連続水制群周辺の水理乱流特性と物質交換に関する基礎的研究

Fundamental study on hydrodynamic characteristics and mass exchange process in groyne fields

山上路生*・瀬津家久**・板井幸太***・崎谷健太***

Michio Sanjou, Iehisa Nezu, Kouta Itai and Kenta Sakitani

*博 (工) 京都大学准教授 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)

** 工博 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

*** 京都大学修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

It is well known that groynes navigate mainstream effectively to protect a river basin. An associated dead water zone can be a valuable space for various aquatic eco-system. In contrast, such a closed water environment reduces water quality rapidly, and it is therefore of vital importance to consider not only hydrodynamic properties but also mass transfer mechanism beneath the mainstream and the dead water zone. We conducted turbulence and dye concentration measurements in a laboratory flume by using PIV and LIF techniques, respectively, and based on the present results, a phenomenological flow model was developed which describes comparison of large-scale gyre structure and mass transfer coefficient among the different rank number.

Key Words: Groyne field, turbulence, mass exchange, PIV, and LIF measurements

1. はじめに

本研究では河川水制の水域環境機能にスポットをあてる。水制の本来の目的は護岸効果や流向制御であるが、一方で水制内の領域は多種多様な生物にとって格好の生息および繁殖場となるという利点がある。ただし平水期間が続くと閉鎖域特有の水質環境の悪化が問題となる。適度な洪水擾乱による主流との水質交換が河川管理上求められる。特に水交換特性の定量評価法の確立が急務である。一般的に用いられる水制流れの物質交換の基礎理論は、河床凹部の研究における Valentine&Wood¹⁾の知見を転用したものといえる。彼らは河床凹部と主流部との物質交換に関する理論研究と実験研究をおこない、さらに両者を比較した。

木村ら²⁾はフルード数と濃度交換速度との関係に注目した。また彼らの計算結果による濃度交換速度のオーダーは Valentine& Wood による値と一致した。さらに木村ら³⁾は水理実験から濃度交換速度を評価し数値計算の結果と比較した。この比較では交換速度とフルード数の関係性はよく一致した。Uijtewaal ら⁴⁾は染料を用いた室内水路実験を行い連続水制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、境界部の河床形状の交換速度

への影響を研究した。この中でアスペクト比(凹部領域の水平面の縦横比)、水平面の流れ構造および濃度変化機構について詳細に検討した。水深方向への流れの変化が小さい浅水仮定を前提に、染料濃度を水制間の凹部容積全体で積分した値を用いて濃度交換速度を算出している。特に興味深いことはある特定のアスペクト比では水制間凹部領域内に2つの循環流が生じる点があり、彼らは凹部における下流側の大きな渦を Primary Gyre(PG)、上流側の逆向き回転の渦を Secondary Gyre(SG)と呼んだ。さらに流れ場の計測結果と濃度の分布画像を比較して、PG 領域で染料濃度が急速に減少することや SG 領域で染料が滞留することを示した。また主流部とワンド内の水深を変え、境界部河床に横断方向のスロープを設置したケースと段落ちにしたケースとで比較をおこない、スロープの有無は濃度交換に大きな影響を与えないと結論づけた。Weitbrecht ら⁵⁾は実際の河川サイドキャビティ領域を対象にした模型実験を行った。特にワンド内河床を横断方向に変化させて、流速データと染料実験のそれぞれから求めた濃度交換速度の比較、交換速度の次元解析を行った。

連続水制場は河岸入り江やワンドのような単一の凹部域と異なり最上流水制からのランクナンバ

一（水制の位置番号）によって流れの構造や物質交換特性が異なる．すなわち主流方向への依存性が存在する．本研究では特にこの点に注目し，水制領域の PG および SG 構造とそれらによる交換機構を説明する．連続水制群を実験水路の側壁に設置して，PIV による流速計測と LIF による濃度輸送計測を行う．流下方向と水深方向に PIV 計測位置を系統変化させて流れ統計量を解析し，LIF 濃度計測により物質交換特性を定量評価した．

