

停滞した河川における連続スリット壁によって創出される流れ構造

指導教官 富永晃宏 教授

佐藤理佳子

1. はじめに 中小都市河川は水源が乏しいため流れが停滞しやすく、成層化により貧酸素水塊が発生し劣悪な河川環境となることが多い。そこで、停滞した河川や運河に流れを創出する構造物として、連続スリット壁を考える。それによって河川水に流速と擾乱を与えることで、再曝気により大気中から酸素を多く取り込むとともに、河川水全層に酸素を行き渡らせ、溶存酸素量を増加させることが期待できる。本研究では、スリット壁のパラメータを変化させることによる流れ構造の変化と自浄作用に及ぼす影響をPIV実験と数値計算により検討した。

2. 実験方法 実験水路は、長さ7.5m、全幅0.3mの勾配可変開水路を用いた。側面はガラス張り、レーザー光の反射を防ぐために、水路底を黒く塗っている。実験条件は表-1に示すように非越流(E)と越流(S)を設定した。連続スリット壁のモデルとして幅1cm、高さ5cm、長さ2.5cm,5.0cm,10cmのアクリル製直方体を用い、それを組み合わせることによって、図-1に示すような河岸からの距離 dy 、開口部長さ l 、流下方向間隔 dx を変化させて実験を行った。各実験ケースを表-2に示す。また、上流側から順に、第1、第2、第3模型とする。PIV計測は特に模型間の流れに着目して行い、全てのケースにおいて第1模型の上流端が水路上流端から370cmの位置になるよう調節した。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3mmのシート状にしたアルゴンレーザー光を開水路水平断面および鉛直縦断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、水平断面は0.5cm間隔で、非越流時は7断面($z=0.5\sim 3.5\text{cm}$)、越流時は12断面($z=0.5\sim 6\text{mm}$)設定した。鉛直縦断面は2.5cm間隔で11断面($y=2.5\sim 27.5\text{cm}$)を計測した。この可視化画像は高速度カメラ(ライブラリー)を用いて1/200sで撮影した。FlowExpert(カトウ光研)PIV解析ソフトを用いて直接相相関法により画像解析し、3200データ16秒間平均値を流速ベクトルデータとした。

3. 実験結果と考察 流れ構造について検討する。図-2に水平断面 $z=1.5\text{cm}$ におけるcase baseE, Sの時間平均流速ベクトル図と合成流速コンターを示す。ベクトル図より、非越流時において流れが堰き止められ、スリットに流れが集中することで、S字に流下する加速域が形成される。第1第2模型間では、加速された流体は緩やかに方向を変え第2第3模型間に流入したのち、第3模型の壁面に押し付けられながら流下していく。一方、構造物によって囲まれた部分は滞留域となり、渦が形成されている。越流時においては、障害物を乗り越える流れが発生することによってスリットに流れが集中せず、三次元性の強い流れ構造となっている。次に合成流速コンター

表-1 実験条件

	水深 h (cm)	流量 Q (l/s)	断面平均流速 Um (cm/s)	フルード数 Fr	勾配 I
非越流(E)	3.5	0.27	2.57	0.044	1/3500
越流(S)	6.0	0.46	2.56	0.033	

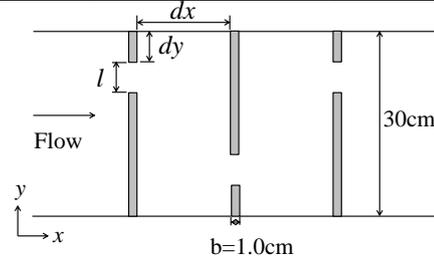


図-1 模型配置図

表-2 実験ケース

case	開口部長さ l (cm)	河岸からの距離 dy (cm)	流下方向間隔 dx (cm)	水深 h (cm)
baseE	5.0	5.0	15.0	E 3.5
dy0E		0.0		
dy2.5E		2.5		
dy7.5E	5.0	7.5	15.0	
dy10E		10.0		
dy12.5E		12.5		
l7.5E	7.5			
l10E	10.0	5.0	15.0	
l12.5E	12.5			
l15E	15.0			
dx5E			5.0	
dx10E	5.0	5.0	10.0	
dx20E			20.0	
dx25E			25.0	
baseS	5.0	5.0	15.0	S 6.0
dy0S		0.0		
dy10S	5.0	10.0	15	
dy12.5S		12.5		
l7.5S	7.5			
l10S	10.0	5.0	15.0	
l12.5S	12.5			
l15S	15.0			
dx5S			5.0	
dx25S	5.0	5.0	25.0	

