停滞した流れ場において連続スリット壁により 創出される流れ構造

富永 晃宏¹・佐藤 理佳子²

¹フェロー会員 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
E-mail:tominaga.akihiro@nitech.ac.jp

² 愛知県建設部 (〒460-8501 名古屋市中区三の丸3丁目1-2)

停滞した流れ場の水質改善を目的として、流水断面にスリットを設けた横断壁を設置し、流路を狭めて流れを加速する連続スリット壁を考えた。連続スリット壁のパラメータとして、スリット位置、スリット幅、流下方向間隔を変化させ、流れ構造の変化についてPIV実験により検討し、この結果を元に溶存酸素濃度に及ぼす影響について数値計算により検討した。スリット壁の設置により、高速な蛇行流とこれに伴う再循環流量域が形成された。スリット壁間の流速は、開口率の減少とともに増大するが、スリット位置が側壁へ近づくほど増大した。スリット壁を越流する場合は、スリット壁間の平均流速は著しく減少し、流れは3次元的となり、鉛直方向流速は大きくなった。水深平均2次元の数値計算は、非越流のスリット壁間の流れ構造を良好に再現し、溶存酸素に関しては、再循環渦内で溶存酸素濃度が増大し、滞留域が大きいほど全体としての濃度も増大することが示された。

Key Words : flow structure, slit wall, PIV, flow control, 2D-numerical calculation, reaeration

1. 序論

水源が乏しい中小都市河川の河口部や運河においては、流れが停滞しやすく、また塩分による成層化によって鉛直混合が弱くなり、貧酸素水塊が滞留する劣悪な水環境となる場合が多く見られる。そこで、導水や強制的な循環流の創出による水質改善対策が考えられている。名古屋市の中川運河では、閉鎖性水域に汚濁負荷が存在することから、水の停滞による水質悪化を防ぐために、1日に4時間程度で約7万 m³をポンプにより他河川に放流して水の循環を図っている。これは数日かけて運河の水を交換するという観点から水質の維持に寄与しているが、これにより発生する流速はわずかであり、運河の上流端付近では水質の改善が十分でなく、貧酸素水塊が底層に滞留している¹⁾。また、名古屋の堀川・新堀川は感潮河川であるが、水源が乏しく潮汐による流動が支配的である²⁾。この場合も感潮域の上流端では水深変化があるものの流速は小さくなる。新堀川では上流域においても水深が大きい場合、中層から底層に塩水が停滞したままとなっており、ここではほぼ流れがないことが示されている。その結果、鉛直混合がなく底層は貧酸素水塊が常に滞留している³⁾。

そこで、本研究では停滞した河川に流れを創出し、再曝気を助長するとともに鉛直混合を促進するような構造物を設置することを考えた。構造物によって流れを制御する対策は、港湾やダム貯水池といった閉鎖性水域において多く実施されている。秋山⁴⁾は、フェンスによって貯水池内の潜入密度流の流動制御を行い、流入水の混合および下層流の層厚が小さくなるような強制的な潜り込みを促進できるようなフェンスの設置法について研究している。崎谷・山上⁵⁾は、連続水制を伴う開水路における自由水面からのガス輸送速度を測定し、連続水制を伴う開水路において、従来開水路の計測で用いられる方法で代表的な再曝気係数が求まること、その再曝気係数は水制間隔によって変化することが示された。また、流れが停滞するワンドの水交換促進に関する研究が行われている^{6) 7) 8)}。これらは、水制あるいは導流工を用いるもので、誘導された流れが停滞域の水交換や土砂堆積の低減に寄与するものである。

このように水制のような構造物を用いることで流れ構造を変化させ、混合を促進できるが、一般河川では治水上の抵抗となり水位を上昇させてしまう。しかし、運河や掘留付近の停滞流れにおいては、こうした抵抗の増加が大きな障害とならない場合がある。そこで、ここでは治水上の問題が小さい流れ場を対象として、水路を大

大きく遮蔽するような連続スリット壁と呼ぶ障害物の設置を考えた。連続スリット壁とは、流水断面に横断壁を設置し、スリットを設けることで流路を狭めて流れを加速し、また擾乱を与えることで、水質改善につながることを期待するものである。具体的には、水面での再曝気を促進し、溶存酸素濃度を増加させることや、鉛直混合を促進することで密度成層による貧酸素水塊の混合を促すことを期待する。本研究では、連続スリット壁のパラメータとして、スリット位置、スリット幅、流下方向間隔を変化させ、流れ構造にどのような変化が生じるかをPIV実験により検討し、この結果を元に溶存酸素に及ぼす影響について数値計算により検討した。