2. 実験条件と計測システム

2.1 流速の計測方法

本計測の計測装置と座標系を図-1 に示す．計測水路は京都大学乱流水理実験室に設置されている，全長 10m、全幅 40cm の循環式直線水路である．水路側部および水路底面計測部が強化ガラス製で多方向からの流れの可視化が可能である．水路最上流に位置する縮流部にハニカムを付けて十分に整流した．水路下流端の越流堰によって水深を調整した．水路上流端より約 5m 下流から水路左岸に長さ 5cm、高さ 8cm、厚さ 1cm のアクリル板を 15cm の等間隔で 9 個設置し連続水制流れ場を再現した． B 、 B_s および L_s はそれぞれ低水路幅、水制長さおよび水制間距離である． x 、 y および z をそれぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向とし、水制各上端を $x = 0$ 、底面を $y = 0$ 、水制先端（主流と凹部の境界）を $z = 0$ とする． x 、 y および z 方向の瞬間流速を $\tilde{u}$ 、 $\tilde{v}$ および $\tilde{w}$ ，時間平均流速を U 、 V および W である．またそれらの乱れ変動成分を u 、 v および w とする．

PIV 計測はこの水制区間を対象に行った．出力 2W の連続アルゴンイオンレーザーを光強度減衰が小さい光ファイバーケーブルによって水路側方まで導光し，シリンダリカルレンズで厚さ 2mm のシート状（Laser light sheet, LLS）にした．この LLS を主水路側の側壁ガラスより水路底に平行に水平照射した．照射高さは水深を H として $y/H = 0.19, 0.47$ および 0.75 の 3 パターンである．可視化のために水流と追従性のよい比重 1.02、粒形 $100\ \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子をトレーサーに用いた．トレーサーが均一に計測面に分布するように循環水に注入した．水路上方に高速度カメラを設置し，可視化されたトレーサー群を撮影した．高速度カメラは 1000 ピクセル角で最高 4000fps の HAS500(Ditect 社製)を用いた．1 ケースあたり約 60 秒間計測した．このカメラはパルスジェネレータによって外部トリガー制御が可能である．30Hz の外部トリガー信号によって連続 2 時刻の画像を 100Hz のフレームレートで撮影した．得られたペア画像から直接相互相関法によって流下方

表-1 水理条件

U_m (cm/s)	H (cm)	B (cm)	B_s (cm)	L_s (cm)	D_s (cm)	F_r
12	5.3	35	5	15	1	0.166

図-1 実験システムと座標系

向と横断方向の瞬間流速成分($\tilde{u}$, $\tilde{w}$)を 30Hz のサンプリング間隔で求めた．さらに後処理としてガウス補間を適用してサブピクセル解析と周囲ベクトル判定による誤ベクトルの除去補間を実行した．1 ピクセルは実寸で 0.48mm に対応し検査窓は 21 ピクセル角であり、長さスケールのダイナミックレンジはおおよそ 14 であった．

2.2 染料濃度の計測方法

LIF は画像輝度の大小で濃度を評価できる非接触計測法で，流れを乱さないメリットがある．発光染料にはレーザー光に反応して発光する Rhodamin B を用いた．これは濃度の大小に対応して反射光量が変化する特性を有する．計測開始前に仕切り板で対象とする水制間凹部領域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．このように凹部領域内を 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板を取り除く．なお 0.2mg/l 以下の濃度であれば Rhodamin B の発光の輝度と水溶液濃度の関係が直線近似できることが示されている⁶⁾．この特性についてはキャリブレーション計測でも確認した．撮影時にはシャープカットフィルタにより Rhodamin B の反射光以外の光の写りこみを防いだ．撮影速度は 1Hz であり，撮影時間は約 180s である．PIV 計測と同様にシリンダリカルレンズで厚さ 2mm のシート状にし，これを水制側の側壁ガラスより水路底に平行に水平照射し Rhodamin B を発光させた．計測高さパターンも PIV 計測と一致させた．