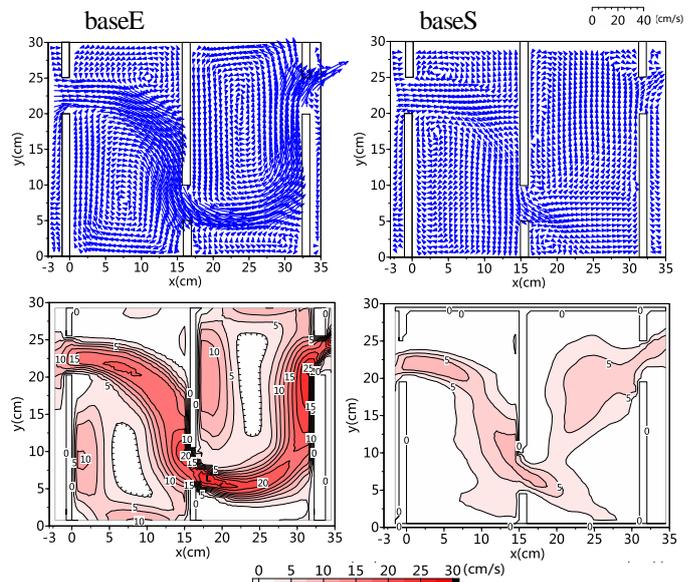


図-2 平均流速ベクトル図(上), 合成流速コンター(下)

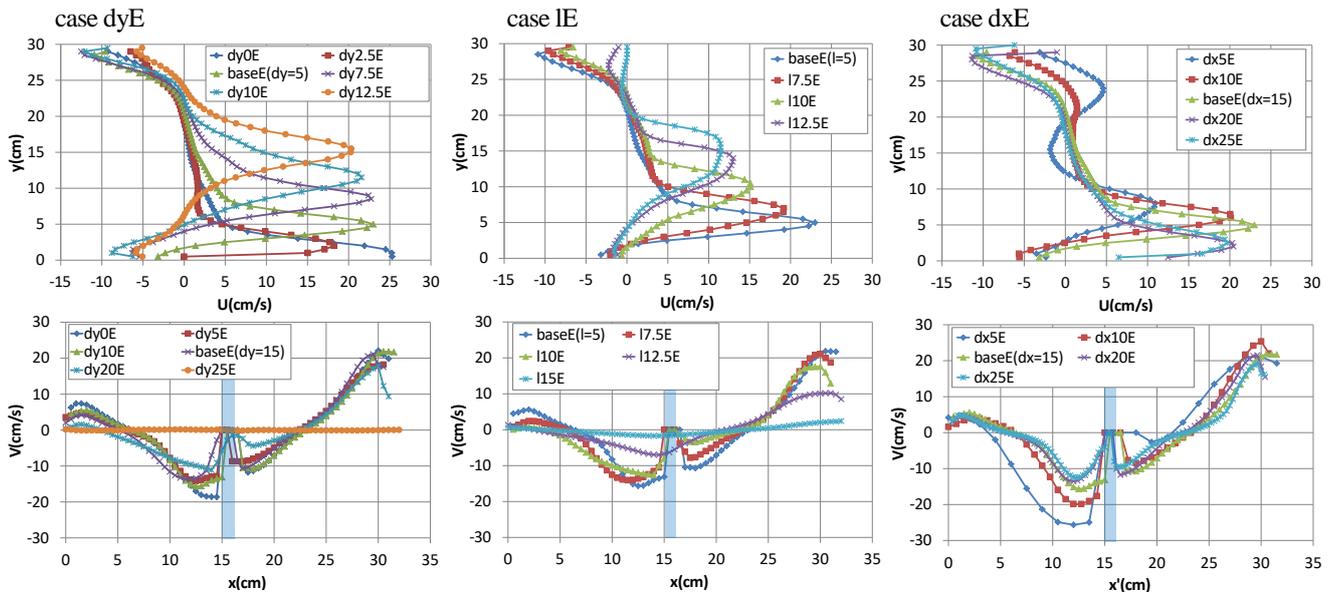


図-3 平均流速 U 横断方向分布 (上), 平均流速 V 縦断方向分布 (下)

より, 連続スリット壁を設置していない状態では 2.57cm/s であった流速が, 非越流時では 20cm/s 近くまで加速されていることがわかる. この結果から, 連続スリット壁は, 停滞した河川において流速を生み出す工法として有効であることが示唆された. 越流時においては, 非越流時において観察されたような明確な加速域は形成されないが, 8cm/s 近い流速が創出されている.