図-1 スリット壁の配置

表-1 実験条件

	水深 h (cm)	流量 Q (l/s)	断面平均流速 U_m (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	

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。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に示すように、スリット幅 d_x 、河岸から近い方のスリット端までの距離 d_s 、スリット壁の流下方向間隔 d_y をパラメータとして変化させて、流下方向に3基設置した。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。各実験ケースのスリット壁条件を表-2に示す。また、上流側から順に、第1、第2、第3スリット壁とする。表中の U_m はスリット壁がない条件における断面平均流速である。 L_y はスリット間横断距離、 α はスリットの開口率、 β はスリットを結ぶ流れの屈曲率を表しており、次のように定義される。

$$\text{スリット間横断距離: } L_y = B - 2(d_y + d_s/2) \quad (1)$$

$$\text{スリット開口率: } \alpha = d_s/B \quad (2)$$

$$\text{スリット屈曲率: } \beta = L_y/d_x \quad (3)$$

ここに、 B は水路幅である。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 3.7m の位置になるよう調節した。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 3mm のシート状にした 400 mW のグリーンレーザー光を開水路水平断面及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 0.5 cm 間隔で、非越流時は 7 断面 ($z=0.5\sim3.5$ cm)、越流時は 12 断面 ($z=0.5\sim6$ cm) 設定した。鉛直縦断面は 2.5cm 間隔で 11 断面 ($y=2.5\sim27.5$ cm) を計測した。この可視化画像は高速ビデオカメラを用いて 1/200 秒間隔、1断面につき 16秒間で 3200枚の撮影を行った。PIV解析には FlowExpert (カトウ光研) を用い、相互相関法により流速ベクトルを計測した。画像サイズは 640 × 480 ピクセル、相互相関法のテンプレートサイズは 24×24 とし、1画素サイズは 0.625 mm であった。

表-2 実験ケース

Case	d_s (cm)	d_y (cm)	d_x (cm)	L_y (cm)	$\alpha = d_s/B$	$\beta = L_y/d_x$	h (cm)
base-E	5.0	5.0	15.0	15.0	0.167	1.000	3.5
dy0E		0.0		25.0		1.667	
dy2.5E		2.5		20.0		1.333	
dy7.5E		7.5		10.0		0.667	
dy10E		10.0		5.0		0.333	
dy12.5E		12.5		0.0		0.000	
ds7.5E	7.5	5.0	15.0	12.5	0.250	0.833	
ds10E	10.0			10.0	0.333	0.667	
ds12.5E	12.5			7.5	0.417	0.500	
ds15E	15.0			5.0	0.500	0.333	
dx5E	5.0	5.0	5.0	15.0	0.167	3.000	
dx10E			10.0			1.500	
dx20E			20.0			0.750	
dx25E			25.0			0.600	
base-S	5.0	5.0	15.0	15.0	0.167	1.000	6.0
dy0S	5.0	0.0	15.0	25.0	0.167	1.667	
dy10S		10.0		5.0		0.333	
dy12.5S		12.5		0.0		0.000	
ds7.5S	7.5	5.0	15.0	12.5	0.250	0.833	
ds10S	10.0			10.0	0.333	0.667	
ds12.5S	12.5			7.5	0.417	0.500	
ds15S	15.0			5.0	0.500	0.333	
dx5s	5.0	5.0	5.0	15.0	0.167	3.000	
dx25s			25.0			0.600	

3. 実験結果とその考察

(1) 非越流ケースの平面流れ構造

非越流のケースでは、平面的な渦構造は水深方向に大きな変化がないことが確認された。また、流れ構造が周期的に変化するような変動も見られなかった。まず、各パラメータによる影響比較の基本となるスリット壁条件の case baseE の水平断面 $z=1.5$ cm における時間平均流速ベクトルと合成流速コンターを図-2に示す。第1スリット壁に衝突する流れは横断壁により遮られ、スリットに流れが集中し、噴流状に第1・第2スリット壁間に進入する。進入した高速な流れは第2スリット壁に衝突し、壁面に沿う方向に曲げられ、第2スリットからほぼ流下方向と平行に進入する。第2・第3スリット壁間では第1・第2スリット壁間と同様に曲げられた流れが第3スリットから側壁に向かう角度を有しながら流出している。

