側岸死水域内流れ構造及び質量交換への 路床勾配変化が与える影響の評価

EFFECTS OF SLOPE-CHANGED BED IN A GROUYNE FIELD ON
ITS FLOW STRUCTURES AND MASS-EXCHANGEING

鈴木壮平¹・山上路生²・瀬津家久³

Sohei SUZUKI, Michio SANJO, Iehisa NEZU

¹ 学生員 京都大学大学院生 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

² 正会員 博 (工) 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³ フェロー 工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

PIV and LIF techniques were conducted to reveal relationship between sedimentation and mass exchange property in a groyne field. It was found from the PIV measurements that different bed-form conditions, that is to say, with and without bed slope, yielded corresponding gyre formations. The other experiment, the LIF results allowed us reasonably to evaluate transfer velocity of dye through boundary between mainstream and dead water zone. They suggest that mass exchange properties have significant relations with horizontal gyres, thereby, with the conditions of bed slope. The results normalized by turbulence intensity and length scale of gyre were in good agreement with a large-eddy model.

Keywords : groyne flow fields, flow visualization, bed slope, mass exchange, transfer velocity

1. はじめに

河川側岸に止水域を有する流れ場は一般にワンドと呼ばれる。既往のワンドに関する研究はせん断渦や循環流などの流体物理に関するものから土砂堆積輸送、水質交換など多岐にわたっている。鍛冶ら¹⁾は淀川の復元閉口式ワンドにおける出水時の河床変化の実地調査を行い、洪水時のかぶり流れによる河床地形変化や粒度特性に関する詳細なデータに加え、平面流速の計測から土砂堆積のメカニズムについての検討を行っている。木村ら²⁾は木曽川の実地研究の中で、ワンド内環境の多様性に触れている。上下端のワンド環境との兼ね合いによって、ワンド内植生の有無・土砂堆積の特徴が変化するため、実河川のワンドは様々な形状となるとしている。このような実地研究から、ワンド研究は従来の水深平均手法を用いることができる平坦河床ワンドのみを対象としていては不十分であることが分かる。一方、物質交換に関する研究では、富永ら³⁾が染料実験を行いワンドと主流部との水交換特性に関する研究を行っている。流速のスペク

トルから剥離渦の発生周期とセイシュの共鳴現象を捉え、平均流の構造と大きく異なる瞬間的な渦構造が水交換に大きな影響を及ぼしていることを示唆した。また彼らは生態系維持に深く関係する開口部形状の水交換に与える影響を実験的に検討しており、この中で3次元の流れ計測・染料実験によるワンド内濃度の滞留時間の計測を行うとともにワンド研究の主流である水深平均計算モデルの再現精度を検討している⁴⁾。Uijtewaaiら⁵⁾は染料実験を行い、連続ワンド群における上流側ワンドの下流ワンドへの影響やアスペクト比、境界部河床形状の交換係数への影響を研究しており、アスペクト比・水平面内流れ構造・濃度変化のメカニズムについて考察している。Weitbrechtら⁶⁾は実河川に合わせた実験ワンド模型内において、河床を横断方向に変化させた上で染料実験・流れ計測を行い、流速と染料実験のそれぞれから求めた濃度交換係数の比較、次元解析を行った。

このように物質・濃度交換を扱う研究が多く、研究者によって鋭意なされてきたものの、先に触れたようなワンド内3次元形状の影響を考慮した研究は乏しい。物質

交換のみならず，基本的な統計量に関する情報すら不足している．そこで，本研究ではワンド内の上流側もしくは下流側に土砂が堆積した状況を想定し，ワンド内に路床勾配（スロープ）を設け，この効果を検討する．アスペクト比に関してはスロープ無し $L_w/B_w=1, 3, 5$ ($B_w=20\text{cm}$, 10cm , 5cm) の 3 ケースで予備実験を行い，安定した PG・SG(後述)が確認できる条件の中で最も側壁の影響が小さいと思われる条件を採用した．流速については鍛冶ら¹⁾の研究を参考にして淀川での出水時の流速を想定した．また既往の濃度交換研究では，多くの場合水深方向の流れが小さいという仮定に基づいて体積平均した濃度値を用いるが，本研究ではスロープによる流れの三次元性を勘案し，高さごとに濃度交換係数を評価するとともに，各スロープ勾配に応じて流れ場がどのように変化するかを考察した．