2.3 水理条件

表-1 に本計測の実験条件を示す．水深 $H=5.3\text{cm}$ ，断面

図-2(a) 時間平均流速ベクトル(U, V)の水平面分布：最上流凹部 S_{1-2} における高さ間の比較

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。フルード数 Fr 及びレイノルズ数 Re 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 20°C における水の値として $0.01\text{cm}^2/\text{s}$ を用いた。本研究は平水時を想定し、流量を設定した。水制部のアスペクト比(水制間距離/水制幅)は $L_s/B_s=3$ とした。Uijtewaalt⁴⁾やWeitbrecht⁵⁾は、この条件下では水制間に2種類の逆回転渦が発生するとしている。

以下ではランクナンバーを添え字に使用して、水制を上流側から $S_1, S_2, S_3, \dots, S_9$ とし、各水制間の凹部領域を $S_{1-2}, S_{2-3}, S_{3-4}, \dots, S_{8-9}$ と呼ぶこととする。また、第1水制の上流側の領域を S_{0-1} と呼び、議論を進める。

3. 実験結果と考察

3.1 水平方向の時間平均流の特性

図-2(a)は再上流側の凹部領域の S_{1-2} における時間平均流速ベクトル(U, W)を高さを位置で比較したものである。図-2(b)は水面近くの高さ $y/H=0.75$ に注目して $S_{2-3}, S_{3-4}, S_{4-5}, S_{6-7}, S_{8-9}$ の結果を示す。まず S_{1-2} の流れ場を考察する。 $y/H=0.47$ および 0.75 では既往研究⁴⁾と同様に2渦構造となっている。下流側の比較的大きな渦はPrimary Gyre(PG), 上流側渦はSecondary Gyre(SG)と呼ば

れる⁴⁾。PGは主流によって誘起され、SGはPGの回転によって2次誘起される。図中の赤丸は目視によってベクトル図から読み取ったPGのコアを表す。どの高さにおいてもPGコアが境界部($z=0$)付近に存在する。後述するように下流側の凹部領域ではコアが凹部の中へシフトする。このことから S_{1-2} では横断方向に幅のあるPGが形成されるといえる。また $y/H=0.47$ および 0.75 では S_2 の先端部付近の主流側から逆流($U<0, W<0$)が発生する。このことから隣接する下流側の凹部 S_{2-3} から運動量や物質が流入されるものと考えられ興味深い。またPGコアが $y/H=0.47$ および 0.75 の方が $y/H=0.19$ よりも上流側に位置することもこの逆流の影響とみられる。 S_1 は最上流の水制であるため急縮の影響が大きく、どの水深でも $x/B_s=0\sim1.0$ の主流側で主流方向に剥離する高速流($U>0, W>0$)が発生する。なお $y/H=0.47$ および 0.75 では S_1 の隅角部にPGと逆回転のSGがみられる。一方で $y/H=0.19$ ではSGの存在が認められない。この高さでは底面せん断抵抗が他の高さよりも大きいいためPGの循環流速が相対的に小さくなり、結果的にSGの誘起が不十分になったと推測される。

S_{2-3} ではPGコアは凹部側にシフトして $z/B_s=-0.2\sim-0.4$ に存在する。 $x/B_s=0\sim0.25$ の主流側で凹部内に流入する流れが発生する。また $z/B_s=0$ および $x/B_s=0$ 付近で逆流($U>0, W>0$)が発生する。 S_{3-4} では、PGコアが

図-2(b) 四部領域ごとの時間平均流速ベクトル(U, V)の比較: $y/H = 0.75$

より凹部側へシフトしており、流れがまだ発達しきっていないと考えられる。 S_{4-5} 、 S_{6-7} および S_{8-9} ではいずれも類似の流れ場となっている。コアの横断位置も $z/B_s = 0.5$ 付近に落ち着く。水制先端から主流部への強い剥離や逆流はみられず流れは発達した状態にあると考えられる。

