

開水路流れの再曝気に関する実験的研究

水圏環境工学研究室 奥野未知香

1.目的

河川，湖沼，沿岸域などの水質を良好に保つためには液相中の溶存酸素の濃度が重要である。溶存酸素の供給源の一つに水表面からの再曝気がある。現在，再曝気現象のモデル化として表面更新モデルが主流である。このモデルは乱れエネルギーを有する渦が支配的とする「大渦モデル」と乱れエネルギーを失っている渦が支配的とする「小渦モデル」に分類される。現在どちらのモデルが合理的であるかは議論が分かれている。本研究は，回流式水槽を用いて開水路流れにおいてどちらのモデルが妥当なのかを検討し，種々提案されている再曝気係数の予測式の再評価を行う。

2. 実験装置と実験方法

2-1 実験装置

実験は図-1 に示すような幅 0.6m、長さ 5.8m、高さ 1.8m、容積 2.51m³の回流式水槽を用いて行った。水槽の側部と下部は閉水路で、上部は幅 0.6m、長さ 3.5m、水深 0.3m の開水路になっている。回流式水槽の下部に 2 つのインペラがあり、それを回転させることで流れを発生させる。安定した流れを形成するために、開水路上流部入口上部のローター（表面流加速装置）により水表面の流れを加速させている。本研究ではインペラの回転数を 100、200、300、400、500(rpm)の 5 通りで実験を行った。

2-2 流速測定方法

初めにインペラの回転数と流速の関係を調べた。開水路上流入口から流下方向に 1m および 2m の位置で横断面内の流速分布を電磁流速計で計測した。流速測定点を図-2 に示す。水深 24cm 以深は 1cm 間隔で測定を行っている。

2-3 溶存酸素濃度測定方法

DOメーターを開水路上流入口から流下方向に 1m および 2m の 2 カ所で、水路幅中央、水路床に設置した。水槽の水を約 20 時間回流させておき飽和状態にしておく。その後、亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを投入し、水中の DO 濃度を飽和濃度からおよそ 20~30% 低下させた。水槽全体の DO 濃度がほぼ

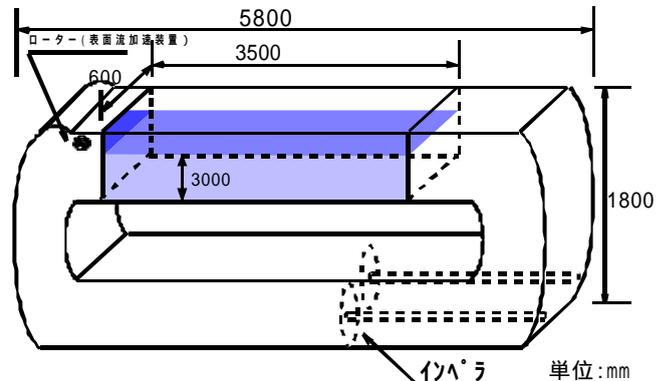


図-1 回流式水槽概略図

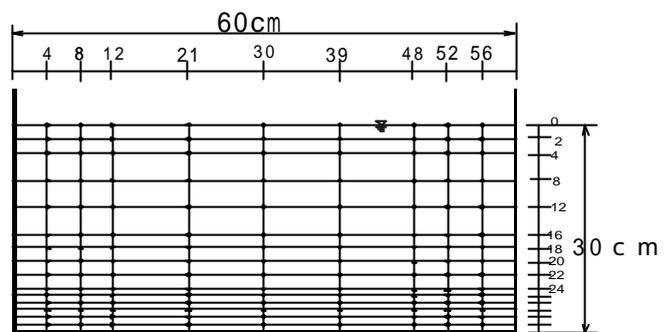


図-2 流速測定点

一様となったところから計測を開始した。計測開始から 10 分までは 1 分間隔、10~60 分までは 5 分間隔、60~120 分までは 10 分間隔、120~300 分までは 30 分間隔で DO 濃度を測定した。

3. 実験結果

3-1 回流式水槽の流速分布

表-1 にインペラ回転数とその時の断面平均流速、摩擦速度を示す。これらの値は断面 1m と 2m の平均値である。水路幅中央の水路床から 1cm の位置での流速が開水路対数分布則に従うものとして摩擦速度を評価した。図-3 は RUN5 の開水路入口から 1m 位置で水路幅中央における流速分布である。水路床から鉛直上向きに座標 y (cm) をとっている。 U は流速で (cm/s) ある。図-4 は図-3 を普遍表示したものである。図中の直線は対数分布則である。ここで U_* は摩擦速度 (cm/s) ν は動粘性係数 (cm²/s) である。本実験装置では断面の広い範囲で対数則は成立していなかった。水表面近くを除いてむしろ一様分布に近い流れであった。

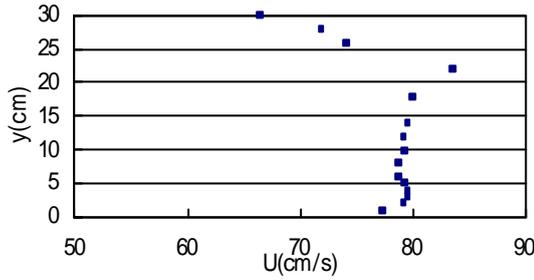


図-3 流速分布(RUN5、断面 1m)