2. 水理条件と計測方法

(1) 流速計測

今回の実験には水路長 10m ，水路幅 0.4m の水路を用いた．水路側部ならびに水路底面計測部が強化ガラス製，その他はスチール製である．水路側面から 10cm の位置に水路全長に渡って(ワンド部分を除く)，十分に背の高い仕切り版を設置し，単一ワンド流れ場を再現した．流下方向のワンド位置は水路上流端から 7m の位置である．

基本実験条件を表-1 に示す．主流部幅 $B=30\text{cm}$ ，ワンド幅 $B_w=10\text{cm}$ ，ワンド開口部長さ $L_w=30\text{cm}$ であり，ワンド部アスペクト比(ワンド長さ/ワンド奥行き)は $L_w/B_w=3$ ，この条件下ではワンド内に二種類の逆回転渦が発生することがわかっている^{5), 6)}．また水深 $H=5.3\text{cm}$ ，断面平均流速 $U_m=12\text{cm/s}$ ，フルード数 Fr は 0.166 ，レイノルズ数 Re は 6360 である．これらの無次元量には，速度スケールに U_m ，長さスケールに H ，渦動粘性係数には $0.01\text{cm}^2/\text{s}$ を用いた．なお，木村ら⁷⁾によれば，このフルード数条件ではセシユは発生しない．

図-1 に示すように，今回は底面勾配の影響を評価するためにスロープをワンド内に設置した．表-2 に示すように，スロープ無しケース： S_0 ，上流側が高いケース： S_u ，下流側が高いケース： S_d を考え，スロープ有りのケース

図-1 ワンド内河床スロープ模式図

表-1 実験条件

U_m (cm/s)	H (cm)	B (cm)	B_w (cm)	L_w (cm)	Fr	Re
12	5.3	30	10	30	0.166	6360

表-2 路床スロープ条件

スロープ条件	スロープ無し	上流側高5cm	上流側高2cm	下流側高5cm	下流側高2cm
ケース名	S_0	S_u5	S_u2	S_d5	S_d2

表-3 計測ケース

LLS挿入位置(河床)cm		S_0	S_u5	S_u2	S_d5	S_d2
LLS水路底面に対して並行	1 cm	S_{0-1}	S_{u5-1}	S_{u2-1}	S_{d5-1}	S_{d2-1}
	2 cm	S_{0-2}	S_{u5-2}	S_{u2-2}	S_{d5-2}	S_{d2-2}
	2.5 cm	$S_{0-2.5}$	$S_{u5-2.5}$	$S_{u2-2.5}$	$S_{d5-2.5}$	$S_{d2-2.5}$
	3 cm	S_{0-3}	S_{u5-3}	S_{u2-3}	S_{d5-3}	S_{d2-3}
	4 cm	S_{0-4}	S_{u5-4}	S_{u2-4}	S_{d5-4}	S_{d2-4}
	5 cm	S_{0-5}	S_{u5-5}	S_{u2-5}	S_{d5-5}	S_{d2-5}
LLSスロープと並行スロープより上方1cm			S_{u5-s}		S_{d5-s}	
厚みのあるLLS全体に照射		S_{0-v}	S_{u5-v}	S_{u2-v}	S_{d5-v}	S_{d2-v}

については二種類の勾配：2cm アップ（緩勾配で $2/30$ ）・5cm アップ（急勾配で $5/30$ ）と，計 5 種類の流れ場について流速ならびに濃度変化計測をおこなった．図-1 中の x ， y ， z はそれぞれ主流・鉛直および横断方向であり，これらに対応する時間平均流速成分を U ， V ， W とする．

