

第Ⅱ部門 平坦開水路流れ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	正会員	岡本隆明

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トピックにかかわっている。実河川や循環水路などの開水路流れの水質科学とも深く関連する。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¹⁾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。特に基礎特性を調べるために直線の平坦開水路流れを対象に流れ場とガス輸送速度の関係を考察した。

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 δ 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。

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

これを水深方向に水面から境界層厚さ δ まで積分すると、次式が得られる。

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

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

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

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

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_o は式(5)で定義する。

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。 x は水路流入部を原点とする流下方向座標、 y は水面から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。

δ 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。各深さにおいて 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 δ 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 μm 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。

流れの発達特性を調べるために、 $x/H=33.3, 50, 66.7, 83.3, 100, 116.7, 133.3, 150, 166.7, 183.3$ の 10 通りの計測地点を設定した。DO 実験では 1 地点 10 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 $U=10.0(\text{cm/s})$ 、水深を $H=6.0(\text{cm})$ とした。

4. 実験結果

図-1 は水平 PIV によって得られた水面近傍での流速 $U(y/H=0.95)$ の流下方向変化である。ここで y は底面を原点とし、水面側に向かう座標である。この高さ $U(y/H=0.95)$ の流速を便宜的に U_s とする。フェッチ $x/H < 100$ では変動が大きいことが見て取れる。これはポンプアップされた水路上部の水流において様々な乱れが残っているためと考えられる。またフェッチ $x/H > 100$ では $U_s=1.24$ 程度の値を示し、空

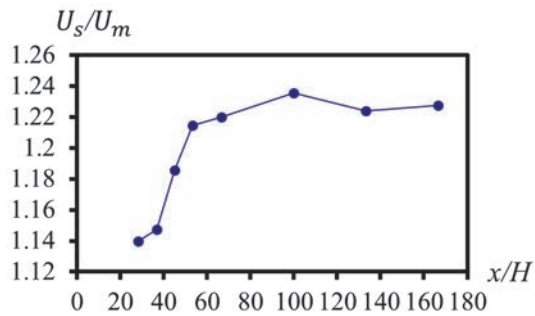


図-1 表面近傍における主流速の流下方向分布

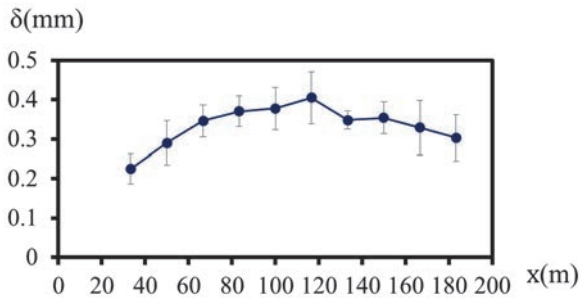


図-2 濃度境界層厚さの流下方向分布

間変化は小さい。また路床抵抗によって、主流速の境界層が発達している。

図-2はケースU10H6を対象として、センターラインにおける δ 実測値の流下方向変化を示すものである。33.3 < x/H < 116.7では δ が増加の傾向にあり、116.7 < x/H < 183.3では δ が減少の傾向にある。この傾向について、理論式(3)~(5)を用いて考察を行う。

図-3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。滑面流れで $\partial U_s / \partial x$ が小さいため、 $-A_1 \delta$ は $B_1 \delta^{-1}$ に比べてかなり小さい。 $B_1 \delta^{-1}$ については、水路前半部で正值、水路後半部で負値となる。

ここで、水路前半部における B_1 について考察する。まず、水路前半部が横断方向に一樣でない場合について述べる。理論式は $D_z \partial^2 C / \partial z^2$, $\partial \bar{c} w / \partial z^2$, $D \partial^2 C / \partial z^2$, $\partial \bar{c} w / \partial z$ 等の項を考慮しておらず、流れや濃度が横断方向に一樣の場合にのみ適用できる。そのため、ここでは適用条件を満たさず、 B_1 を評価できない。横断方向に一樣でない複雑な流れ場により、このような挙動になっていると考えられる。

次に、水路前半部が横断方向に一樣である場合について述べる。図-4のように流下方向位置によって、水深方向の D_t の発達領域が異なると考えることで、図-4の $B_1 \delta^{-1}$ の挙動を説明できる。水路上流部では摩擦による乱れが未発達で、 D_t の発達領域は下流部に比べて小さくなり、相対的に下流部では D_t の発達領域が大きく水面近傍の分子拡散領域が小さくなると仮定するということである。しかし、 B_1 を

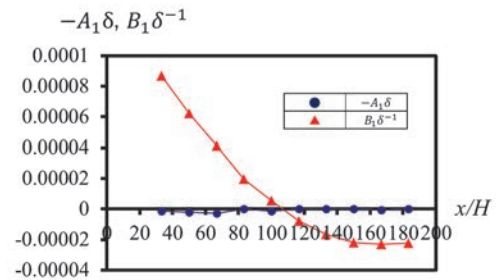
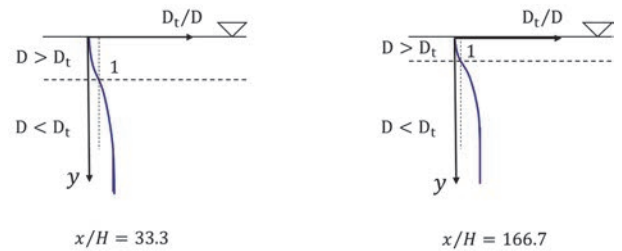


図-3 加速効果項と乱れ効果項の流下方向分布

図-4 水深方向の D_t の発達領域図

構成するパラメータの D_t まで算出すると、後述するように負値となってしまい、図-4の見解が成立する可能性は低い。

ここまで横断方向に一樣である場合とない場合の2つを考えたが、本実験のポンプアップという設備上、水路上流部では流れが不安定で、横断方向に一樣でない可能性が高い。—続いて、水路後半部の B_1 の挙動について説明する。

$x/H=116.7$ 以降は底面摩擦により生まれた乱れによる乱流が発達しており、流れは横断方向に一樣と考えられるため、理論式が適応できる。上流部の複雑な流れ場により33.3 < x/H < 116.7で増加した δ は、最終的に $\delta=0.4\text{mm}$ まで増加する。 D_t は $y=\delta$ での値である。 $\delta=0.4$ では $D_t > D$ と考えられるため、 $B_1 < 0$ となり、結果的に $\partial \delta / \partial x < 0$ となり δ が減少していく。 δ が小さくなると、 D_t はより水面に近い D_t となり値が小さくなっていく。その後 D_t が小さくなるにつれて、 $B_1=0$ に収束していく。結果的に、 $\partial \delta / \partial x=0$ となり、 δ も収束する。水路が有限長であるため、収束地点を捉えられなかったが、空間的变化が小さくなり一定値に漸近すると予想される。

5. おわりに

今後は乱流拡散係数のモデル化を試み、理論の新たな展開をはかりたい。

参考文献

- 1) 杉原・山上：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，30(3)，pp.181-194，2011。