

京都大学 学生員 ○崎谷健太  
 京都大学 正会員 山上路生  
 京都大学 フェロー 榎津家久

## 1. はじめに

連続水制は河川養生の手法として再評価されている。その利用法の1つとして、水棲生物の活動場所として連続水制によって生じるワンドを利用しようとするものである。特に流域下流部では、昼夜の溶存酸素濃度に大きな差が生じることが知られており、河川の再曝気能が生息可能な生物量を抑制する可能性がある。したがって連続水制によるワンド内の酸素濃度制御が出来ることが望ましく、その物理的な再曝気速度を知ることは有意義であると考え。本研究では連続水制を伴う開水路のガス交換速度の計測より、ガス輸送特性の解明を試みる。

## 2. 基礎理論

本研究では気液境界面において、気相から液相への難溶性気体が輸送される現象を取り扱う。気相、液相ともに気液境界面近傍では濃度境界層が生じており、境界面から遠ざかるにつれて濃度は急激に変化する。境界面から十分に離れた領域では乱流混合により濃度分布は一様であると考えられる。この領域をバルク領域と呼ぶ。ガス交換はこのバルク領域と濃度境界層の濃度差が駆動力となり行われると考えられている。したがってガス輸送による濃度変化はバルク層の濃度  $C_b$  と濃度境界層の濃度  $C_s$  を用いて以下のように表される。

$$\frac{dC_b}{dt} = k_2(C_s - C_b) \quad (1)$$

この時の比例定数  $k_2$  は再曝気係数と呼ばれ、ガス輸送特性を表す。榎津ら<sup>1)</sup>は  $D = (C_s - C_b)/C_s$  を用いて式(1)を以下のように変形し、開水路での再曝気係数の計測に成功している。

$$-\frac{\partial \ln D}{\partial t} - \frac{\partial \ln D}{\partial x} \frac{dx}{dt} = k_2 \quad (2)$$

本研究では、水制による死水域内と主流部とで異なる再曝気係数  $k_{2G}$ ,  $k_{2M}$  を持つとし、各領域間の質量交換も考慮する。質量交換のモデルは比例定数  $k_D$  を用いる以下のものを採用する<sup>2)</sup>。

$$\frac{dC_{ex}}{dt} = k_D(C_M - C_G) \quad (3)$$

ここで  $C_M$ ,  $C_G$  はそれぞれ主流部、死水域内のバルク濃度、 $dC_{ex}$  は質量交換による死水域内の濃度増加量である。主流部、死水域内のガス輸送を式(1)で表し、式(3)によって交換を考慮すると、それぞれの領域での濃度変化は同形の2階の微分方程式で表される。この濃度変化を  $D$  を用いて示すと以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 D}{dt^2} + (k_{2M} + k_{2G} + k_D + k'_D) \frac{dD}{dt} \\ + (k_{2G}k_{2M} + k_{2G}k'_D + k_Dk_{2M}) D = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $k'_D = (V_M/V_G)k_D$  とした。  $V_G, V_M$  はそれぞれ死水域、主流部の体積である。この解は、2種類の指数関数の和になるが、次の式(5)が成立するならば

$$\begin{aligned} (k_{2M} + k_{2G} + k_D + k'_D)^2 \\ \gg 4(k_{2G}k_{2M} + k_{2G}k'_D + k_Dk_{2M}) \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)の特性方程式の二解に大きな差が生まれ、うち一方は0に近くなる。したがって十分時間が経過した後の濃度は、片方の解が支配的となる。その結果式(4)の解は以下のように近似できる。

$$D \approx \exp(-at) \quad (6)$$

これより

$$-\frac{\partial \ln D}{\partial t} - \frac{\partial \ln D}{\partial x} \frac{dx}{dt} = a \quad (7)$$

となり榎津らの方法が適用できる。この  $a$  は質量交換も加味した平均的な再曝気係数である。本論文ではこれを連続水制領域での再曝気係数とみなし、 $k_2$  と表す。

## 3. 計測方法と水理条件及び計測結果

本研究で用いた水路は全長 1600cm、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型水槽である。水流部は循環式で、インバーターモーターによって流量の自動制御が可能になっている。水路側部及び水路底面計測部が強化ガラス製で、その他はスチール製である。この水路の中央部片側側面より 1cm のところにアクリル製の仕切