(2) 流速計測

流速の計測には二次元の PIV 法を用いた．流れを可視化するために 3W のアルゴンイオンレーザーを光ファイバー経由でシリンドリカルレンズによって厚さ 2mm のシート状にしたもの(LLS)を，ワンドが設置されている水路側面から水路底面に対して平行に照射した．さらにスロープ有りケースについてはスロープに平行に LLS を照射しての撮影も行った．また粒径 $100\mu\text{m}$ ・密度 1.02 のトレーサーを計測部上流側 6m 付近から流れを乱さないように注入した．高速度カメラを水面上方 60cm 付近に設置し，外部トリガからのダブルパルス信号を用いてフレームレート 100Hz ・サンプリングレート 30Hz で撮影を行った．計測時間は約 1 分間である．

LLS を水路底面に対して並行に挿入したケースについて，計測高さ y は S_0 ・ S_u5 ・ S_u2 ・ S_d5 ・ S_d2 の全ケースで $y=1\text{cm}$ ， 2cm ， 2.5cm ， 5cm である．LLS をスロープ面に対して平行に照射するケース(S_{u5-s} ・ S_{d5-s})は急勾配についてのみ行い，それぞれスロープ面から LLS までの鉛直方向距離は 1cm である．これらを表-3 にまとめた．PIV は表の全ケースについておこなった．表中の色付は PIV・LIF の両方をおこなったケースであることを表す．

(3) 濃度計測

流速計測と同様にワンド側水路側方より LLS を照射し，

図-2 平均流速分布

LIF 法による濃度変化計測を実施した．染料には Rhodamin B を用いた．計測開始前に仕切り板でワンド開口部を完全に閉じた状態で適量の Rhodamin B 高濃度水溶液を注入，攪拌しておく．こうしてワンド内を 0.2mg/l の Rhodamin B 水溶液で満たし，計測を開始すると同時に仕切り版を取り除く．初期濃度 0.2mg/l の値に関しては，A. Borg ら⁸⁾によって 0.2mg/l 以下の濃度であれば Rhodamin B 蛍光の輝度と水溶液濃度の関係が直線近似で示されている．

撮影時にはシャープカットフィルタにより Rhodamin B の発光以外の散乱されたレーザー光の写りこみを防いだ．撮影速度については 1Hz と 30Hz の 2 種類を採用，濃度変化のスペクトル算出には後者のデータを用いている．LLS の照射位置は，PIV 計測同様 $S_0 \cdot S_0 \cdot S_2 \cdot S_2 \cdot S_2$ の全 5 ケースについて $y=1\text{cm}, 2\text{cm}, 2.5\text{cm}, 3\text{cm}, 4\text{cm}, 5\text{cm}$ である．また，薄い LLS とは別に，厚み 7cm の LLS

を用いてワンド内全体を照射し，ワンド内全体での濃度変化，つまり濃度の体積平均値変化も調べた．

3. 実験結果

(1) ワンド内の流れ場と染料濃度分布

図-2 にワンド内平均流速の実験結果を示す．順に S_0-5 , S_0-1 , S_u5-5 , S_u5-s , S_d5-5 , S_d5-s , S_d2-5 , S_d2-2 である． $S_u \cdot S_0$ ケースでは二渦一対の大規模渦，一方 S_d ケースではワンド全体を占める単一の大規模な水平渦が現れている．赤点・青点はそれぞれ，次に述べる PG の中心位置と SG 領域の下流端位置を表す．

S_u および S_0 ケースにみられる二種類の渦のうち下流側渦は Primary Gyre(PG)，上流側渦は Secondary Gyre(SG)と呼ばれる^{5), 6)}．PG は主流によって誘起され，SG は PG の回転によって二次誘起されるものである．しかし，瞬

図-3 瞬間の流速ベクトルとレイノルズ応力コンター(S_u5-5)

