人工的小水路が人工湿地の 物質輸送に及ぼす影響

EFFECTS OF ARTIFICIAL SHORT CIRCUITING PATH ON POLLUTANT TRANSPORT IN CONSTRUCTED WETLAND

高爽¹・石川忠晴²・張怡³

Shuang GAO, Tadaharu ISHIKAWA and Yi ZHANG

¹学生会員 修(工) 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

³非会員 学(理) 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

This paper discusses the SS transport by horizontal large eddies (HLE) from a narrow channel to surrounding vegetation areas in a constructed wetland. A series of flume experiments were carried out for several conditions of width/depth ratio and Reynolds number, referring to the ranges of the parameters reported in an actual constructed wetland. The unsteady velocity field was measured in detail by PIV technique. Numerical simulations were conducted under the same conditions as the experiments, and computation results agreed with observation results very well. The study clarified the dependency of HLE scale and intensity on the above mentioned two parameters. Numerical tracer experiments were conducted to investigate the basic characteristics of SS transport by HLE. The results show that the range of SS intrusion to vegetation areas is comparable with channel width. This fact suggests that a system of channels should be designed to distribute SS in a wide area of vegetation in a constructed wetland.

Key Words : *constructed wetland, artificial short circuit, image correlation analysis, numerical simulation, horizontal large eddies, suspended solid*

1. はじめに

水質浄化のために設置される湿地をここでは人工湿地とよぶ。人工湿地は都市下水の二次処理¹⁾、都市域や農地などの面源からの排水の浄化²⁾、また近年は湖沼や河川水を導水して浄化する等³⁾、用途は様々である。しかし共通する機能として、懸濁物質の沈殿が期待されている。実際、有機物、栄養塩類および重金属などの除去対象物質の大半が懸濁態であることから^{2,4)}、懸濁物質の効率的沈殿が湿地設計のポイントとなっている²⁾。

懸濁物質の沈殿は滞留時間(τ)が長いほど促進され、流入水の全ての τ が平均滞留時間(τ_0 =湿地体積/流量)に等しい場合、懸濁物質は最も効率的に除去される。しかし実際には、地形の微妙な不整や湿地の植生の自然的粗密により不規則な水脈が形成され、次第に増幅され固定化されていく¹⁾。この現象はshort circuitと呼ばれている。現地で観測された例では、当初は均質に設計および建設された人工湿地でも、全面積の1.6~8%がshort circuitに発展し、その結果として20~70%の汚水が τ_0 の1/8~1/12の時間で流出する結果となっている¹⁾。

以上のようにshort circuit形成により浄化効率は低下するが、その程度は不確定である。そこで人工的に安定したshort circuitを設置し、その影響を設計当初からカウントすることが考えられる^{5,6)}。前報⁶⁾では数値計算により明確なshort circuiting path (以下、水路という)を湿地に設置する方法の可能性を提示した。そのような湿地では植生と水路の境界で流速が急変し、せん断不安定により水平渦が発生し、懸濁物質の横断輸送が促進される。池田ら^{7,8)}は、高水敷に植生を有する複断面河道を対象に水路実験と数値解析を行い、低水路河岸で発生する水平渦が横断方向の物質輸送を強めることを示している。

そこで本研究では、人工湿地に意図的に水路を設けた場合の水平渦による物質輸送機構を基礎的に調べるための水路実験を行った。実験のReynolds数(Re)は人工湿地で想定されるオーダーとした。流速場および物質移動特性は、水面トレーサーの運動の画像解析から求めた。続いて、水理実験と同じ条件で数値シミュレーションを行い、平均流速場および水平渦の強度とスケールを求めるとともに、トレーサー運動のラグランジュの数値実験を行い、実験結果と比較した。最後に、植生域への懸濁物質の分散を数値実験により検討した。

表-1 実験の水力条件

Run	A-1**	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3
Q (l/min)	55.92	41.38	26.86	57.96	41.38	26.51	53.55	38.93	28.63
h (cm)	3.7	3.8	3.7	2.7	2.6	2.8	3.7	3.7	3.8
b (cm)	20			20			12		
b/h	5.4	5.3	5.4	7.4	7.7	7.4	3.2	3.2	3.2
水路の最大 u_s (cm/s)	7.9	5.3	3.8	11.3	7.9	5.4	7.0	4.8	3.3
植生域の u_s (cm/s)	2.0	1.1	1.0	3.3	2.1	1.1	2.8	1.9	1.2
水路のレイノルズ数*	2403	1665	1064	2412	1636	1103	2155	1485	1045
植生域のレイノルズ数*	751	429	367	884	556	295	1049	702	463
水路のフルード数*	0.42	0.34	0.28	0.58	0.5	0.39	0.4	0.33	0.27