図-2 baseEの平面流速ベクトル(左)と合成流速コンター(右)

(a) case ds10E (b) case ds15E
図-3 スリット幅 d_s による平面流速ベクトルの変化

(c) case dy10E (d) case dy12.5E
図-4 スリット位置 d_y による平面流速ベクトルの変化

このようにスリットを結んで高速な蛇行流が発生し、この蛇行流と壁に囲まれた領域は滞留域となり、蛇行流に誘起された再循環流が発生している。合成流速コンターより、高速蛇行流は第1スリット下流では約15 cm/s、第2スリット下流では約20 cm/s、第3スリット付近では約25 cm/sと下流に行くにしたがって加速されていることがわかる。連続スリット壁を設置していない状態では平均流速が2.57 cm/sであったことから、10倍近い流れが発生していることになる。一方、再循環流においても壁面近くで10 cm/s程度の流速が発生している。

次に、各パラメータが平面流れ構造に及ぼす影響を検討する。図-3、4および5にスリット幅 d_s 、スリット位置 d_y およびスリット壁間隔 d_x をそれぞれ変化させた時の平面流速ベクトルを示す。スリット幅については、高速な蛇行流と壁面間の再循環流の形成という基本的流れ構造は同様であるが、開口長が長くなるほどスリットへの流

図-5 スリット壁間隔 d_x による平面流速ベクトルの変化

図-6 鉛直流速ベクトル(case baseE)

図-7 鉛直方向流速 W コンター(水深平均 case baseE)

れの集中が弱くなり、蛇行流の最大流速は減少する。スリット位置については、スリット位置が水路中央へ向かうにつれてスリット偏流角が減少し、高速蛇行流の蛇行の度合いが小さくなる。これに伴い壁面間の再循環渦の形状が変化する。水路中央にスリットがあるcase dy12.5では加速流は直進し、両岸に対称な渦が形成される。スリット壁間隔を変えた場合については、間隔が小さい場合、蛇行流の内側の渦が分断され、間隔が大きい場合は第2・第3スリット間の蛇行流が右岸に達して、外側の渦が縮小する。

図-6 に鉛直断面の流速ベクトルを示す。非越流のケースでは平面流れ構造はほぼ2次元であるが、局部的に鉛直流速が発生しており、横断方向軸を持つ渦が見

図-8 開口率とスリット壁間平均流速の関係

図-9 屈曲率とスリット壁間平均流速の関係

図-10 屈曲率とスリット壁間最大流速の関係

られる。図-7 に水深平均した鉛直方向流速のコンターを示す。全体的には鉛直方向流速は小さいが、第3スリット壁の右岸前面で比較的大きな上昇流が発生しているのがわかる。

各パラメータがスリット壁間の平均的な流速および乱れに及ぼす影響について検討する。時間平均の流下方向流速 U 、横断方向流速 V の絶対値および合成流速 U_a のスリット壁間体積平均流速をそれぞれ $\langle U \rangle$ 、 $\langle V \rangle$ 、 $\langle U_a \rangle$ とする。図-8、9 に開口率及び屈曲率に対するスリット間平均流速の関係を、図-10 に屈曲率に対する合成流速の最大流速の関係を示す。値はいずれも断面平均流速 U_m で無次元化している。図-8 を見ると、開口率 α が小さくなるにつれて、横断方向流速 $\langle V \rangle$ 増大するのに対し、主流方向流速 $\langle U \rangle$ はほとんど変化しない。合成流速 $\langle U_a \rangle$ は $\langle V \rangle$ の大きさの変化と同様に開口率の減少に伴い増加する。本実験の範囲では、開口率が最も小さい $d_s = 5 \text{ cm}$ のケースが最も大きな合成流速を得ることができる結果となった。次に、このスリット開口長に対して、屈曲率 β との関係を見る。屈曲率はスリット位置が中央に近づくにつれて減少し、スリット壁間隔が小さくなるほど増大する。図-9 をみると、屈曲率の増加とともに $\langle V \rangle$ は増加するのに対し、 $\langle U \rangle$ は緩やかに減少している。結果として合成流速は、case dy では β の増加とともに増大するが、スリット間隔を変化させた case dx では β の値