図-3 に $x=3/2dx$ における平均流速 U の横断方向分布と $y=15\text{cm}$ における平均流速 V の縦断方向分布を示す. なお, case dx のみ, 流速 V 分布の横軸を $x'=15(x/dx)$ で無次元化している. U 横断方向分布から, 河岸からの距離 dy が増加するにつれて最大流速が小さくなっており, スリット位置が河岸に近いほど, 連続スリット壁を通過する流れは加速する傾向があると言える. 開口部長さ l が増加するにつれて主流域の流速が小さくなり, 滞留域における逆流も小さくなっていく. 流下方向間隔 dx については, dx が増加するにつれて, 流速の変化が急になり, 滞留域における逆流も大きくなっていく. 一方で平均流速 V の縦断方向分布から, すべてのパラメータにおいて, dy , l , dx が増加するにつれて, 流速 V の値が減少しており, 横断方向の水交換が弱まっていくことがわかる.

図-4 に水深平均流速から算出した流れ関数 ψ コンターを示す. baseE のグラフから, スリットを緩やかな曲線で結ぶ領域が主流域となっており, 流量が集中していることがわかる. また, 滞留域では大規模な渦構造が発達している. 一方, スリットが流路中心に位置する case dy12.5E では渦の大きさは小さく, 均一の大きさになっていることが分かる. そこで, 図-5 にケースごとの滞留域の渦サイズを示す. 横軸の無次元化パラメータは, case base の値が 1 となるように, 各パラメータを比で表したものである. 河岸からの距離 dy が増加し, スリット位置が中心に近くなるほど, 渦のサイズは小さくなっていく. 開口部長さ l が増加し, 開口部が広くなるにつれて渦構造

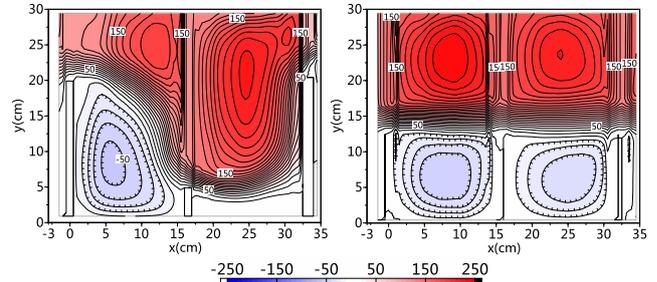


図-4 流れ関数 ψ コンター (左: baseE, 右: dy12.5E)

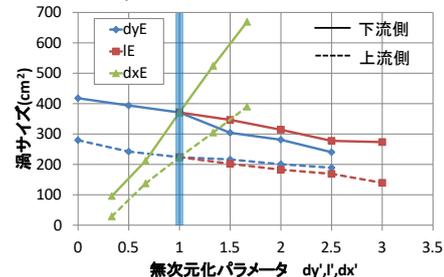


図-5 渦サイズ

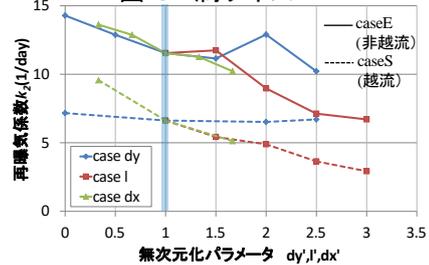


図-6 再曝気係数 k_2

は消滅していく. 一方, 流下方向間隔 dx が増加するにつれて渦構造は大規模になっていく. ここから, 模型間領域のアスペクト比と, 模型間をどの位置でスリットによって分断するかによって渦構造の大きさは決定されるということが示唆された.