*表面流速と水深より計算している；**トレーサー実験を行ったケース。

2. 実験の概要

(1) 実験装置と条件

水路実験は長さ 10m の循環式可変勾配水路を用いて行われた。水路底面に耐水ベニヤ板を敷き、下流端より 6.6m の区間にわたり、図-1 に示すように中央の水路の両側に直径 $d=2.75\text{mm}$ の鉄くぎを間隔(l)2cm で千鳥状に配置した。また、画像解析のため、水路の底はスプレーで黒く着色した。なお実験流速が小さく水面勾配がほとんどゼロであったので、水路勾配は全てゼロとしている。

実験条件を表-1 に示す。Lightbody ら¹⁾の Messerly 湿地では流速と水深からなる平均の Re は 500 程度であり、short circuit 内の Re は約 1000 から 20000 であった。また short circuit の幅・水深比(b/h)は概ね 2~6.7 だった。池田ら⁸⁾によれば b/h は兩岸の水平渦の干渉に影響する。そこで Re と b/h の範囲を考え実験条件を設定した。Run-A を基準にすると、Run-B は水深が小さく、Run-C は水路幅が小さい。またそれぞれで流量を約 2 倍の範囲で変化させている。

(2) 流速の計測方法

オガクズをトレーサーとして画像解析により表面流速を計測した。撮影区間は植生設置区間の上流から 5.7~6.4m である。撮影にはデジタルカメラ(Canon IXY 25 IS : 640×480 画素/30Hz)を用い、1/30sec 間隔で 3 分間撮影した。一定の時間間隔の連続する 2 枚の画像から画像相関法により表面流速を求め、3 分間の流速場の時系列データを作成した。なお画像解析手法は箕浦ら⁹⁾と小林ら¹⁰⁾に基づいている。

3. 数値解析の概要

(1) 流れのモデル

吉田ら¹¹⁾の準三次元モデルを用い、実験における流れの再現を試みた。このモデルは実河道における低水路河岸渦のスケールと強度を再現できることが示されているが¹²⁾、本実験のような緩慢な流れでの適用性は未知

である。手法の詳細は文献¹¹⁾を参照されたい。

模擬植生の効果を同モデルに組み込むために植生抵抗を次式で算定した。

$$\begin{cases} \tau_{vegs} = 0.5C_D N d h u_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2} \\ \tau_{vegn} = 0.5C_D N d h v_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 u_0 、 v_0 は水深平均流速、 C_D は抵抗係数、 N は植生密度で、本実験では $N=0.5/l^2=1250\text{本/m}^2$ である。なお C_D については、円柱の効力に関する実験結果で対応する Re の値より 2.0 とした¹³⁾。

また、円柱が偏差流に与える影響は、吉田ら¹¹⁾の定式化に従い、偏差流速の鉛直分布を重み関数として鉛直積分し、偏差流方程式に付加している。

$$\begin{cases} \tau_{vegs}^* = -0.5\gamma C_D N d h \int_0^h f(z) u(z) \sqrt{u(z)^2 + v(z)^2} dz \\ \tau_{vegn}^* = -0.5\gamma C_D N d h \int_0^h f(z) v(z) \sqrt{u(z)^2 + v(z)^2} dz \end{cases} \quad (2)$$

ここで $u(z)$ 、 $v(z)$ は水深 z での流速、 γ はモデルのモード係数で 12.0 である。

まず、表-1 に示す水路実験の条件に合わせて、流れ場の計算を行った。計算領域は y 方向に 0.8m とし、 x 方向は渦が十分に発達するように、14m とした。計算格子幅は $\Delta x=0.04\text{m}$ 、 $\Delta y=0.02\text{m}$ とし、計算ステップは 0.1s とした。上流端より Q を与え、下流端は h での自由流出条件とした。また、水路の Manning 係数は 0.015 とした。10 分間の助走計算で渦が十分に安定したことを確認し、その後の計算結果を、渦が十分発達した領域において実験結果と比較した。

(2) トレーサー追跡のモデル

表層粒子(オガクズ)の運動は、上述の水力計算から求めた表面流速を用いて以下のように追跡した。上述の水力計算において設定した格子系において、粒子の現在位置を取り囲む 4 点を抽出し、距離の逆数を重みとした重み付き平均により粒子位置の流速と水深を算定する。

$$U = \sum U_i w_i, V = \sum V_i w_i, h = \sum h_i w_i, w_i = l_i / \sum l_i \quad (3)$$