図-11 スリット壁上下流の水位差

図-12 乱れ強度コンターの例 (case baseE, $z=3.5 \text{ cm}$)
(左: u' , 右: v')

図-13 スリット壁間表層の平均乱れエネルギー

による変化は小さい。全体として、スリット壁がない場合の 2.5~3.5 倍程度の値を示すといえる。図-10 より、スリット壁により創出される最大流速 $\langle U_{a,max} \rangle$ は開口率が同じであればほぼ同じ値を示し、スリット壁がない場合の 10 倍程度の値となる。開口率を変化させた case ds の結果からは、最大流速は開口率の増加とともにほぼ直線的に減少していることがわかる。

次に、スリット壁設置による抵抗の増加について、図-11 に示すスリット壁群の上下流での水位差 Δh を検討する。まず、case ds を見ると開口率の増加とともに水位差は減少するのは当然の結果である。スリット位置について case dy を見ると、 $d_y = 12.5 \text{ cm}$ で屈曲率が 0 であり、このとき水位差は最小となり、スリット位置が側壁に行くにしたがって屈曲率が増し、水位差は $d_y = 7.5 \text{ cm}$ 、 5.0 cm で最大となり、またさらに側壁に近づくにつれて減少している。スリット壁間隔を変えた case dx では、 $d_x = 10 \text{ cm}$ の時最大となり、さらに間隔が広がるにつれて減少している。これらの結果から、スリットを側岸近くに設ける方が抵抗を小さく押さえて平均流速を大きくできることがわかる。

次に、図-12 に case baseE の $z=3.5 \text{ cm}$ における乱れ強度 u' 、 v' のコンターを示す。乱れ強度の分布特性は、噴流の場合と類似しており、 u' はスリットから進入する高速

な蛇行流の両側で最大値を示すのに対し、 v' はスリットから少し下流の進入流の中央付近でピークを示す。また、再循環流の中央付近では乱れは小さいが、周辺付近では乱れが大きくなっている。平均的な乱れの大きさを見るために、スリット間で平均した表層付近の乱れエネルギー $\langle k \rangle$ を屈曲率 β に対して示したのが図-13 である。乱れエネルギーの計算には鉛直面の PIV 計測により得られた w' も用いている。開口率の変化に着目し *case ds* をみると、開口率の増加とともに乱れは減少している。スリット位置では d_y が 2.5cm と 7.5cm が大きな値を示し、他は同程度である。スリット壁の間隔については、 dx が 15cm 以下では間隔の減少とともに乱れが著しく増大しているが、15cm 以上では同程度の値を示している。このような差異が生じる理由は明確ではないが、平均流速に比べてかなり大きな乱れが生成されていると言える。

(2) スリット壁を越流した場合の流れ構造の変化

水深がスリット壁高さを越えるケースについて、スリット壁間の流れ構造の変化を検討する。各パラメータによる影響比較の基本となるスリット壁条件の *case baseS* の水平断面 $z=1.5\text{cm}$ における時間平均流速ベクトルと合成流速コンターを図-14 に示す。スリット壁高さ 5 cm に対して水深が 6cm とわずか 1cm 越流しただけであるが、スリット壁間の流速は非越流時に比べて著しく減少する。これはスリット壁に遮られた流れが、スリットよりも越流部を多く流れるからである。スリット面積は $5 \times 5 = 25\text{cm}^2$ であるのに対し、越流部は $1 \times 30 = 30\text{cm}^2$ であり大きな違いはないが、水面近傍は高速となるためである。

図-15 に代表的 y の位置における *case baseS* の鉛直断面流速ベクトルを、図-16 に主流速 U のコンターを示す。第 1 スリット中央の $y = 22.5\text{cm}$ では、流れはほぼ直進し、第 2 スリット壁前面に近づくにつれて減速し、壁直前で下降流が生じている。第 2 スリット壁下流では弱い上昇流が見られる。水路中央の $y = 15\text{cm}$ では、第 1 スリット壁下流ではく離渦と見られる時計回りの横断渦が発生し、これより下流では全体に下降流が支配的である。第 2 スリット壁下流でもほぼ同様の流れ構造を示している。第 3 スリットの位置にあたる $y = 7.5\text{cm}$ では、第 1 スリット壁背後に明らかなく離渦が発生しており、再付着点下流では下降流となって第 2 スリットを通過している。また第 3 スリット壁前面ではこれを乗り越える上昇流が発生している。主流速 U の鉛直断面コンターからは、スリット壁上部では 8cm/s 以上の流速があるが、下部ではスリット周辺以外では流速は非常に小さい。