次に, 連続スリット壁が創出した流れが再曝気係数に与える影響を考察する. 再曝気とは, 酸素が大気から水中へと移動することであり, 再曝気能力は再曝気係数によって表現される. 既往の研究から様々な予測式が提案されているが, 本研究では Langbein and Durum による

評価式¹⁾を用いて検討する。計算式を以下に示す。

$$k_2 = \frac{1}{2} \sum_{c=1}^2 \left[2.23 \left(\frac{1}{A} \int |U_a| dx dy \right) H^{-1.33} \right] \quad (1)$$

ここで、 k_2 :再曝気係数(1/day), A :模型間平面積, U_a :合成流速(m/s), H :模型間領域中心における水深(m), c :模型間領域番号(第1第2模型間:1, 第2第3模型間:2)である。図-6にケースごとに計算した再曝気係数を示す。非越流時の方が越流時よりも再曝気係数が大きくなる傾向が得られた。スリットの河岸からの距離が増加するほど再曝気係数は減少しており、 $dy'=1.5$ で最小になった後、再び増加していることが読み取れる。また、開口部長さ l について見てみると、 $l'=1.5$ で最大となり、その後は開口部が大きくなるにつれて、再曝気係数は小さくなっていく傾向が得られた。これは、流れを堰き止める作用が小さくなり、流速が減速することが原因であると言える。さらに、模型の流下方向間隔が増加するにつれて、再曝気係数は小さくなる傾向が得られた。

次に、連続スリット壁が、湧昇流発生に与える影響を考察する。図-7に xy 平面における水深平均した鉛直方向流速 W コンターを示す。この図から、非越流時では流れのぶつかる第3模型付近のみに上昇流が発生しているのに対し、越流時では全断面にわたって上下流が発生しており、鉛直方向の循環が大きくなっていることがわかる。これは、障害物を乗り越える流れによって下降流が発生し、上下に流れが移動することに加え、開口部から流入する流体によって底層から湧昇流が喚起されることが原因であると考えられる。鉛直方向流速 W が 0.5cm/s 以上であれば、十分な湧昇流が発生していると仮定する。そこで、以下の式で表される湧昇流発生指数 Y_s を考える。ここで、 $r_{\text{over}0.5}$ は 0.5cm/s 以上の流速の占有率(%), $\overline{W_{\text{over}0.5}}$ は 0.5cm/s 以上の流速の平均値である。

$$Y_s = r_{\text{over}0.5} \times \overline{W_{\text{over}0.5}} \quad (2)$$

図-8に湧昇流発生指数 Y_s のグラフを示す。越流時の方が非越流時よりも湧昇流を誘起しやすい。非越流の場合、 dy が増加するにつれて、湧昇流が発生しなくなっていくことがわかる。開口部長さ l や障害物の流下方向間隔 dx による傾向は得られなかったが、 $l'=1,2$, $dx'=0.33,1$ で湧昇流がよく発生している。一方、越流時ではパラメータの変化に対する傾向がよく得られた。 dy の変化に対しては非越流時と同様に、中心部に近づいていくほど湧昇流が発生しなくなる。開口部長さ l に関しては、開口部が広がるほど湧昇流が発生しなくなり、これは開口部が広がることで流れがせき止められず、障害物を乗り越える流れが減少することによって流れの上下方向の変化が生まれなくなることと考えられる。流下方向間隔 dx に関しては、間隔が増加するにつれて、上昇流は発生しなくなる。これは、間隔が狭い方が、模型間の長さに対して模型高さが高いために、模型を越流し流れ込んだ流れによって、流体が上下にかき乱されることに起因する。

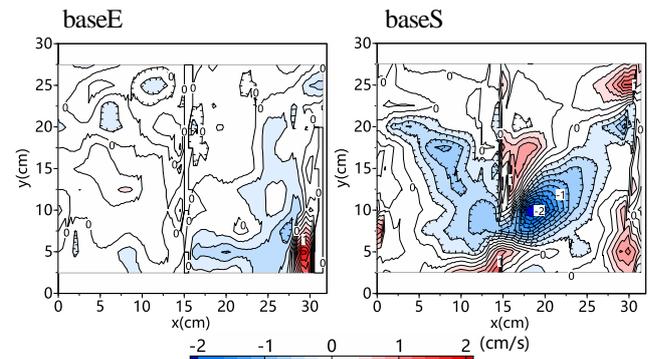


図-7 xy平面鉛直方向流速 W コンター(水深平均)

