起を設けることで、循環流を強め、わんど内への流入傾向を強めることができる。

以上のような実験では、わんど形状が実際とは程遠い理想的なケースの議論になりがちであるため、その適用性を検討することを目的として、現地と実験室の両方のアプローチを備えた独立行政法人士木研究所の自然共生研究センターのわんど研究ゾーンを利用してわんどの水交換機構を調べてきた³⁷⁾。自然共生研究センターのわんど研究ゾーンは、全長 800m の人工河川 B, C の上流端より 450m から 560m の区間に設けられている。この区間に 3 つの連続したわんどが作られており、B 河川の最上流部のわんどを研究対象とした。わんど部の形状は図-34 に示すようである。

2002 年 7 月 31 日の実験においては、わんど開口部下流に植物が繁茂しており、わんど内の全体に及ぶ循環流が形成されずに、わんどの中央に向かう流

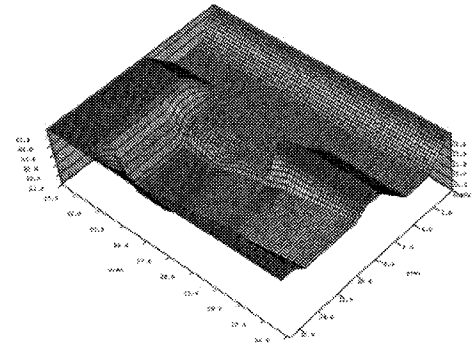


図-34 自然共生研究センターのわんど形状

れが見られた。植生を取り除いたところ、明確な循環流が形成され始め、濁水のわんど奥への侵入が見られるようになった。これを 2 次元の数値計算によって検討した結果を図-35 に示す。図には平水時の計算結果も示している。植生なしの場合はわんど開口部下流から強い流入があり、わんど全体に及ぶ循環流が形成されているのに対し、植生ありの場合は、植生に遮られる形で流入する流れが弱められてわんど中央部へと向かうのが見て取れる。わんど下流部奥では通常とは逆の循環流が形成されているが、これは目視観測で認められたものと一致する。平水時の計算結果の流速ベクトルを見ると、わんど上流側で流入し、下流側で流出する流れとなっており、これに伴うわんど内の循環流は非常に弱いことがわかる。このように平水時にはわんど内全体に及ぶ循環流による速やかな水交換は期待されないが、この弱い流れと拡散によってだけでも 16 時間程度でわんど内の水全体が交換されることが数値シミュレーションで示されている。

以上のようなわんどの水循環を考える上では数値計算が有力な手段となるが、図-32, 33 に示したような渦構造の再現については RANS モデルを用いては現段階でも十分な精度は得られていない。わんど内の循環流構造は非定常な大規模組織渦の時間平均された姿であるため、流れ構造と物質輸送をより正確に把握するには、この大規

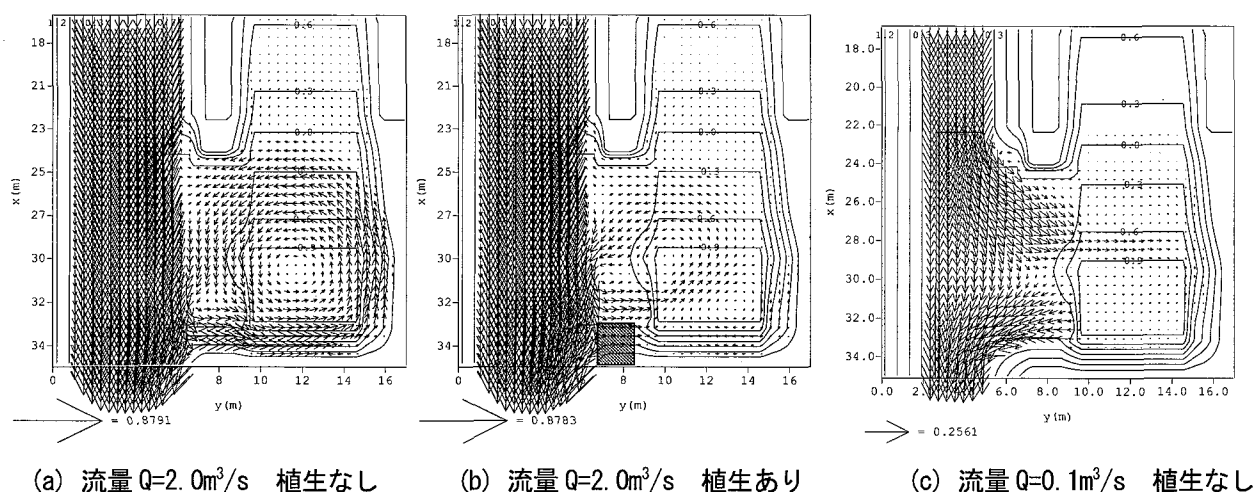


図-35 数値計算による流速ベクトルの比較

模組織渦を再現できる計算が必要である³⁸⁾。図-36は図-33のケースに対する非定常 RANS モデルによる瞬間渦構造の計算例である。わんどと主流境界のせん断不安定渦の形成と下流からの流入および循環流の形成過程が再現され、上流に突起を設けた場合が非常に速く混合することが示される。このようにわんど周辺の流れは非定常性が強く、わんどの水交換現象の解明には組織的構造の再現が不可欠と考えられる。また、実際に現地では風や伏流水等の効果があることも考慮しなければならない。

