

第Ⅱ部門 閉鎖性ワンド水域における DO 回復機構に関する実験的研究

京都大学	学生員	○延原涼介
京都大学	正会員	山上路生
京都大学	学生員	後藤慎弥
京都大学	フェロー	戸田圭一

1. はじめに

溶存酸素(DO)は無数の自然要因の中でも河川の水質及び生態系と密接な関連がある重要な環境指標である。また、河道域の本川よりもワンドのような止水域の方が貧酸素化のリスクが高い。一方でワンド中の DO の輸送機構に着目した研究はほとんどない。そこで室内水理実験を通してワンド内の循環流構造と DO 輸送機構を解明し、さらにこれらの結果からワンド内 DO 回復時間の予測モデルを提案した。

2. 実験方法

本研究ではPIV実験とDO実験の二種類の実験を行った。これらに用いた水路の幅は40cm、長さは16mである(図-1)。一辺の長さ $L=20\text{cm}$ の正方形モデルワンドを水路上流端ハニカムより10m下流に設置した。開口部の位置は上流端、下流端、及び中央部の3ケースで変化させた。さらにそれぞれのケースごとに開口部幅 Δ を1mmから100mmまで、即ち $\Delta/L=0.5\sim 50\%$ の範囲で変化させた。 x はワンド上流隅を原点とした流下方向座標、 y は底面を原点としての鉛直方向座標、 z は主流とワンド境界を原点としてワンド側に正とする横断座標とした。 U 、 V 及び W はそれぞれの方向における時間平均流速成分である。また H は水深である。

図-1に示す様にPIV計測では、連続発光のLLSをワンド側のガラス製側壁の外側から照射した。 y をワンド底面から LLS 照射位置までの距離として $y/H=0.1, 0.5, 0.99$ の3パターンで照射高さ位置を変化させて計測を行った。水面高さ ($y/H=0.99$) におけるPIV計測については、カメラで完全にクリアに撮影できる高さにLLSを設置した。比重1.02、粒径 $100\mu\text{m}$ のトレーサ粒子を流れ全体に注入し、LLSによって可視化された粒子群をワンド上方に固定した高感度カメラで連続撮影した。フレームレートは100Hzで固定し、サンプリングレートはパルスジェネレータを用いて全ケースとも30Hzとした。撮影領域のサイズは約 $21\text{cm}\times 21\text{cm}$ 、でPIV解析の相関窓サイズは約 $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ とした。なお今回の計測条件では1ピクセルは約 0.2mm に相当する。各ケースにおいて66.7秒間(計4000コマ)撮影した。カメラは水面上方50cmに下向きに設置し、広角レンズ ($f=16\text{mm}$, $F=1.4$) を用いた。

DOの回復特性実験では、まずワンド域の水深を主流と等しい状態に保ったまま完全に仕切り、主流との

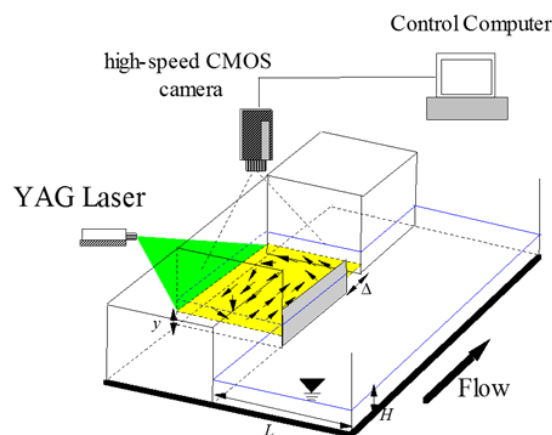


図-1 PIV 実験装置図

水交換が無い状態とした。ワンド中の DO を脱気するため、脱気剤として無水亜硫酸ソーダを投入し丁寧に攪拌して十分に溶解するまで待った。なお投入する脱気剤の単位体積あたりの総量は一定とした。その後流れが完全に止まり脱気を確認した後に仕切り板を瞬間的に除去して計測を開始した。また分子拡散のみによる大気からの DO 供給率を計測するために、完全に仕切られた状態の隔離ワンドにおける DO 回復過程も計測した。ワンド内の流速は主流に比べて非常に低速である。このような低流速の条件下では電極タイプの DO プロブは適さない。そこで蛍光式 DO プロブ(YSI 製 ProDO)を用いた。

主流の断面平均流速 U_m 、開口部幅 Δ 、及び開口位置を系統的に変化させた。開口位置は上流端、中央部、下流端の3通りを設定した。正方形モデルワンドの一辺の長さ L は、 $L=20\text{cm}$ で固定した。また、水深は $H=2.5\text{cm}, 5.0\text{cm}, 7.5\text{cm}$ の3ケースに変化させた。いずれも等流となるようにした。ただし、本回流水槽は下流堰による水深調整が不可能であることから、 $H=2.5\text{cm}$ のケースについては $U_m=30\text{cm/s}$ と 40cm/s では等流の再現が困難であったため実施していない。DO 回復実験では合計41ケースの計測を行い、PIV実験では一部の計測困難なケースを除いて各々のケースに対して $y/H=0.1, 0.5, 0.99$ の3通りずつ計測したため合計105ケースの計測をおこなった。これらの条件下でPIVによる流速計測とDO計測を実施した。