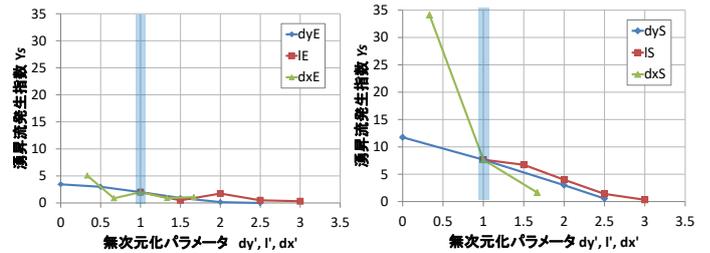


図-8 湧昇流発生指数 Y_s (左:非越流,右:越流)

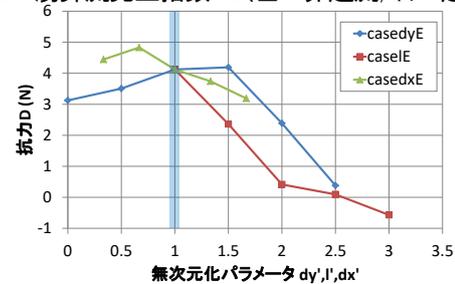


図-9 抗力 D

図-9に、障害物前後における抗力を示す。抗力は以下の式で算出した。また、抗力算出に必要な水位差は、障害物の前後 10cm の箇所計測した。

$$D = \beta \left(\rho q \bar{u} + \frac{1}{2} \rho g h^2 \right) \Big|_{\text{front}} - \beta \left(\rho q \bar{u} + \frac{1}{2} \rho g h^2 \right) \Big|_{\text{back}} \quad (3)$$

この結果から、切り欠きの河岸からの距離 dy が増加するほど抗力は増していき、 $dy'=1.5$ でピークを迎えたのちは減少することが得られた。開口部長さ l に関して、 l が長くなるにつれて抗力が減少している。これは、開口部長さが長くなることにより、水がたやすく下流に流れることができるためである。また、流下方向間隔 dx に関しては、 $dx'=2$ で最大となると、それ以降は dx が増加するにつれて抗力が減少していることが読み取れる。

4. 数値計算 実験結果をもとに数値シミュレーションを行い、溶存酸素量を数値計算によって求め、さらに模型数を増やしたケースについて検討する。数値計算の基礎方程式には、以下に示される水深平均された開水路平面2次元流れの運動方程式及び連続式を用いた。また、濃度の拡散方程式は式(7)で表される。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial hu v}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv u}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}c + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial y}\right) \quad (7)$$

τ_{bx}, τ_{by} は x, y 方向の底面せん断応力, $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ は水深平均レイノルズ応力である。乱流モデルには水深平均の $k-\epsilon$ model を使用した。数値計算結果を実験結果と比較すると、高い再現性が得られた。そこで、数値計算を用いて溶存酸素量を算出する。溶存酸素濃度は以下の式で表す。

$$C_p = k_2(C_s - C) / \Delta z - k_b C \quad (8)$$

ここで、 k_2 : 水表面での再曝気係数(1/s), C_s : DO 飽和値 (=9.07mg/l), k_b : 底泥の酸素消費係数である。数値計算における再曝気係数は実験と同様に式(1)の単位を(1/s)に変換したものから求めた。底泥の酸素消費係数 k_b は 0.25(mg/m²/day)とし、単位を変換して用いた。また、上流端から $x=370$ cm までの領域においては、濃度 0 の水が流入するよう境界条件を設定している。

図-10 に基礎ケースでの DO コンターを示す。模型間領域では滞留域において溶存酸素量が大きくなっており、滞留域が大きいほど溶存酸素を多く捕捉できる。模型設置領域よりも下流の領域において溶存酸素が特に大きくなっており、スリットを設置することでその下流域の DO も高くなり、水質に影響を及ぼすことが示唆された。

図-11 に数値計算から得られた断面平均溶存酸素量を示す。すべてのケースにおいて、何も設置していないケースの溶存酸素量を上回っており、連続スリット壁の有効性が示された。河岸からの距離 dy と開口部長さ l を変化したケースについては、実験での再曝気係数と同じ傾向を示し、DO を増加させるにはスリット位置が河岸に近い、もしくは中心から少しずれている方がよく、開口部は狭い方がよい。一方、流下方向間隔が増加するにつれて溶存酸素量は増加しており、ほぼ直線状の分布形状になっている。これは実験値による再曝気係数の値と反対の結果になっており、模型間の溶存酸素量を増加させるには再曝気係数のみではなく、滞留域の大きさも大きな影響を及ぼすことが示唆された。