6. あとがき

河川構造物の治水・環境機能と題して、河川における境界条件と流れ構造の関係を中心に著者らの研究成果を中心に考察してきた。流れに対する構造物の特性を抽出した室内実験によって、構造物の基本的な形式に対する流れの定性的な応答特性を明らかにすることができる。ここでは境界条件の形式を分類し、できるだけ多くの境界条件を取り上げ、これによる流れ構造の変化および河床変動等への影響を示した。これらの資料から実河川における構造物の効果に関して定量的な予測にまでは至らないかもしれない。現実にはさらに複雑な条件が存在するとともに、相似則や歪み模型などの問題もあるからである。しかし、数多くの境界条件に対する流れ構造の応答特性を蓄積することで、現場への適用に関しても普遍的な傾向を推測し、予想すべき結果に対して有用な洞察を与えることができる。さらに一歩進めるな

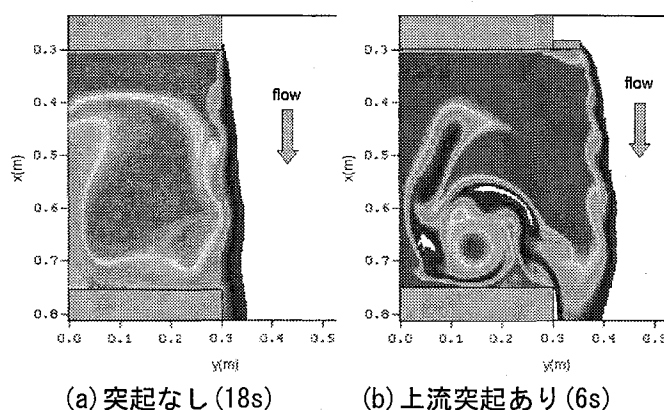


図 36 瞬間渦構造の数値計算例

らば、それぞれの境界条件に対する流れの応答に関して、適切な数値シミュレーション法を選択することで、定量的な予測も可能となるであろう。こうした実験結果は数値計算モデルの検証としても重要といえる。多自然川づくりにおいては、境界の多様性が重視され、ますます複雑な乱流構造の予測が必要とされると考えられる。河川技術者は、様々な生態系が要求する流れの物理的条件に対して、複雑な流れに関する幅広い知識と、数値予測技術を持ってこれに応える責務を負うであろう。この解説がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Sternes, F.P.: On the current meter, together with a reason why the maximum velocity of water flowing in open channels is below the surface, Trans. of ASCE, vol.12, No.216, pp.331-338, 1883.
- 2) Gibson, A.H., On the depression of the filament of maximum velocity in a stream flowing through on open channel, Proceedings of Royal society, London, England, series A, vol.82, pp.149-159, 1909.