3. 実験結果

図-2 に $\Delta=5.0\text{cm}$, $H=5.0\text{cm}$, $U_m=30\text{cm/s}$, $y/H=0.99$ の条件下で開口部位置を変化させた平均流速コンター図を示す。下流側に開口部が位置するほどワンド下流側内壁によって主流からの流入流体塊が減速されるのでワンド内循環は小さくなる。

図-3 に $H=5.0\text{cm}$, $\Delta=5.0\text{cm}$ の条件下で開口位置を変化させた場合の体積交換フラックス $\langle F \rangle$ と U_m の関係を示す。 U_m の増加に対応して $\langle F \rangle$ も増加し、また開口位置が上流側にシフトするほど $\langle F \rangle$ も増加した。

以上の PIV 実験結果より、主流とワンド間の体積交換フラックスは、 U_m , Δ , 開口位置に対応して向上することが分かった。特に U_m が小さいとき、開口位置が U_m - F の勾配に及ぼす影響は大きい。

ここで、飽和に要する時間スケールとして T_r を定義する。 T_r は式(1)によって与えられる指数関数を実測値にフィットさせて求める。

$$\frac{C - C_0}{C_{sat} - C_0} = 1 - \exp\left(-\frac{t - T_{lag}}{T_r}\right) \quad (1)$$

T_{lag} は脱気剤が消費され DO 値の上昇が開始する時刻、 C は時刻 t における DO 濃度、 C_0 は初期 DO 濃度、 C_{sat} は飽和 DO 濃度である。これは Uijitewall¹⁾ や 富永・ヌグルホ²⁾ がワンドの染料濃度交換速度を定量評価した際に用いた滞留時間と同義である。また、DO の回復率は、回復時間スケールである T_r の逆数 T_r^{-1} で表すことができる。ワンド内の様々なパラメータによる T_r^{-1} のモデリングを試みた。その結果、計測が容易なパラメータである U_m , Δ , A を用いて開口位置ごとの DO の回復速度の予測式を表すことができた。 A はワンド水面積である。得られた予測式は実用性の高い予測式となったが、上記に示した通り開口位置はワンド内の流れ構造を支配する重要な要素であるため、開口位置を定量的に評価し、式(2)で表される普遍的な予測式を構築した。また、スケーリングの結果を図-4 に示す。

$$T_r^{-1} = 0.0245 \cdot f(\alpha) \cdot U_m \Delta / A \quad (2)$$

$f(\alpha)$ は上流開口パターンを基準に、それ以外の開口位置（本研究の場合、下流開口および中央開口）の傾きを補正するための tanh 型の関数である。補正前は $R^2=0.8374$ であるが、補正後では $R^2=0.9391$ へと向上し、相関性に大きな改善がみられた。結果として、補正関数を導入することにより、開口部位置の影響も考慮した一般性の高い式(2)に示される回復速度の予測式が得られた。

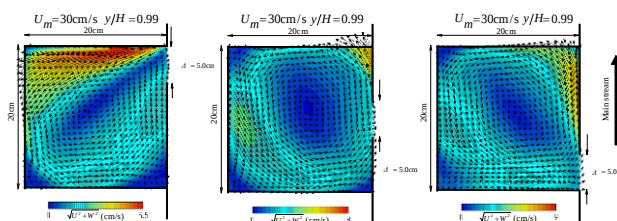


図-2 $\Delta=5.0\text{cm}$, $H=5.0\text{cm}$, $U_m=30\text{cm/s}$, $y/H=0.99$ の条件での開口部位置ごとの平均流速コンター図

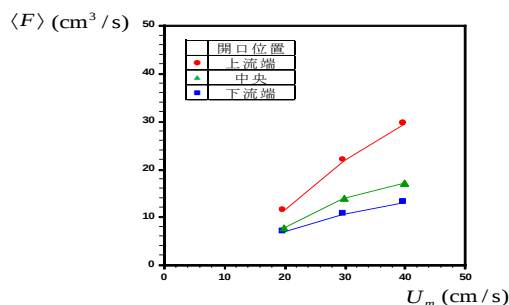


図-3 $\Delta=5.0\text{cm}$, $H=5.0\text{cm}$ の条件下で開口位置を変化させた場合の F の体積平均値と U_m の関係

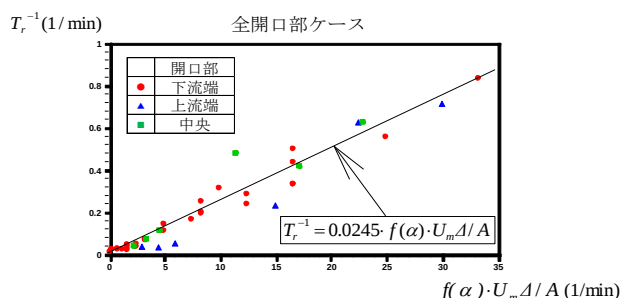


図-4 U_m を用いたスケーリング

4. おわりに

U_m , Δ , A , $f(\alpha)$ を用いて式(2)で表されるワンド内 DO の回復速度の予測式を構築した。本研究で新たに提案する予測式は、高い相関性を有し、また計測が容易なパラメータで構成されているため実用性に富むものとする。一方で、フラックスが小さい極低速領域における DO 回復式を提案すること、土砂の流入等の要因も考慮したワンドの管理法を考察することが今後の課題である。

参考文献

- 1) Uijitewaal, W. S. J., Lehmann, D. and van Mazijk, A.: Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol.127, No.11, pp.928-936, 2001.
- 2) 富永晃宏, E. O. ヌグルホ: 閉鎖的なワンド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.