図-17 に水面近傍の平面における主流速 U のコンターを、図-18 に水深平均した鉛直方向流速 W のコンターを示す。連続スリット壁の直上から下流ではスリット壁により加速された流れの発生が見られるが、全体に流れは一樣でなく 3 次元的な流れの影響を受けている。上昇流の発生している第 2 スリット壁右岸付近と第 3 スリット壁の左右岸付近では主流速が減速されていることがわか

図-14 *baseS* の平面流速ベクトル(左)と合成流速コンター(右)

図-15 *baseS* の鉛直断面流速ベクトル

図-16 *baseS* の主流速 U コンター

図-17 水面近傍の U コンター (case *baseS* $y=6\text{cm}$)

図-18 鉛直方向流速 W コンター (case *baseS* 水深平均)

る。第 2 スリット壁の中央部下流側に上昇流があるが、ここでは主流速の減速は見られない。スリットから進入して下流へ抜ける蛇行流は下降流を伴っており、特に第

2 スリット下流では大きな下降流となっている。

このように、スリット壁を越流する場合の流れ構造は3次元的で複雑なものとなる。スリット壁下部における流れは非越流の場合に比べて著しく減少するが、鉛直方向流速が増大し、流れの攪乱については大きな影響を及ぼすものと考えられる。

4. 数値計算によるスリット壁の効果の検討

(1) 数値計算による流れ構造の比較

創出した流れの水質改善に対する有効性を検討するために、溶存酸素 (DO) の移流拡散に関する数値計算を試みた。本来なら実験で確認すべきであるが、ここでは流れ構造の解明に重点を置き、その流れ構造の影響を数値的に検討するにとどめた。また、越流のケースについては流れが複雑となり3次元計算を必要とするが、大きな流速変化が見られた非越流のケースのみを対象とした。数値計算の基礎方程式は、以下に示す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。

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} C + \frac{\partial}{\partial x} (UC) + \frac{\partial}{\partial y} (VC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + r_g - r_d \quad (7)$$

ここに、 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り、渦動粘性モデルを用いた。乱流モデルには水深平均 $k-\varepsilon$ モデルを使用した。式(7)において、 r_g は再曝気による生成項、 r_d は底泥による酸素消費項であり、以下の式で定義する。

$$r_g = k_2 (C_s - C) \quad (8)$$

$$r_d = k_b C \quad (9)$$

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。底泥の酸素消費係数 k_b は武田らの研究¹²⁾における値を採用して、 $k_b = 0.25$ (mg/m²/day) とし、単位を変換して用いた。再曝気係数 k_2 については、既往の研究から様々な予測式が提案されているが⁹⁾、本研究ではスリット壁設置による平均流速の変化にのみ着目し、これを取り入れることのできる Langbein and Durum による評価式¹⁰⁾を用いた。

$$k_2 = 2.23 \left(\frac{1}{A} \int |U_a| dx dy \right) H^{-1.33} \quad (10)$$

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) である。実験値から式(10)で評価した再曝気係数のス

図-19 数値計算結果と実験結果の比較(case baseE)

図-20 数値計算と実験の比較 (case baseE)
(左: 水深, 右: 主流速横断分布)

図-21 溶存酸素の移流拡散計算の境界条件

リット壁間での平均値は表層の流速を用いるものの、図-8、図-9に示した体積平均の合成流速と同じ傾向を示す。細川らの研究¹¹⁾における酸素溶解実験から、再曝気係数は $0.05 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4$ (1/s) と得られており、これらを本研究で算出した再曝気係数の単位 (1/day) に換算して考えると、式(10)で算出した再曝気係数は妥当な値であると考えられる。計算においては、式(10)の単位を (1/s) に変換して与えた。数値計算の解析範囲は 7.7m 区間で、スリット壁を上流から 3.7m の位置に設定した。境界条件は上流端で流量を与え、下流端で水深を固定した。

