

## 第II部門 開水路加速流における溶存酸素の濃度境界層厚さに関する研究

京都大学	学生員	○前口和哉
京都大学	正会員	山上路生
京都大学	学生員	延原涼介
京都大学	正会員	岡本隆明
京都大学	フェロー	戸田圭一

## 1. はじめに

ガス交換現象は地球温暖化から水域環境保全まで幅広い分野に関わっている。開水路の研究分野では、主に全層法により水路全体のガス輸送速度を計測してきたが、局所流などの不等流区間におけるガス輸送フラックスの分布特性を評価することはできない。そこで本研究では Film モデルに基づいてガス濃度境界層厚の実測からガス輸送速度を評価する方法を開発した。特に開水路加速流に適用して流れ場とガス輸送速度の関係などを考察した。

## 2. ガス濃度境界層の空間発達理論

一般にガスの濃度プロファイルは次式の exp 関数で近似できる。

$$\frac{C - C_b}{C_s - C_b} = e^{-\frac{y}{\delta}} \quad (1)$$

本研究では水深ごとに DO を計測し DO プロファイルをこの exp 関数とフィットさせ、最小二乗法を用いて左辺と右辺の差が最小となる  $\delta$  を濃度境界層厚さとしている。 $C$  は局所の溶存ガス濃度、 $C_s$  は飽和濃度、 $C_b$  はバルク濃度である。

またレイノルズ平均されたガス濃度の輸送方程式は次式で表される。

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\partial \bar{c}v}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\partial \bar{c}v}{\partial y} \quad (2)$$

これを水深方向に水面から境界層厚さ  $\delta$  まで積分すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial \delta}{\partial x} = -A_1(x)\delta + B_1(x)\delta^{-1} \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{\partial U_s}{\partial x} \left(1 - \frac{2}{e}\right) \frac{1}{C_0 U_s} \quad (4.a)$$

$$B_1 = \frac{1}{C_0 U_s} \left\{ \left(1 - \frac{1}{e}\right) D - \frac{1}{e} D_t(\delta) \right\} \quad (4.b)$$

$$C_0 = 1 - \frac{1}{e} + \frac{C_b}{\Delta C} \quad (5)$$

ここで  $A_1$  は表面流速の流下方向変化  $\partial U_s / \partial x$ 、 $B_1$  は分子拡散と乱流拡散のバランスをそれぞれ表す項である。境界層厚の流下方向における変化はこれらの比によって決定されていると考えられる。ここで  $U_s$  は表面流速、 $D$  は分子拡散係数、 $D_t$  は乱流拡散係数、 $C_0$  は式(5)で定義する。

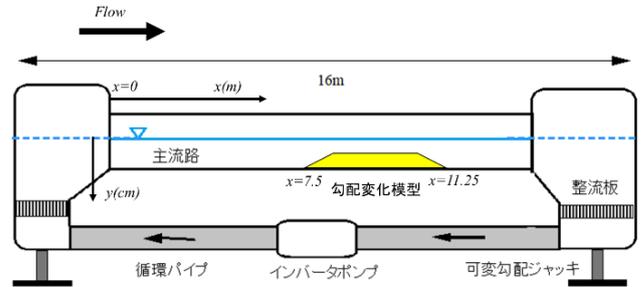


図-1 実験水路模式図

## 3. 実験方法

本研究では DO 実験と PIV 実験の2種類の実験を行った。使用した水路の幅は 40cm、長さは 16m である。また厚さ 1mm の 5 枚の鉄板を  $x=7.5\text{m} \sim 11.25\text{m}$  の路床にセットし、局所的に勾配を変化させて加速流流れ場を作成した。設定勾配は 14.4 度、かさ上げ高さは 3cm とした。図-1 は実験水路の模式図である。 $x$  は流下方向座標、 $y$  は水面を原点として底面側に向かう座標、 $U, V$  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。

$\delta$  を求めるために、無水亜硫酸ソーダを用いて脱気した後に、DO の濃度分布を調べる。まず水面 0 位置を決める。0.01mm ごとに針を降下させていき、針の先端が水面を捉えたところから、2.7mm 下げた位置を深さ 0 位置としている。ここで 2.7mm とは、針先端からセンサー位置までの距離である。この  $y=0$  の点から路床に向けて 0.01mm の精度でトラバースし、 $y=0\text{mm} \sim 10\text{mm}$  で計 9 点での計測を行った。各深さで 2 秒間隔で約 30 秒間計測しその時間平均値を求め、濃度分布を調べた。この分布とベストフィットする  $\delta$  を各地点の濃度境界層厚さとした。計測センサーの深さを変えた際は機械の応答性を考慮して 40 秒間待機したのちに、その深さでの計測を開始した。

PIV 計測では鉛直 PIV と水平 PIV の2種類の可視化実験を行った。比重 1.02、径 100 $\mu\text{m}$  のトレーサー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高感度カメラで連続撮影した。鉛直 PIV では連続発光のレーザーライトシート(LLS)を水路上方からセンターラインに沿うように照射し、水路側方の高速度カメラで撮影した。水平面 PIV では LLS をガラス製側壁の外側から照射し、水路上方に固定した高速カメラで水面高さの計測を行った。

表-1 水理条件(DO 実験と PIV 実験)

CASE	$U_c$ (cm/s)	H(cm)	B/H	fetch length, x(m)	Re	Fr
U10H6加速	10.0	6	6.7	7, 7.5, 7.75, 8.0, 8.25, 9.0 (x/H=116.7, 125, 129.2, 133.3, 137.5, 150)	6000	0.13