間場では PG 領域では平均流にみられるような渦が安定して存在しているわけではない。図-3 の瞬間図では、境界部のせん断不安定による大規模渦を示す高レイノルズ応力領域が定期的にワンド内に侵入し、ワンド下流壁にぶつかって側壁側に移動し、逆流となって境界部中央付近から流れ出る様子が見られる。大規模剥離渦は流下しながら成長するが、最終的にワンド内に入るもの(白破線)と入らないもの(黒破線)に分かれる。二つの図において後者は同一である。これは木村ら⁸⁾の数値計算結果に一致する。一方 SG は、PG 領域の間欠的な大規模渦のせん断応力によって発生・維持されているようであり、そのため PG に比べ平均図に示される領域内で比較的安定した運動をしている。ここで図-4 の染料実験の瞬間図(LLS 照射位置: $y=5\text{cm}$)から PG 領域では主流部との水交換が活発で、逆に SG では染料が溜め込まれていることが分かり、これは既往研究の考察^{5), 6)}と一致する。

図-2 の S_d5 ではワンド全体が単一平面渦で占められている。回転方向は $S_u \cdot S_0$ ケースでの PG と同じであるが、図-4 ではこの渦の中心付近に染料が溜め込まれており、 $S_u \cdot S_0$ ケースの PG とは性質が異なり、むしろアスペクト比 L_w/B_w が小さなワンドで生じる単一渦に近いと言える。ここには示していないが、瞬間の流れ場ではワンド下流端にぶつかった流体塊が、 $S_u \cdot S_0$ ケースとは異なり境界中央部から主流部へ抜け出すことなくワンド上端壁にまで到達する。そのためにワンド中央部が掃き出されることなく染料を溜め込むものと思われる。 S_d2 では、 S_d ケースであるが全水深にわたって $S_u \cdot S_0$ ケースと同じような二渦構造となっており、底面上昇の影響が小さくなっていると考えられる。次に S_05-5 と S_05-1 , S_u5-5 と S_u5-s , S_d5-5 と S_d5-s , S_d2-5 と S_d2-2 の計測高さの異なるペアにおいてそれぞれ比較してみると、水面と底面付近ではほぼ同じ平面渦構造をしていることがわかり、平面内の瞬間渦構造も同じメカニズムであることが推測される。一方、 S_d5 で

図-4 瞬間のLIF画像 (白色: 高濃度)

図-5 濃度交換係数の水深方向変化

はワンド上流端において若干の違いが見られる。底面付近では大規模渦が上流端まで達しており、ワンド内側壁側の上流端に小さな SG のような渦が見られるのに対し、水面付近では上流端付近では横断方向ほぼ全域において主流部に向かう流れが発生しており、底面付近で上流端に衝突した流れが向きを変えて上昇流となっている可能性がある。

(2) 濃度の時間変化

ワンドなどの死水域の濃度交換は次式で表される^{5), 6)}。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{kU_m}{B_w} \frac{a_l}{a_m} (C - C_0) \quad (1)$$

t は時間、 C は瞬間の計測面内平均濃度値、 C_0 は $t=0(s)$ での C である。 k は濃度交換係数である。 a_l, a_m はワンド境界・中央での水深である。 k は次式で与えられる。

$$k = \frac{B_w}{U_m} \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

ここで、滞留時間 T は濃度が初期値 C_0 の 1/10 に達するのに必要な時間を表す。

今回は k 値を各 LLS 照射位置ごとに算出し比較を行った。この結果を図-5 に示す。 S_u5 , S_d2 では水面に近づくほど k 値が小さくなり、交換が抑制されていることが分かる。これは、水面に近づくほど LLS による断面内に占

めるSG領域(濃度を溜め込むはたらきを持つ渦領域)の割合が高まるためであると考えられる。 S_d2 において $y \geq 2.5\text{cm}$ ではほぼ一定になるが、これはLLS断面内渦構造が、スロープがLLS断面内に存在しない $y \geq 2.5\text{cm}$ で一定になるためである。よって、水深方向全域にわたってLLS断面内の流れ構造の変化が無い S_0 ケースでは、水深方向に濃度変化がほぼ一定になっている。また、 S_u ケースと S_0 ケースでPGとSGの分布が類似することを考慮すると、 S_u ケースにおいて k 値が大きくなり水面近傍ほど S_0 ケースの値に近づくという特性も先の考察から説明できる。