ここに U 、 V は流速、 h は水深、 w_i は周囲各点の値の重み、 l_i は粒子位置と周囲各点の距離である。

図-1 水路の平面図、断面図及び記法の定義

図-2 瞬間表面流速場（点線：植生域の境界）

上述の U, V は、時間平均流速と水平渦により誘起された流速を含む。この他に、実際の流れでは水平渦より小規模の乱れによる拡散が生じる。この拡散効果を本研究では以下のように Random Walk モデル(一次 Markov モデル)により評価した。

Random Walk の parameter と拡散係数の間には一般に以下の関係がある。

$$\varepsilon_k = 0.5 \overline{u' u'} \Delta t \quad (4)$$

ここに、 ε_k は拡散係数、 Δt は時間刻み、 $\overline{u' u'}$ はランダム流速の分散である。一方、拡散係数は前述の準三次元モデル¹¹⁾の渦動粘性係数から次のように書かれる。

$$\varepsilon_k = \beta \varepsilon = \alpha \beta \frac{\kappa}{6} h U^* \quad (5)$$

ここで、 $\kappa=0.41$ はカルマン定数、 β は乱流 Schmidt 数 (Sc_t) の逆数である。種々の乱流数値計算をまとめた結果¹⁴⁾では、 Sc_t が流れの状況により 0.2~1.3 の範囲に分布するが、多くの場合に 0.7~0.9 が使われている。このことから、本研究では $\beta=1.2$ ($\approx 1/0.83$) とした。 α は係数で、同モデルを用いた既往の研究^{11),12)}の計算結果より 2.0 としている。また U^* は摩擦速度で、各格子点において式(3)で得られる流速および水深を用い Manning 式から逆算した。なお模擬植生として用いた鉄くぎの背後では小さな後流域が存在していたが、計算で考慮することは難しいので、ここでは式(5)を全領域に適用した。

以上から求められる標準偏差 ($\sqrt{u' u'}$) を持つ正規分布に従い乱数を発生させ、拡散に伴う移動速度 (u', v') を発生させた。

4. 実験結果と計算結果の比較および考察

(1) 全体的流況

図-2 に Run-A-1 の画像解析と、数値計算から求めた表面流速の瞬間分布を示す。図-2-a の青矢印が瞬間流速ベクトルの実験値、背景写真は 1/3sec の連続した写真を重ねたもので、その間のオガクズの軌跡を示している。軌跡は画像解析より求めた流速ベクトルとほぼ完全

に一致しており、計測方法が十分正確であることがわかる。図-2-b は、渦の位置が図-2-a とほぼ同じ位置になったときの計算結果を示している。滞筋で y 方向流速が若干小さいものの、渦長や渦の植生域への侵入幅等はいくらか再現されている。他のケースにおいても計算結果と実験結果はよく一致していた。

図-3 は Run-A-1, Run-B-1, Run-C-1 の平均表面流速(上段)と横断方向の変動流速(下段)の横断分布について実験結果と計算結果を比較したものである。いずれも 3 分間のデータの平均値として求めている。Run-B-1 の左側植生境界と Run-C-1 の右側植生境界で表面流速の実験結果が小さくなっているが、これは比較的大きなオガクズが植生境界付近の釘に付着するために、画像解析で実際より小さく評価されたものである。また横断方向変動流速は水路中心で最大となっているが、これは図-2 に示したように水平渦によって水路中央で流向が大きく変動するためである。 b/h の大きな複断面河道の水平渦では低水路河岸で変動流速が最大となるが¹²⁾、本研究が対象とする流れは b/h が小さいために両側の渦が干渉し水路中央部の変動が大きくなる。

(2) 水平渦による横断方向流速の特性

図-4 に Run-B-1, Run-B-2, Run-C-1 と Run-C-2 の植生域境界での y 方向の表面流速について実験結果と計算結果を比較する。いずれの場合も計算波形と実験波形の周期および振幅は概ね一致している。しかし実験においては変動の不規則性が大きいように見える。例えば Run-B-2 の $t=5s$ 付近や 50s 付近では渦が合体ないしは分裂しつつあるように見える。しかし撮影範囲が狭いために、合体等は具体的に確認できていない。