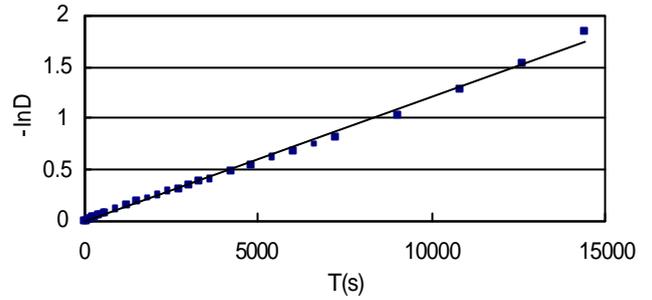


図-5 DO 濃度測定結果(RUN5、断面 1m)

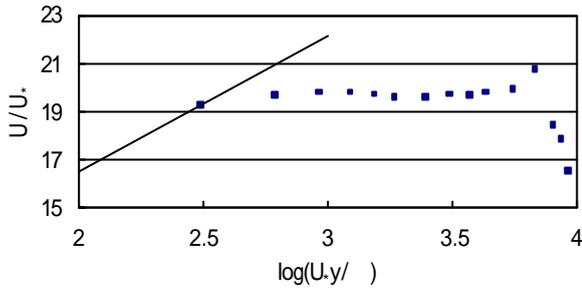


図-4 対数分布(RUN5、断面 1m)

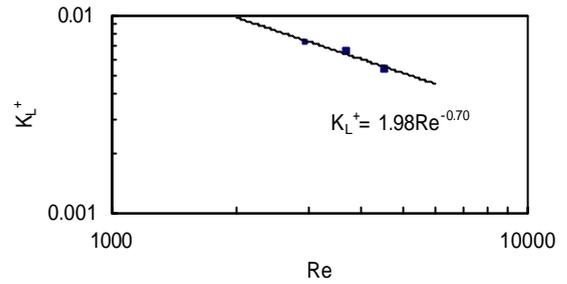


図-6 K_L^+ と Re の関係

表-1 流速測定結果

実験ケース	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5
インペラ回転数	100	200	300	400	500
断面平均流速(cm/s)	12.26	24.86	41.59	58.56	73.54
摩擦速度(cm/s)	0.814	1.497	2.393	3.213	3.875

表-2 再曝気係数と気体輸送係数

実験ケース	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5
k_2 (1/s)	2.32×10^{-5}	5.17×10^{-5}	1.03×10^{-4}	1.24×10^{-4}	1.23×10^{-4}
K_L (cm/s)	4.02×10^{-3}	8.97×10^{-3}	1.79×10^{-2}	2.14×10^{-2}	2.14×10^{-2}

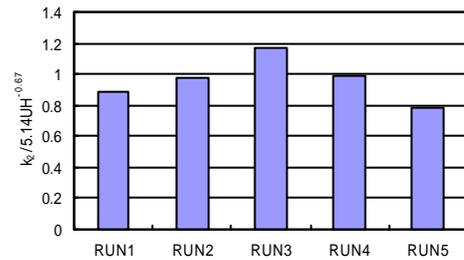


図-7 LDモデルの適合性

3-2 再曝気係数

水域に溶解している気体の濃度の時間変化は再曝気係数を用いて次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_2(C_s - C) \quad (1)$$

ここで C は溶存酸素濃度 (mg/l), k_2 は再曝気係数 (1/s) である。上式において $D = (C_s - C) / (C_s - C_0)$ を導入しその解を求めれば次式を得る。

$$-\ln D = k_2 t \quad (2)$$

ここで C_s は飽和 DO 濃度 (mg/l), C_0 は初期 DO 濃度 (mg/l) である。さらに気体輸送係数 K_L は $K_L = k_2 V / A$ で求められる。ここで V は水の体積 (cm^3), A は大気との接触面積 (cm^2) である。図-5 に RUN5 の無次元 DO 濃度の時間回復曲線を示す。このグラフの勾配から k_2 が評価される。表-2 に各実験ケースの k_2 と K_L を示す。図-6 は K_L^+ をレイノルズ数 Re に対してプロットしたものである。ここで

K_L^+ は k_L / u_* , Re は $u_* R / \nu$ である。また R は径深である。RUN1, 2 のデータは摩擦速度の精度に若干問題があると判断し RUN3, 4, 5 のデータだけを用いている。大渦モデルは K_L^+ がレイノルズ数の-0.5 乗に比例し, 小渦モデルはレイノルズ数の-0.25 乗に比例する。本実験結果では K_L^+ はレイノルズ数の-0.7 乗に比例しており, 大渦モデルに近い結果を得た。

3-3 再曝気係数の推定式

実河川の再曝気係数を推定する式は数多く提案されている。いくつかの推定式と本実験結果の適合性を検討してみた。図-7 は最も適合性の良かった Langbein and Durum の評価式 ($k_2 = 5.14UH^{-0.67}$) に対する結果を示している。

4. まとめ

本実験では大渦モデルと Langbein and Durum の評価式を支持する結果が得られたが今後さらに実験データの精度と量を向上させ検討を続ける必要がある。