図-3 は、横断方向流速 W の領域間比較である。結果はすべて半水深 $y/H = 0.47$ 、 $z/B_s = 0.5$ の値である。 S_{1-2} が他の領域と比べて正負の変化が大きい構造をもつことがわかる。他の領域に比べ水制領域内への流入 ($W < 0$) する領域が大きい、これは下流に隣接する S_{2-3} からの逆流の影響が大きい。 S_{2-3} および S_{3-4} は上流側

($x/B_s < 1.5$) では流下方向にほぼ変化がないという同様の構造をもつ、下流側 ($x/B_s > 1.5$) ではずれが生じている。このことからこの領域ではまだ流れが発達しきっておらず、遷移領域であると考えられる。 S_{4-5} 以降ではすべての流下方向領域で同一の傾向を有することから、側壁キャビティ場としての流れが十分に発達しているといえる。

図-4(a) ~ (c) は S_{1-2} 、 S_{2-3} および S_{4-5} における横断方向流速 W の水深方向比較である。全て $z/B_s = 0.5$ の結果である。 S_{1-2} と S_{2-3} では $y/H = 0.47$ および 0.75 においては分布がほぼ一致しているが、 $y/H = 0.19$ ではこれらとの差異がみられる。一方 S_{4-5} では、水深方向に値の違

図-3 時間平均横断方向流速 W の流下方向分布

($z/B_s = -0.5$)

いはほとんどない。このことから流れが安定すると、水深方向への変化が小さくなることから分かる。このメカニズムについては検討中であるが、少なくとも十分に流れが発達すると3次元性が弱まり平面2次元的な流れになるようである。

3.3 レイノルズ応力の特性

図-5は $y/H = 0.75$ における S_{1-2} , S_{2-3} , S_{3-4} , S_{4-5} , S_{6-7} , S_{8-9} のレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ のコンター分布である。 S_{1-2} では他の領域に比べレイノルズ応力の正值の領域が主流側に寄っている。これは S_1 の先端で発生した剥離渦が強い横断方向流速により押し出されたためと推測される。また凹部領域内に正值が卓越していないため、剥離渦の流入は少ないと考えられる。もう1つ注目すべき点は主流部の上流側で負値が卓越していることである。鉛直方向の流れの変化を無視した場合、レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の生成項 G_{Re} は以下で表される。

$$G_{Re} = \overbrace{\left(-\overline{uu} \frac{\partial W}{\partial x} \right)}^A + \overbrace{\left(-\overline{ww} \frac{\partial U}{\partial z} \right)}^B - \overline{uw} \left(\frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (1)$$

この負値が卓越する領域では $\partial W / \partial z$ および $\partial U / \partial x$ は値が小さいため、C項は無視できA項とB項のバランスでレイノルズ応力の符号は決まる。この領域では $\partial U / \partial z > 0$, $\partial W / \partial x < 0$ であるためA項は正、B項は負となる。この領域で負のレイノルズ応力が発生しているということは $|A| < |B|$ となっていると考えられる。

S_{2-3} では主流部の上流側で大きな正值がみられる。これは、図-3や4で示したように上流端付近で水制領域内

図-4 W 分布 ($z/B_s = -0.5$) の水深方向の比較

からの流出が大きいため剥離渦が主流側に輸送されるためと思われる。 S_{3-4} でもレイノルズ応力のピーク位置は境界部より主流側に現れる。

一方で S_{4-5} では $x/B_s = 1.0 \sim 2.0$ の間の境界部にスポット的にピークが現れる。 S_{6-7} , S_{8-9} では、全体的に境界部で正值が卓越しており、剥離渦が境界部を中心に移流することがわかる。時間平均流構造と同様にレイノルズ応力場においても S_{4-5} 以降では流れの変化が小さくなることが理解できる。

3.4 水平循環渦領域の定量評価

図-6は、 $y/H = 0.75$ における S_{1-2} , S_{2-3} および S_{4-5} の時間平均渦度の鉛直軸成分 Ω_y の分布を示す。また図-7はそれらに対応する Δ 値のコンター分布である。 Δ は速

図-5 レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の水平面分布($y/H = 0.75$)