S_d ケースでは、 S_d5 、 S_d2 とも一定値であり、これは水深方向全域を単一大規模渦構造が支配しているためLLS断面内渦構造が全水深で一定になるからだと考えられる。

以上のように、本計測条件下では特にダウンスロープの場合に k 値が水深方向に変化することがわかる。このことから、底面変化のある死水域の濃度変化を考える際には体積平均手法ではなく三次元性を考慮した解析が必要であるといえる。

図-6は、図-5に示される各高さごとに計測した値から求めた体積平均された k 値と、厚みのあるLLSをワンド全体に照射したケースから直接求めた k 値を比較した結果である。平均値を求める際、 $S_u \cdot S_d$ では各高さごとに開口部幅が違うためその値を重みとして平均値を求めた。二つの方法から得られた k 値分布はおおよそ一致しており、より詳細な k 値の検証のために各高さごとに k 値を算出するという解析手法が妥当であるといえる。また、値が $S_u > S_0 > S_d$ となることが確かめられた。ただし、スロープが有る場合にはフラットの場合に比べ差異が大きい。この誤差の原因として、レーザー自身の不均一性とワンド壁面に付着するゴミによるLLSのムラが考えられる。特に前者の影響はシートを厚くしたときよりも薄いときのほうが出やすい。ワンド内上流側の方が下流側よりもLLS強度が小さくなっていたための計測誤差が結果に出てしまっているものと思われる。

(3) 底面勾配変化に伴う平面渦中心の移動

ワンド内外の物質輸送においてPGやSGの構造が大きく関係していることが分かった。

図-7、図-8に $S_u \cdot S_0$ ケースおよび S_d ケースでの大規模渦(前者においてはPG)の中心位置(図-2での赤点)、SG領域の下流側端点の位置(図-2での青点)についてケースごとの変化を示した。横軸はスロープ勾配を表している。図-2での青点はワンド内側壁沿いにおける $U=0\text{cm/s}$ となる位置とした。PG領域を支配する流れである周期的に侵入する剥離流体塊の占有体積は、 S_u ケースでは S_0 ケースに比べて上流側の水深が浅いため小さくなる。そのため、 S_u ケースでは流体塊が下流端壁に衝突し

図-6 ワンド領域全体での交換係数変化

図-7 大規模渦中心位置の比較

図-8 SG領域下流端位置の比較

た後ワンド側壁方向に流れるために必要な水平面内領域が少ないのでPGの中心位置が下流側に移動するものと思われる。こうして侵入した流体塊が側壁沿いを逆流し、渦の侵入領域の上方から再び開口部へ向かい流出する。この一連のプロセスがPGを形成する。この再流出領域とワンド上流端との距離によってPGとSGの二重渦構造になるのか S_d5 に代表される単一渦構造になるかが決定されると考えられる。同様に、 S_d ケースにおいて大規模単一渦中心が上流側に寄ることも剥離渦状流体塊の侵入の

図-9 濃度交換係数の実験結果とモデル算出値比較

仕方を考慮することで説明できる。下流ほど水深が小さいため、ワンド内に流入する流体塊がワンド壁面に流れ込むために必要な水平面内領域が大きくなり、その結果渦中心位置が上流側にシフトする。さらに S_d5 ケースでは再流出位置が上端に達するため、SG が形成されないと考えられる。以上のモデルを用いれば、スロープ傾斜を変数として PG・SG 領域を計算から予測することができ、 k 値の同定も可能になるとと思われる。

(4) 濃度交換係数の実験結果とモデル算出値比較

ガス交換分野の交換速度は様々な現象モデルや物理モデルが提案されている。今回は乱流輸送を考慮した次式で示される large-eddy モデル⁹⁾の水流への適用を検討する。

$$k_+ S_c^{1/2} \propto Re^{-1/2} \quad (3)$$

ここで k_+ は速度スケールによって規格化された交換速度、 Re はレイノルズ数、 S_c はシュミット数で本研究では 1 とした。主流とワンド境界部における空間平均した主流速成分の乱れ強度 u'_c を用いて、 $k_+ \equiv k U_m / u'_c$ とした。 Re は速度スケールに u'_c 、長さスケール L_p は図-2 の青点からワンド下流端までの x 方向距離とした。時間スケールは全て [s]、同じく長さスケールは [cm] である。