まず、流れ構造の再現性について検討した。格子サイズは x, y 方向ともスリット壁領域で 5mm 間隔とし、時間刻みは 0.01s とした。図-19 は case baseE の主流速および横断流速の水深平均値について数値計算結果と PIV 計測値を比較したものである。主流速、横断流速ともに、数値計算結果は実験値を非常に良く再現しているといえる。図-20 にスリット壁による水位上昇と主流速の横断分布の比較を示す。スリット位置の違いによる水位上昇の差は良好に再現されている。主流速の横断分布を重ね

図-22 スリット壁間の溶存酸素 (DO) コンター

ると若干のずれが認められ、特に左岸側の逆流が過大評価となっている。しかし、全体としての一致度は高く、その他のケースについても再現性は良好であったことから、このスリット壁を有する流れは2次元数値計算による検討の妥当性が高いと考えられる。

そこで、溶存酸素について図-21 に示すように上流端から $x = 3.7\text{m}$ までの領域において DO 濃度 0 の水が流入するよう境界条件を設定して計算を行った。図-22 に代表的ケースの 200 秒後のスリット壁間の溶存酸素 (DO) コンターを示す。スリット壁間領域では高速蛇行流に沿っては DO 濃度が低いままで輸送されているが、再循環渦が形成される滞留域において DO が大きくなっており、渦の中心ほど濃度が高い。また、第 2・第 3 スリット壁間の方が DO 濃度が高く、case baseE, dy0E, dx25E の順に大きくなっている。このことから、滞留域の面積が大きいほど DO を多く捕捉できると考えられる。

図-23(a) に示す 10 地点を選び、各地点における DO の時間変化を調べた。地点 8 において最も差が現れ、下流への影響も大きいと考えられることから、ここでの DO の時間変化を比較した。地点 8 における DO 濃度は時刻 0 から急激に増加し、100s から 200s でほぼ一定値に達する。一定値に達する速さはスリット位置が水路中央に近いほど、またスリット壁間距離が短いほど速い。図 23(b) から、スリット位置が水路中央に行くほど DO 濃度は減少しており、 $d_s = 12.5\text{cm}$ では一端ピークになった後減少し、周期的な変動を示しているが、数値的な振動の可能性もある。図 23(c) から、スリット壁間距離が大きくなるにつれて DO 濃度は大きく増加している。

図-24 に数値計算から得られた断面平均溶存酸素濃度を示す。スリット壁が設置されていない場合は、同じ領域の平均値は 0.093mg/L であったことから、すべてのケースにおいてこれを上回っており、連続スリット壁の有効性が示された。スリット位置 d_s を変化したケースでは、平均合成流速の分布と同じ傾向を示し、dy0E ($\beta = 1.67$)、dy10E ($\beta = 0.33$) が比較的大きな値を示す。スリ

図-23 地点 8 における DO 濃度の時間変化

図-24 断面平均 DO 濃度

ット幅 d_s を変化したケースについては、スリット幅が大きくなるほど減少した平均合成流速の傾向とは異なり、ケース間で大きな差が見られなかった。スリット幅が大きくなると、DO 濃度が低い高速流域が広くなり側岸の滞留域が減少するが、第 1 第 2 スリット壁間の滞留域の濃度が増大したことから、全体として大きな減少とはなかった。一方、スリット壁間隔が小さいケース (β が大きいケース) では DO 濃度が低くなり、これが増加するにつれて (β が減少するにつれて)、DO 濃度は増加している。これを単純に間隔 d_s に対して整理すると、 d_s の増加とともにほぼ直線的に増加していることになる。再曝気係数の増加に対しては、合成主流速の増加がそのまま影響するが、 d_s の増加に伴い合成主流速はむしろ減少していた。DO は d_s の増加にしたがって大きくなっており、DO の捕捉には滞留域の面積が大きく関係していると言える。このことから、縮流による加速とこれによる滞留域が形成されれば、スリット壁間隔は広いほど DO の上昇効果は大きくなることが予想される。

5. 結論

停滞した流れ場の水質改善を目的として、スリットを有する横断壁を流水断面に設置し、流れの加速と擾乱を与えることを考え、パラメータとしてスリット位置、スリット幅、流下方向間隔の影響を検討した。また、非越流のケースについて数値シミュレーションを行い、溶存酸素濃度の増加特性について検討した。以下に得られた主な知見を示す。