度勾配テンソルの固有方程式の解判定値であり、これが負の場合にはその領域で流線が閉じる、すなわち渦状の流れが生じることを示す。このことから渦度の符号と組み合わせて判断すれば渦領域および渦の回転方向が評価できる。本研究の座標系の場合、 $\Omega_y > 0$ かつ $\Delta < 0$ の領域が反時計回りの渦、 $\Omega_y < 0$ かつ $\Delta < 0$ の領域が時計回りの渦を表す。

S_{1-2} では渦度の正值の大きな領域の等高線が z 軸正の方向に勾配をもっている。このことから強い横断方向流速

により、 S_1 で発生した剥離渦が主流部へ輸送されることが分かる。また、図-2 で示した逆流領域では $\Omega_y < 0$ かつ $\Delta > 0$ となっておりこの領域は PG ではないようである。もう 1 つ特徴的なのが他の領域に比べ水制領域内の上流側で $\Omega_y < 0$ かつ $\Delta < 0$ となる領域が横断方向に大きいことである。このことから SG 領域が大きいと考えられる。上述のように SG は PG の回転によって 2 次誘起されるものであり、 S_{1-2} の PG は横断方向に大きな PG のため SG も横断方向に引き伸ばされたと考えられる。 S_{2-3} は他の

図-6 渦度の水平面分布 ($y/H = 0.75$)

図-7 Δ 値の水平面分布 ($y/H = 0.75$)

領域と違い、境界部上流端付近で渦度が大きな値を示していない。このことから S_2 では剥離渦が他の水制ほど発生していないと考えられる。また、主流部の上流側で渦度が大きな正值とていることから、 S_{1-2} に流入しなかった S_1 で発生した剥離渦がそのまま主流部を移流していると考えられる。 S_{4-5} では、境界部上流端付近で渦度が大きな正值となっている。上流端で発生した剥離渦が移流され凹部領域に流入し PG となることが渦度分布から見て取れる。

図-8 は水制領域内 ($0 \leq x/B_s \leq 3.0$, $-1.0 \leq z/B_s \leq 0$) に占める PG 領域の面積割合をプロットしたものである。また、図-9 は SG 領域の割合をプロットしたものである。 $\Omega_y > 0$ かつ $\Delta < 0$ となる領域を PG 領域、 $\Omega_y < 0$ かつ $\Delta < 0$ となる領域となる領域を SG 領域とした。PG 領域は他の領域と比べどの水深でも S_{2-3} で大きくなる。これは先述したように、PG が主流方向に伸びた形になっているからである。 S_{1-2} では $y/H = 0.19$ に比べて $y/H = 0.47$ および 0.75 の PG 領域は小さい。これは図-2(a) で示した

図-8 PG 面積の水深方向分布

図-9 SG 面積の水深方向分布

逆流域の分だけ PG 領域が小さくなるためである。 S_{4-5} では水深方向には大きな変化はなく、どの領域とも近い値をとっている。 S_{1-2} では横断方向に大きな PG によって SG が引き伸ばされており、SG 領域が大きくなる。 S_{4-5} では、 $y/H = 0.47$ で大きな値をとり、PG の値に接近する。 S_{2-3} で値が小さくなっているのは、主流方向に伸びた形の PG により SG が横断方向に小さくなったためであると考えられる。

4. 物質輸送係数の評価

染料濃度の時間空間分布を LIF で計測し、その結果より物質輸送係数を評価する^{8,9)}。簡単に述べるとワンド内に一様に存在する初期染料濃度はスプリットプレートの除去と同時に低水路側へ輸送される。そのため濃度は全体的に減少する。滞留時刻 T までは線形的に減少し⁹⁾この時間区間での物質輸送係数 k を次のように定義して評価する。

$$k = \frac{B_s}{U_c} \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

U_c は境界部 ($z = 0$) に沿って空間平均した時間平均主流速である。本研究では LLS の照射高さを複数設定してお

図-10 輸送係数の水深方向分布の比較

図-11 初期染料注入条件の違いによる S_{1-2} の輸送係数の比較

図-12 S_{1-2} の輸送係数を修正した場合の領域間比較

り、高さごとに T を算定して式(2)より輸送係数を求めた。

図-10 は各領域の濃度輸送係数 k の水深方向変化をプロットしたものである。このデータは、輝度値を算出する領域にのみ染料を注入して行った計測から得たものである。しかし、図-2 でみられるように、 S_{1-2} では $y/H = 0.47$ および 0.75 の S_2 先端部付近の主流側から逆流 ($U < 0, W < 0$) が発生している。この水制領域への流れ込みにより、 S_{2-3} からの流入が考えられるため、 S_{1-2} の計測では S_{1-2} と