図-9 に $y = 5$ cm の結果を対象にスロープ有無の全 5 ケースについての交換速度とレイノルズ数の関係を示す。図より、水面近傍交換速度の実験値は large-eddy モデルの値によく一致する。これより、 k 値は u'_c と L_p の関数となることが分かる。しかしながら、 u'_c はスロープの影響で大きくなる傾向にあるが、 S_d5 ではその傾向から外れており、このケースについては今後再検討が必要である。

以上より、large-eddy モデルを用いた水面の濃度交換速度を予測するには、乱れの強さに関する情報に加え、第一循環渦(PG)の長さスケールに関する情報が必要であることがわかる。今後の L_p を予測できるモデルを用意することが課題となる。

4. 結論

本研究にて得られた主要な結果を以下にまとめる。

- 河床勾配をもつワンドでは、特に上昇勾配において水平面内渦構造・濃度交換特性が大きく変化する。
- ワンド内の時間平均水平面渦構造は、河床変化を伴う場合であっても高さ方向にほとんど変化しない。このことから、瞬間渦構造についてもその特徴は水深方向に一定と考えられる。
- 路床勾配を有するワンドにおいて、渦構造については水深方向に一定であるが、PG・SG に代表される支配的な渦構造の各水深での水平面内面積比が変化するため濃度交換係数の値が水深方向に変化する。
- 水面における濃度交換係数について large-eddy モデルを適用し、実験値と良好に一致した。
- 計測結果をもとに PG と SG の形成特性と路床勾配の影響、および濃度変化との関係を明らかにした。これは SG が生成される理由を説明すると同時に、各渦領域と k 値のスロープ効果を盛り込んだ同定につながるものであると考えられる。

謝辞：本研究は河川環境管理財団・河川整備基金助成事業の支援の下で行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 鍛冶塩太、綾史郎、武藤裕則、馬場康之、中西章、出口恭、藤田一郎、竜門俊次：淀川樟葉復元ワンド群の水理環境、水工学論文集、第 50 巻、pp.1117-1122, 2006.
- 木村一郎、北村忠紀、鷺見哲也、武田誠、鬼束幸樹、庄建治朗、大塚康司：木曽川感潮域に設置された水制群周辺のワンド形成過程と河川環境に関する共同研究、河川技術論文集、第 8 巻、2002.
- 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法に関する研究、水工学論文集、第 46 巻、pp.571-576, 2002.
- 富永晃宏、E.O., スグロホ：閉鎖的なわんどの水交換に及ぼす開口部形状の影響、水工学論文集、第 53 巻、pp.895-900, 2009.
- Uijtewaai, W.S.J., D. Lehmann, A. van Mazijk : Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments, J.H.E, ASCE, 1273(11), pp.928-936, 2001.
- Weitbrecht, V., Socolofsky, S.A., Jirka, G.H. : Experiments on Mass Exchange between Groyne Fields and Main Stream in Rivers, J.H.E, ASCE, 134(2), pp.173-183, 2007.
- 木村一郎、細田尚、村本嘉雄、安永良：開水路流れにおける死水域内の振動流体に及ぼす水理パラメータの効果、水工学論文集、第 39 巻、pp.779-784, 1995.
- Borg, A., Bolinger, J., Fuchs, L. : Simultaneous velocity and concentration measurements in the near field of a turbulent low-pressure jet by digital particle image velocimetry-planar laser-induced fluorescence, Exp fluids 31, pp.140-152, 2001.
- Jahne, B., Haussecker, H. : Air/water gas exchange, Annual Review of Fluid mechanics, Vol.30, pp.443-468, 1998.

(2010. 9. 30 受付)