り版を流下方向に 990cm にわたって設置し、仕切り版にアクリル製のブロックを設置することで連続水制を再現した。アクリルブロックは幅 5cm、高さ 7cm、厚さ 1cm で、水制のジオメトリーによって 32 個から 165 個を 990cm の仕切り版に敷き詰めた。主流部幅  $B_M=34\text{cm}$ 、水制幅  $B_G=5\text{cm}$  で、水制は水路床、側壁に対して垂直に設置し、不透過非越流である。水制間隔  $L_G$  は、5cm、7cm、11cm、15cm、32cm の 5 種類とした。水制内と主流部の水路床は平坦で段差はなく、勾配は 1/1000 とし、また水深  $h=5\text{cm}$ 、主流部の断面平均流速  $U_M=12\text{cm/s}$  とした。代表速度に断面平均流速、代表長さに水深を選んだ場合、フルード数は 0.17、動粘性係数を水温 19.5°C の値  $0.01014\text{cm}^2/\text{s}$  とするとレイノルズ数は 5769 である。濃度計測は主流部中央、半水深の濃度が主流部のバルク濃度で評価できるとして、東亜 DKK 社製 DO 計を用いて計測した。計測地点は水制領域の上流端から 40cm の地点と 890cm の地点とした。まず無水亜硫酸ナトリウムで水槽中の DO がほぼ  $0\text{mg/l}$  になるまで酸素を十分に脱気する。その後、気液界面を通じて空気層からのガス輸送によって上昇する DO 濃度を、その時間変化がなくなるまで計測した。計測時間は 30~36 時間程度で、計測結果は DO 計に接続された AD 変換ロガーによって 1Hz で自動的に記録した。ガス輸送速度の計測結果に明確な温度依存性が見られたため、室温をエアコンで 20.5°C、水温を 19.5°C に調節して計測した。

計測によって得られた濃度の時間変化を図-1 に示す。図-1 で示したケースは  $L_G=32\text{cm}$ 、すなわち死水域のアスペクト比  $B_G/L_G=0.16$  のケースで、緑の線が下流側、オレンジの線が上流側の計測結果であり、青い線、赤い線はそれぞれ下流、上流側の観測結果の近似直線である。これより計測結果は、 $t=2 \times 10^4(\text{s})$  頃

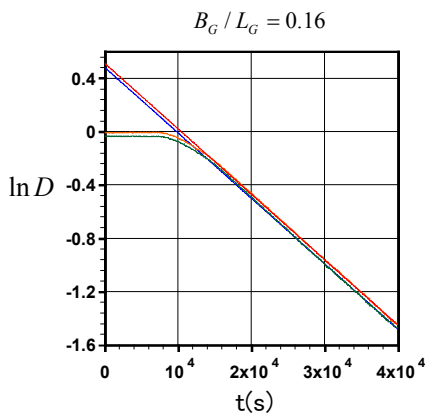


図-1 濃度の時間変化

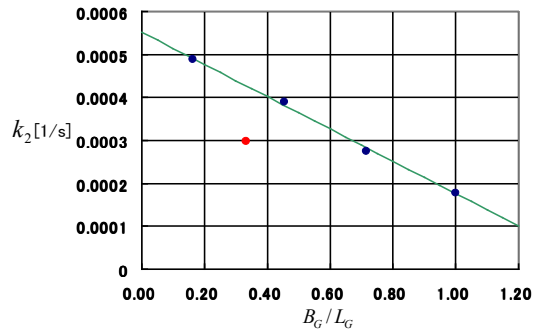


図-2 再曝気係数と死水域のアスペクト比の関係

から十分平行な直線に載っており式(6)に示した様な近似が成り立っていることがわかる。ただしこれからのみでは、死水域 - 主流間の質量交換が無視できる条件だったのか、質量交換を加味しても禰津らの方法が計測可能であったのか判断できない。

$B_G/L_G=0.16$  のケースのみならず、全ての実験ケースにおいても同様に濃度変化は直線で表されたので、式(7)で表される再曝気係数  $k_2$  をアスペクト比毎に算出した。図-2 にその結果を示す。赤い点で示した  $B_G/L_G=0.33$  のケース以外は同一直線上に載っていることがわかる。これは水制間隔  $L_G$  が大きくなるほど再曝気係数  $k_2$  が大きくなることを示しており、乱れの成長との関係が示唆される。 $B_G/L_G=0.33$  のケースにおいては、流れ場との関係を加味しつつ、今後検討を加えていく。

#### 4. 結論

連続水制を伴う開水路での DO 濃度計測により、以下のような知見が得られた。

- 連続水制を伴う開水路でも（交換が無視出来るにしろ出来ないにしろ）開水路と同様に禰津らの方法が適応できることがわかった。
- 水制間隔が大きくなると、同一の水理条件でも再曝気係数が大きくなることがわかった。
- 再曝気係数の変化は死水域のアスペクト比  $B_G/L_G$  に比例することが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 禰津家久, 中山忠暢, 井上理恵: 水・空気界面での乱流構造が気体輸送に与える影響, 応用力学論文集, Vol.2, pp.673-684, 1999.
- 2) 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, 2008.