S_{2-3} の両方に染料を注入して計測を行った。 S_{2-3} からの流入の影響があればこれを加味する必要がある。その結果を図-11 に示す。 S_2 先端部付近の主流側から逆流 ($U < 0$, $W < 0$) がみられる $y/H = 0.47$ および 0.75 で S_{2-3} にも染料を注入すると k 値が大きく下がる。一方逆流のみられない $y/H = 0.19$ では2つのケースにはほとんど差がみられない。このことから逆流により $y/H = 0.47$ および 0.75 では S_{2-3} の水制領域内からの流入があることが確認できた。

図-12 は図-10 の S_{1-2} のデータを S_{1-2} と S_{2-3} の両方に染料を注入して計測を行った結果に変更したものである。 S_{4-5} , S_{5-6} , S_{6-7} , S_{7-8} および S_{8-9} ではほとんど同じ値となっている。このことから S_{4-5} から下流では流れが安定していると考えられる。

アスペクト比3の単一ワンドの場合にはPGは物質交換を促進し、SGは抑制する機能を有することがわかっている。図-13 に前章の PIV 計測から求めた PG 領域面積の割合から SG のそれを引いた値を示す。図-12 と輸送係数が $S_{4-5} \cong S_{6-7} \cong S_{8-9} < S_{3-4} < S_{2-3}$ となる傾向は一致したが、 S_{1-2} については大小関係に差が生じた。これは次のように説明できる。図-2 の流速ベクトル分布や図-6 および図-7 の渦度および Δ の分布より、 S_{1-2} の PG は他の領域よりも横断方向に大きくなっており凹部から主流側へはみ出すことがわかる。PG の輸送係数への影響は水制領域内に占める割合ではなく PG 全体の規模で示す必要があるようである。また、 S_{1-2} の PG は他の領域 PG よりも循環流速が大きい。これも輸送係数に影響があるかもしれない。 S_{2-3} の輸送係数が S_{4-5} より下流の領域よりも大きいことは、PG が主流方向に伸びて S_{4-5} の PG よりも面積が大きくなることと、SG の横断方向の規模が減少するためと考えられる。

5. 流れの現象モデル

以上の結果を図-14 に現象モデルとしてまとめる。PG は S_{1-2} では、横断方向に、 S_{2-3} では流下方向に大きくなっている。これに伴い他の領域と比較して渦中心が S_{1-2} では主流部の方向に、 S_{2-3} では上流に移動している。PG と SG の形は流下方向に変化している。PG が横断方向に伸びれば、SG も横断方向に大きくなり、PG が主流方向に引き伸ばされれば、SG も主流方向に引き伸ばされるため、SG は PG により 2 次誘起されている。平均流速やレイノルズ応力の解析から、流れ変化が収束するまでは、水深方向の流れの変化が大きく、収束すると水深方向の変化は小さくなる。 S_{4-5} から下流では流れが安定している。最下流の S_{8-9} でも流れ場があまり変化しないことから下流の条件が流れ場に与える影響は小さい。レイノルズ応力はせ

図-13 PG 面積と SG 面積の差の水深方向分布

ん断不安定性を、渦度は流れの剥離をよく表現している。 S_1 の先端で発生した剥離渦は S_{1-2} 領域にはあまり流入しない。流れが安定した領域では上流端で発生した剥離渦は、境界部におけるせん断層内で流下しながら成長し、下流端から流入する。