図-12 に模型数を増加させたケースにおけるスリット断面平均流速、水深分布を示す。模型数が増加するほど模型間の平均流速が減少しており、模型数が増加しても速い流れが創出できるとは限らないという結果になった。また、模型数が増加するほど水深は大きくなっていることが読み取れ、模型数が増加するほど治水上の安全性は低くなると言える。図-13 に模型数を増加させた場合の断面平均溶存酸素量を示す。下流域とは最下流端の模型から下流 2m の領域、全領域とは模型間領域と下流域をあわせた領域のことである。模型数が増加するほど、模型設置領域では溶存酸素量が減少、下流域では上昇することが分かる。しかし、模型設置数が増えるほど全領域の DO は低くなり、全体的に効果は小さくなると言える。

5. 結論 連続スリット壁が、停滞した河川に流れを創出し水質を改善する工法であることが示された。以下に

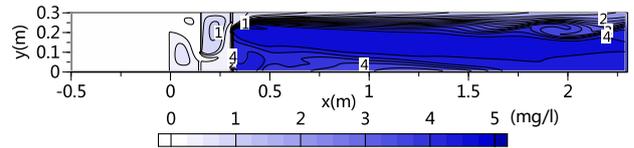


図-10 DO コンター (case baseE)

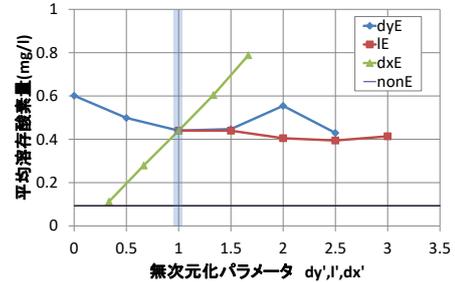


図-11 断面平均溶存酸素量

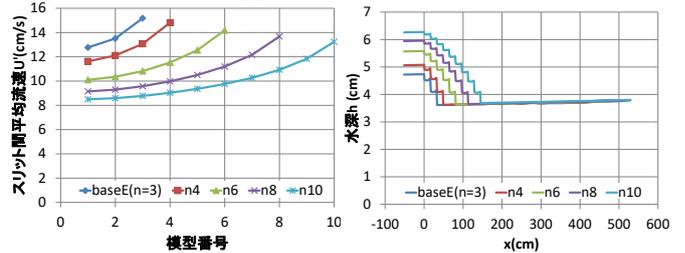


図-12 スリット断面平均流速(左), 水深分布(右)

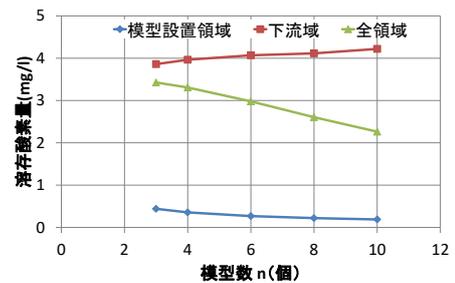


図-13 断面平均溶存酸素量

本研究で得られた知見を示す。

- ① 再曝気係数を大きくするためには、非越流時の方が適しており、スリット位置は、河岸に近くするか中心部から少しずらした形状が良く、開口部長さ l と流下方向間隔 dx を小さくすればよい。また、DO 値を増加させるには、滞留域の大きさを大きくする必要がある。
- ② 湧昇流を発生させるためには越流時の方が適しており、スリットの河岸からの距離 dy , 開口部長さ l , 流下方向間隔 dx を小さくすればよい。
- ③ 抗力を小さくするにはスリットの河岸からの距離 dy は、河岸に近くするか中心部から少しずらした形状が推奨され、開口部長さ l , 設置間隔 dx を大きくすればよい。
- ④ 模型数を増加させた場合においても、全体の溶存酸素量が著しく大きくはなるわけではないので、水深が増加し治水上の問題も発生することが予測されることから、模型数は 3 個にとどめておくのがよい。

実際に構造物を設置する際には、これらの条件を総合的に判断することが求められる。

参考文献

1)W.B.Langbein and W.H.Durum, The Aeration Capacity of Streams, GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 542, 1967