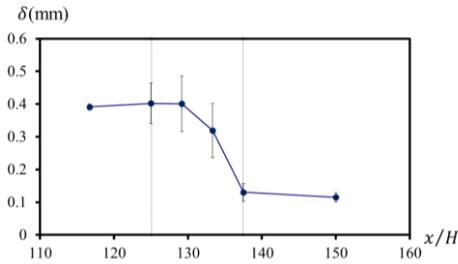


図-2 加速流れ場における  $\delta$  の流下方向分布

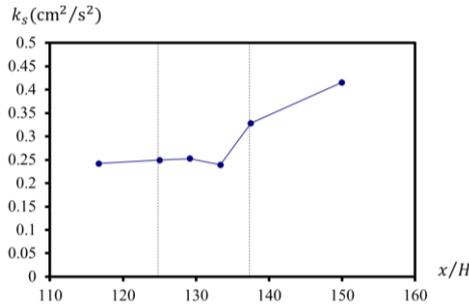


図-3 界面乱れエネルギーの流下方向分布

表-1 に DO 実験と PIV 実験の水理条件を示す. 流れの発達特性を調べるために,  $x/H=116.7, 125, 129.2, 133.3, 137.5, 150$  の 6 通りで計測地点を上流から変化させた. DO 実験では 1 地点 3 回計測を行い, エラーバーを用いて評価した. また断面平均流速  $U=10.0$ (cm/s), 水深を  $H=6.0$ (cm)とした.

4. 実験結果

図-2 はケース U10H6 加速のセンターラインにおける  $\delta$  の実測値の流下方向分布を示すものである. 勾配変化領域で  $\delta$  が減少する結果を得た. また勾配変化領域の後半になるにつれて,  $\delta$  の減少量が大きくなっていることが特徴的である.

図-3 は水平 PIV によるケース U10H6 加速の界面乱れエネルギー  $k_s$  の流下方向分布である. 滑面領域 ( $x/H < 125$ ) ではほぼ一定である. また, 勾配変化領域に入っても, しばらくは一定となっている. 勾配変化によって, 壁面摩擦による乱れは滑面の場合と比べ大きくなるが, それが水面近傍に到達するのにある程度の距離を要するためこのような挙動を示したと考えられる. その後, 流下とともに増加していき, 勾配変化領域が終わると乱れエネルギー  $k_s$  は増加した.  $x/H = 137.55$  は勾配変化領域の末端であるため, 流速と同様に, 乱れエネルギー  $k_s$  が発達途中であったと考えられる.

図-2 の  $\delta$  が流下につれ減少する要因として, 平均流速の加速度項や乱流拡散の増加が可能性として挙げられる. 式(3)の各項の値を算出し, 寄与度について述べる.

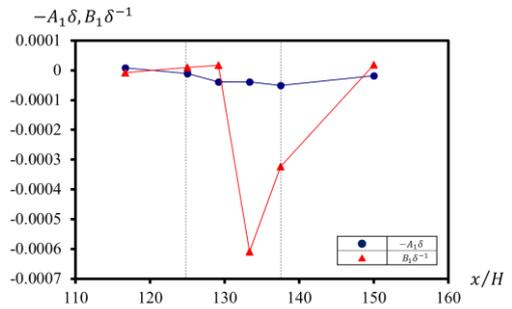


図-4 加速効果項と乱れ効果項の流下方向分布

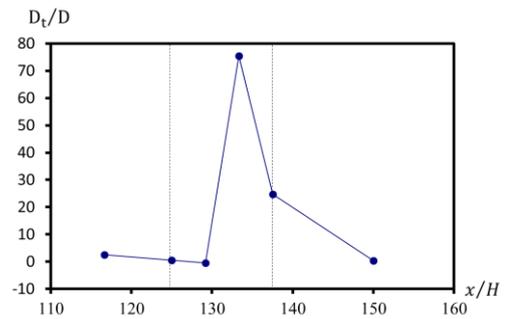


図-5  $D_t/D$  の流下方向分布

図-4 は式(3)右辺の第 1 項と第 2 項, すなわち加速効果項と乱れ効果項の流下方向分布である.  $x/H=129.2$  までは, それぞれの効果が同程度であるが,  $x/H=133.3$  以降は, 乱れ効果の影響が大きいことが分かる. 図-4 の結果より, 式(3)の  $\delta$  の空間変化は  $B_1$  項の寄与度が高い.

$B_1$  項は勾配変化領域において後半で急激に減少し, さらに勾配変化領域の後半になるにつれて減少量が大きくなっている.  $\delta$  も勾配変化領域で同じような挙動を示す.

また式(3)の第 2 項に着目すると, 溶存酸素の分子拡散係数  $D$  は物性値で既知であるため, 式(4b)から乱流拡散係数  $D_t(\delta)$  が逆算推定できる. 図-5 に  $D_t/D$  の流下方向分布を示す. 滑面領域と勾配変化領域前半部では  $D_t/D$  は比較的小さく 0-3 付近の値を示すのに対し, 勾配変化領域後半部では  $D_t/D$  は最大で 80 と大きな値となり乱流拡散によるガス輸送の促進を示唆している.

5. 結論

平均流速や乱れ構造の分布から, 勾配変化領域前半付近で発生した組織渦が水面に輸送されることで強い乱れが発生することがわかった. 式(2)-(4)の理論式を用いて  $\delta$  の減少に対する加速効果と乱れ効果の寄与度を比較し, 乱れ効果の影響が大きいことを示した. また, 乱流拡散係数  $D_t$  も算出し, 平坦区間と比べて,  $D_t$  は数十倍程度となることが分かった.

参考文献

1) 杉原裕司・山上路生: 界面水理学における乱流とガス交換—実験とモデルの進展—, ながれ, 第 30 巻, 第 3 号, pp.181-194, 2011.