物質交換特性についても流れの影響がみられる。特に注目すべきは S_{1-2} には S_{2-3} からの逆流によって溶存物質が過度に流入する。換言すれば S_{2-3} からは過度に物質が流出する。したがって S_{1-2} よりも下流に隣接する S_{2-3} の方が交換効率は良い。またさらに下流ではランク間の流れ構造の変化が小さくなるとともに PG の規模が減少するため交換率は低下する。なお最下流部の水制間領域における循環渦構造は中間部のものと大きな差異はみられなかったが続報ではこの点についてさらに詳細に検討する。

6. おわりに

本研究では連続水制流れを対象に、PIV 法と LIF 法を用いその乱流構造と物質輸送の特性を考察した。特に、水制ランク間ごとの大規模循環渦構造の変化及び、物質輸送係数との関係性については既往研究でも十分なデータがなく新しい知見といえる。以下に主要な成果をまとめる。

- 1) 本研究の水理条件ではどの凹部領域においても下流側の比較的大きな PG とそれと逆回転する SG からなる 2 渦構造が形成される。これは、同じアスペクト比の既往研究と同様の結果である。時間平均流速、渦度や Δ 値の結果から各領域で PG の形は変化することが分かる (S_{1-2} では横断方向に、 S_{2-3} では主流方向に大きくなる) 。 PG の形が変化するとそれに従い SG の形も変化することから、SG は PG により 2 次誘起されたものである。時間平均流、レイノルズ応力及び輸送係数などは S_{4-5} から下流では類似の構造となっている。このことから S_{4-5} から下流では流れが収束すると考えられる。

図-14 連続水制流れにおける流れ特性と物質交換の現象モデル

- 2) 渦度分布やデルタ分布から最上流水制先端からの流れの剥離がよく観察できる。レイノルズ応力分布から S_{2-3} では S_{1-2} のせん断層が連続して形成される。
- 3) 時間平均流速の結果から流れが収束した下流側の凹部領域では、半水深で水制流域内への流入、主流部への流出がともに強くなる。このことから物質交換は半水深で活発であると予測されるが、輸送係数 k は水深方向にほぼ一定となる。これは半水深で物質輸送を抑制する SG 領域が大きいため、流出と流入の影響が相殺されるためと思われる。
- 4) 輸送係数 k と水制領域内の PG の面積割合から SG のそれを差し引いた値の傾向は完全には一致しない。これらの結果から物質輸送を推定するには、水制領域外を含めた渦の規模や渦の回転速度などを総合的に解釈する必要がある。これについては今後の検討課題としたい。

以上のように興味深い結果がえられたが、本実験の水深は計測上の制約から、実河川現象と比べると水平スケールに比べて相対的に水深が大きい。次のステージとして広幅水路による同様の水理計測を行い、この点についても改めて検討および報告したい。

参考文献

- 1) Valentine, E. M., and Wood, I. R. : Longitudinal dispersion with dead zones, *J. Hydr. Div.*, ASCE, 103(9), 975-990, 1977.

- 2) 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.
- 3) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄, 安永良 : 開水路流れ死水域内周辺の水面振動・流体混合特性, *水工学論文集*, 第 41 巻, pp.711-716, 1997.
- 4) Uijtewaal, 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.
- 5) Weitbrecht, V., Socolofsky, S.A., Jirka, G.H. : Experiments on Mass Exchange between Groin Fields and Main Stream in Rivers, *J.H.E. ASCE*, 134(2), pp.173-183, 2007.
- 6) 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.
- 7) Chang, P.C., Plate, E.J. and Hidy, G.M. : Turbulent air flow over the dominant component of wind-generated water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.47, pp.183-208, 1971.
- 8) 鈴木壮平, 山上路生, 瀬津家久 : 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, *水工学論文集*, Vol.55, pp.1039-1044, 2011.
- 9) 山上路生, 瀬津家久, 鈴木壮平, 池内三津喜 : ワンド床の勾配が水理特性と乱流物質輸送に与える影響に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, Vol.68, No.2, pp.90-102, 2012.

(2012 年 3 月 8 日 受付)