- 3) Prandtl, L.: Über den Reibungswiderstand stromenderluft, *Ergeb. Aerodyn. Versuch Gottingen, III series*, 1927.
- 4) 富永晃宏・江崎一博, 長方形断面開水路流の3次元乱流構造に関する実験的研究, *土木学会論文集*, 第357号/II-3, pp.81-88, 1985.
- 5) 富永晃宏・江崎一博・禰津家久, 台形断面開水路流の3次元乱流構造に関する実験的研究, *土木学会論文集*, 第381号/II-7, pp.55-63, 1987.
- 6) 富永晃宏・江崎一博・小葉竹重機, 複断面開水路流の3次元乱流構造, *土木学会論文集*, No.417/II-13, pp.129-138, 1990.
- 7) 木下良作, 航空写真による洪水流の解析, *写真測量*, vol.6, pp.1-17, 1967.
- 8) Karcz, Z., Secondary currents and the configuration of a natural stream bed, *Journal of Geophysical. Research*, vol.71, pp.3109-3116, 1966.
- 9) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦, 砂・河川の掃流砂に関する基礎的研究, *京都大学防災研究所年報*, 第20号B-2, pp.451-473, 1977.
- 10) Vanoni, V.A., Transportation of suspended sediment by water, *Trans. of ASCE*, vol. 111, pp.67-133, 1946.
- 11) Odgaard, A. J. and Kennedy, J.F., River-bend bank protection by submerged vanes, *J. Hydr. Eng., ASCE*, 109(8), pp.1161-1173, 1983.
- 12) 関根正人・吉川秀夫・井田泰蔵・高松諭・仲村学, 斜め棧粗度による河川湾曲部の2次流抑制に関する研究, *土木学会論文集*, 第558号/II-38, pp.61-70, 1997.
- 13) 辻本哲郎・清水義彦・松尾和弘, 斜め棧粗度による螺旋流制御, *水工学論文集* Vol.39, pp.571-576, 1995.
- 14) 富永晃宏・中村悦由・高橋正良, 縦筋河床上の3次元乱流構造について, *土木学会第13回関東支部技術研究発表会講演概要集*, pp.66-67, 1986.
- 15) Tominaga, A., Nezu, I. and Nagao, M., Turbulence Control of Channel Flow by Forced Secondary Currents over Longitudinal Ridge, *Proceedings of 9th Turbulent Shear Flows*, pp.14.4.1-14.4.6, 1993.
- 16) 富永晃宏・長尾正志・千葉茂樹, 幅水深比の小さな長方形断面開水路の湾曲部流れ構造に関する実験的研究, *土木学会論文集*, No.607/II-45, pp.19-28, 1998.
- 17) 富永晃宏・長尾正志・大沼保仁, 台形断面開水路湾曲部の2次流構造, *水工学論文集*, 第42巻, pp.895-900, 1998.
- 18) 富永晃宏・長尾正志, 複断面開水路湾曲部の流れ構造, *応用力学論文集*, vol.1, pp.693-700, 1998.
- 19) 山本晃一, *日本の水制*, 山海堂, 1996.
- 20) イヴァン・ニキティン (福留脩文・山脇正俊訳), *水制の理論と計算—近自然河川工法の発想を助けるために—*, 大学図書, 1995.
- 21) 富永晃宏・長尾正志・長坂剛, 水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響, *水工学論文集*, 第44巻, pp.1035-1040, 2000.
- 22) 富永晃宏, 庄建治朗, 内藤健, 松本大三, 伝統的河川工法「聖牛」の水理機能と河床洗掘防止効果に関する実験的研究, *水工学論文集*, Vol.49, 1009-1014, 2005.
- 23) 富野章, *日本の伝統的河川工法* [I], [II], 信山社サイテック, 2002.
- 24) Morota, K, Tsuchiya, M: Study on the effect of Placement of Seigyu groins at confluence and curve, *Proc. of IAHR Congress*, vol.C-II, 55-62, 2003.
- 25) 戸谷英雄, 米山実, 古川弘和, 湊章: 富士川水系における伝統工法の評価と活用方法について, *河川環境総合研究所報告*, 第7号, p67-81, 2001.
- 26) 富永晃宏・中野義郎・井嶋康二・長坂剛, 越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, *応用力学論文集*, vol.2, 805-812, 2000.
- 27) 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*, vol.45, 379-384, 2001.
- 28) 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間隔の効果, *水工学論文集*, vol.46, 475-480, 2002.
- 29) 富永晃宏・田本典秀, 越流型水制群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*, Vol.48, 805-810, 2004.
- 30) 松本大三・富永晃宏, 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響, *水工学論文集*, Vol.50, 1009-1014, 2006.
- 31) 富永晃宏・中居毅・内藤健・中村尚子, 開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響, *水工学論文集*, Vol.48, 547-552, 2004.
- 32) 富永晃宏, 木村聡洋: 湾曲部の流れ構造と河床形状に及ぼす樹木群配置の影響, *水工学論文集*, vol.43, pp.809-814, 1999.
- 33) 富永晃宏・青木健太郎・木村聡洋: 円柱粗度による湾曲部河床変動の制御に関する実験的研究, *水工学論文集*, vol.45, pp.769-774, 2001.
- 34) 富永晃宏・青木健太郎: 円柱粗度を有する開水路湾曲部の流れと河床変動の2次元数値解析, *応用力学論文集*, vol.4, pp.557-564, 2001.
- 35) 富永晃宏・中村尚子・青木健太郎: 樹木群を有する開水路湾曲部流れの3次元数値計算, *応用力学論文集*, vol.5, pp.709-716, 2002.
- 36) 富永晃宏・谷川幸男・久田陽史, 人工わんどの水交換機構とその制御に関する研究, *水工学論文集*, vol.46, 571-576, 2002.
- 37) 富永晃宏・久田陽史, わんど研究ゾーンにおける出水実験時の水交換機構に関する研究, *平成13年度自然研究センター研究報告書*, 240-245, 2002.
- 38) 木村一郎, 細田尚, 安永良, 村本嘉雄: 開水路流れ止水域周辺の水面振動・流体混合特性, *水工学論文集*, 第41巻, pp.711-716, 1997.