図-5 に撮影時間(3 分間)に観測範囲を通過した渦の波長 λ を計測し、 Re との関係プロットした。赤点が平均値を、縦のバーが標準偏差を表している。水路幅ごとに λ の平均値は Re によらず一定しており、水路幅の小さな Run-C のみが小さな値となっている。これより渦の波長は水路幅に規定されていることが推測される。一方、標準偏差は Re が小さいほど大きくなる傾向が見ら

図-3 時間平均表面流速と変動流速 (*点線：数値計算の水深平均流速)

図-4 植生境界における \$y\$ 方向表面流速の周期的変動

れる。実際、図-4 にみられた不規則な波形は Re の小さな場合に顕著であった。

図-6 は、植生域境界における横断方向変動流速の強度($\sqrt{v'_s v'_s}$)と、水路部の最大表面流速と植生部の表面流速の差(Δu_s)の相関関係を示している。図中の赤点は実験結果を、青点は計算結果を示している。Run-A、Run-B と Run-C のそれぞれで両者はほぼ比例関係にあり、また数値計算と実験結果はほぼ一致していることがわかる。

図-5 および図-6 の結果に基づき、横断方向変動流速の強度を Δu_s で無次元化し、渦長 λ を水路幅 b で無次元化して、 b/h をパラメータとして図-7 に示す。それぞれがほぼ一価の関係にあることがわかる。したがって、次式が成立する。

$$\lambda \sim b \times f_1(b/h) \quad (6)$$

$$\sqrt{v'_s v'_s} \sim \Delta u \times f_2(b/h) \quad (7)$$

ここに $f_1(b/h)$ と $f_2(b/h)$ は b/h の一価関数である。

5. 水平渦による植生域への拡散

前節の水理的検討から、水路と植生域の境界に発生する渦を本数値計算でよく表現できることがわかった。そこで本節では、トレーサー運動について数値実験を行い、トレーサーの植生域への広がりについて考察する。

(1) トレーサーの流跡線の再現

まず始めにトレーサー追跡モデルの妥当性を検討するために、実験水路にトレーサーを流し、その分散状況と数値実験結果とを比較した。Run-A-1 において植生境界に投入したオガクズの運動を 4s ごとに図-8 の右に示す。

粒子がまず植生域に流入し、その後水路部の粒子に追い抜かれ、渦を巻きながら下流に移流する様子がわかる。図-8 の左は 3 (2) に述べた手法で実施したトレーサーの運動のシミュレーション結果である。実験結

図-5 渦の波長と Re

図-6 変動流速の強度と流速差

図-7 無次元化した変動流速強度、渦長と b/h

果と非常に似た分布パターンが求められている。以上より、本モデルによって水路から植生域への物質輸送を十分検討できるものと考えられる。

(2) 植生域への拡散に関する数値実験

表-2に示す水理条件における流れを数値シミュレーションし、10000個のトレーサーを中央水路部分の横断方向にランダムに与えて流し、植生域への広がりや3分間追跡した。各ケースは流量を共通にし、 b と h を変化させている。なお水路部をそのまま流下するトレーサーは短時間で下流端に到達するが、その場合は上流端の同じ y 座標の位置に流入させた。

図-9-aにCase-1におけるトレーサー分布の時間発展を、図-9-bに横断方向の粒子の存在確率密度(P)を示す。トレーサーが水路から植生域に広がりながら移動していくが、渦の範囲を越えて植生域の奥まで分散することはない。また渦の中心部ではトレーサー密度が小さくなり、 P は植生境界付近で極小を示す。この原因を調べるために、移動する渦に相対的な流速ベクトルと水面での発散($\partial U / \partial x + \partial V / \partial y$)を計算した。その結果を $t=180s$ について図-9-cに示す(図-9-aの赤点線の領域に対応)。渦のコア部分では発散が生じ、流れが植生境界を横切る位置で

図-8 渦によるトレーサーの輸送

表-2 トレーサー実験の水理条件と結果

Case	Q l/min	b/h cm/cm	θ	L_{90} cm
1	60	20/3.7	70.4%	15.1
2		20/2.7	75.8%	15.3
3		12/3.7	80.5%	15.2

収束が生じている。その結果、渦のコア部分のトレーサー濃度が減少していくと考えられる。

図-10は植生域に侵入したトレーサーの割合(θ %)を示している。 b/h の小さなCase-3では計算初期に多量に侵入している。これは図-7に示したように渦の相対的大きさと強度が他のCaseより大きいためであると思われる。図-11には、90%のトレーサーが植生域に侵入した距離(L_{90})の時間変化を示した。一定時間($t_s \approx 60s$)経過後はほぼ直線的に増大している。