- (1) スリット壁間の平均合成流速は、実験の範囲では開口率の減少とともに増大する。この最も小さい開口率についてスリット位置が側壁へ近づくほど増大し、スリット壁がない場合の 2.5~3.5 倍程度に達する。最大流速は開口率が同じであればほぼ同じ値を示し、スリット壁がない場合の 10 倍程度の値となる。
- (2) スリット壁を越流する流れ条件では、スリット壁上を流下する流れが卓越し、スリット壁間の平均流速は著しく減少する。流れは 3 次元的となり、鉛直方向流速は大きくなる。
- (3) 水深平均 2 次元の数値計算により、非越流のスリット壁間の流れ構造は良好に再現された。
- (4) 再曝気係数を水面での平均合成流速に比例すると仮定した数値シミュレーションにより、スリット壁間の領域では、再循環渦が形成される滞留域内で溶存酸素濃度が増大し、滞留域が大きいほど全体としての濃度も増大する。

これらの結果より、スリット壁は治水面での抵抗増加を考慮する必要のない停滞した流れ場の水質改善に有効な手段となり得ることが示唆された。ただし、今後は水質に関する実験を行うことが望まれる。

謝辞：本研究は日本学術振興会の科学研究費「基盤研究(C)」(16K06508)の助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 森下真那人, 宇野裕奎, 富永晃宏：中川運河における水質の季節変化に関する研究, 第71回土木学会年次学術講演会, 2016.
- 2) 富永晃宏, 庄建治朗, 川上哲生, 尾崎勝：都市河川感潮域における塩水遡上と鉛直混合特性の現地観測, 水工学論文集, vol.49, 1393-1398, 2005.
- 3) 宇野裕奎, 富永晃宏：新堀川における潮汐流動及び水質特性に関する研究, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015.
- 4) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 安藤祐馬, 小野修平, 小川真由子：フェンスによる貯水池潜密度流の流動制御, 水工学論文集, vol.50, 1285-1290, 2006.
- 5) 崎谷健太, 山上路生：連続水制を伴う開水路乱流における自由水面のガス輸送に関する基礎的研究, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_889-I_894, 2013.
- 6) 富永晃宏, 小島直也, 市川亜也佳：開水路側岸凹部の流れ構造に及ぼす対岸水制の影響, 土木学会論文集A2(応用力学), vol.69, No.2, I_519-I_528, 2013.
- 7) 富永晃宏, 庄建治朗, 加藤智道, 小島直也：水制による河岸凹部の流れ構造の制御に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), vol.71, No.4, I_649-I_654, 2015.
- 8) 富永晃宏, 加藤智道, 庄建治朗：導流工を用いた河岸凹部の土砂堆積制御, 土木学会論文集B1(水工学), vol.73, No.4, I_691-I_696, 2017.
- 9) 山上路夫, 岡本隆明：水面流速発散理論に基づく開水路乱流におけるガス輸送現象に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.3, 72-87, 2015.
- 10) Langbein, W. B. and Durum, W. H.: The Aeration Capacity of Streams, Geological Survey Circular 542, 1967.
- 11) 細川恭史, 関根好幸, 古川恵太, 堀江毅：攪拌槽での水表面からの酸素溶解実験, 港湾技研資料 No.657, 1989.
- 12) 武田誠, 日置梓, 遠山智, 松尾直規：冬季における堀川の水質変化に関する現地観測と数値解析, 環境工学研究論文集, vol.43, pp.483-491, 2006.

(2017. 6. 23 受付)

FLOW STRUCTURES GENERATED BY CONSECUTIVE SLIT WALLS IN STAGNANT STREAM

Akihiro TOMINAGA and Rikako SATO

In order to improve water quality in stagnant stream, we invented consecutive slit walls. As to the parameter of slit wall, slit width, slit location and streamwise interval of walls were changed. The flow structures in a slit-wall region were measured by using PIV method and the effects of flow structures on the concentration of dissolved oxygen was investigated numerically. By setting the slit walls, fast meandering flow and accompanying recirculating vortices were generated. The average velocity in the slit-wall region increases with a decrease of the slit width and as the slit location approaches to the side wall. When the slit walls are submerged, the average velocity in the slit-wall region becomes significantly small, the flow structure becomes three-dimensional and the vertical velocity increases. The depth-averaged 2d numerical model can reproduce the flow structures in the slit-wall region. It is demonstrated that the dissolved oxygen increases in the center region of recirculating vortices and the total concentration increases as the recirculating area becomes larger.