以上の数値実験結果から、水平渦は懸濁物質を植生域に輸送するものの、その範囲は水路部水深の数倍程度にとどまるものと推測される。なお植生部に侵入した懸濁物質は実際には沈降を始めるので、植生域に運ばれる割合は中立トレーサーより大きくなるものと考えられる。しかしトレーサーの分散範囲が比較的狭いことは、直線水路での水平渦による懸濁物質輸送の限界を示唆しており、広く植生域を活用するには水路の分岐や蛇行が必要であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、水路(short circuiting path)を人工湿地に意図的に設置した場合の物質輸送特性について基礎的に検討した。主要な結論を以下にまとめる。

図-9 トレーサーの拡散の様子と横断方向の分布

- (1) 水路と植生域値の境界で水平渦が発生し、横断方向の混合が増幅された。
- (2) 水平渦のスケールは水路幅に規定されている。また横断方向の変動流速は水路部と植生域への流速差に規定されている。
- (3) 植生抵抗を考慮した準三次元モデルは湿地の流れ場と水平渦による物質輸送機構を高精度で再現できる可能性がある。
- (4) トレーサー実験の結果、水平渦による、SS の植生域への分散範囲は比較的小さく、懸濁物質を植生域の広い範囲に輸送するには水路の分岐や蛇行が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Lightbody, A.F., Avenier, M.E. and Nepf, H.M.: Observations of short-circuiting flow paths within a free-surface wetland in Augusta, Georgia, U.S.A., *Limnol. Oceanogr.*, Vol.53(3), pp. 1040-1053, 2008.
- 2) Li, Y., Deletica, A., Fletcher, T.D.: Modeling wet weather sediment removal by storm water constructed wetlands : Insights from a laboratory study, *J. Hydrol.*, Vol. 338, Issues 3-4, pp.285-296, 2007.
- 3) Nakamura, K., Chiba, T., Sato, K., Morita, Y., Hosomi, M., Tanaka, S.: A survey of constructed wetland in Japan, 8th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 2002.
- 4) 李先寧, 稲石高雄, 中里広幸, 野村宗弘, 西村修, 稲森悠平, 須藤隆一: 水耕生物ろ過法における水面積負荷及び収穫の

図-10 植生域のトレーサーの割合の時間変化

図-11 植生域への侵入幅の時間変化

浄化機能に及ぼす影響と隔離水界を用いた浄化効果の評価, 日本水処理生物学会誌, No.41/II, pp.61-71, 2005.

- 5) Lightbody, A.F., Nepf, H.M. and Bays J.S.: Mixing in deep zones within constructed treated wetlands, *Ecol. Eng.*, Vol.29, pp.209-220, 2007.
- 6) 石川忠晴, 高爽: 水質浄化のための人工湿地の水理設計に関する基礎的検討, 水工学論文集, No.55, pp.1495-1500, 2011.
- 7) 池田駿介, 佐野貴之, 福元正武, 河村一弘: 複断面開水路に生じる大規模組織渦と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.135-144, 2000.
- 8) 池田駿介, 空閑健, 陳飛勇: 両岸に植生帯を有する開水路流れに発生する大規模水平渦の安定性と運動量輸送, 土木学会論文集, No.551/II-37, pp.63-73, 1996.
- 9) 箕浦靖久, 石川忠晴, 吉田圭介: 実体視と画像相関法を併用した洪水航空写真解析手法の構築と検証, 水工学論文集, 第53巻, pp.997-1002, 2009.
- 10) 小林敏雄, 岡本孝司, 佐賀徹雄: Particle Image Velocimetry の展開, 可視化情報, Vol.20, No.77, pp.1-6, 2000.
- 11) 吉田圭介, 石川忠晴: 円筒座標 CIP-Soroban 法と境界適合座標法を組み合わせた蛇行河川の準 3 次元計算法, 水工学論文集, No.52, pp.997-1002, 2008.
- 12) 石川忠晴, 箕浦靖久: 洪水航空写真に捉えられた低水路河岸渦の特性に関する比較研究, 水工学論文集, No.55, pp.1093-1098, 2011.
- 13) Schlichting, H.: Boundary-Layer Theory, New York: McGraw-Hill, pp5-23, 1955.
- 14) Tomigawa, Y. and Stathopoulos T.: Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield, *Atmos. Environ.*, Vol.41, pp8091-8099, 2007.

(2011. 9. 30 受付)