

東京大学工学部都市工学科

正員

杉木昭典

同上

学生員

安中徳二

建設省土木研究所

正員

〇村上健

1. 流水における再曝気

1) 再曝気の理論の評価

現在の所再曝気の理論は、Churchill等の次元解析も利用した方法を除けば、2境膜理論から発展した理論が主体であり、最も代表的な理論として表面更新説がある。表面更新説は、Lewis, Whitman等の2境膜理論 → Higbie等の境膜浸透説 → Dankwertsの境膜浸透説 → O'Connor-Dobbinsの表面更新説 → Dobbinsの表面更新説という過程を経て発展してきた。2境膜理論から発展した理論には、その他、Levichの理論がある。Levichの理論では、2境膜理論と同様に自由表面では表面張力の影響が大きいためには乱れは消滅してしまい、定常的に液フィルムが存在していると考えられている。このフィルムは厚さとして一定とせず、乱れの強さ、表面張力、密度によってフィルムの厚さを変えている。これ等の諸理論の違いは、表面が更新するかどうか；更新するとすれば、その週期は一定と考えるか、或いは確率分布といったものを考える必要があるか；フィルムの厚さなどの様に表わすか、等々の点に関する仮定の違いに起因する。

i 表面の更新について。表面の更新があるかないかについては、表面張力の影響などの程度に評価するにかかっているが、いづれにしても、実験的に証明する以外に方法はないと思われる。表面更新説では、ある時間の間表面は動かないで静止しており、その後瞬間的に表面が更新され、次に更新される迄は又静止しているというモデルを考えているが、このモデルはかなり仮想的なものであるから、表面更新説をとるとすれば、厳密には、連続的な更新を考えたモデルを導入する必要がある。

ii 表面更新率及びフィルムの厚さについて。Dankwertsが導入した表面のageの確率的な分布を考えたとすれば、表面での乱れの速度の確率的な分布も考えたことになるので、対応する乱れのスケールの分布がある筈であり、表面の更新に關与する渦のスケールを一定とするのは妥当ではない。従って、逆に渦の大きさも一定又は平均的なある大きさとするならば、表面のageについても平均的なageも考えて差支えないと思われる。なお、Dobbinsは自由表面附近での乱れの消散スケールと $(\nu^3/\epsilon_s)^{1/4}$ に比例するとしたが、これは無次元パラメータが ν と ϵ_s のみの時であることであって、表面張力の影響がかなり支配的な場合には正しくない。

以上述べた様に、再曝気については未だ完成された理論はなく、表面更新があるかないかについて之を検討する必要がある。そこで、ここでは自由表面に定常的な液フィルムが存在すると仮定するLevichの理論が、流水における再曝気に適用できるかどうかを主として検討することにした。

2) 実験結果及び考察

Levichの理論は、攪拌槽の自由表面におけるガス吸収については良く一致するという実験結果があ

るが、²⁾ この理論が流水における再曝気に適用できるとかは未だ検討されていない。

Levich によれば酸素移動係数 K_L は次の様に表わされる。

$$K_L = \frac{D_M}{\delta} = C_1 \sqrt{\frac{D_M \rho U_0^3}{\sigma}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで D_M : 酸素の水中での分子拡散係数, δ : 液フィルム厚さ,
 ρ : 密度, σ : 表面張力, U : 平均流速に対応する渦の特性流速で, 表面張力の影響で平均流速の勾配がなくなる深さでの水深方向の変動流速, この深さを λ とすれば, 次元解析より $\lambda \approx \frac{\sigma}{\rho U^2}$

U はフランドルの混合距離理論により, 次の様に表わすことができる。

$$|U| \approx |u| = \left| l \frac{dU}{dy} \right| \quad u; \text{流下方向の変動流速, } l; \text{混合距離, } U; \text{平均流速}$$

混合距離 l は表面からの距離に比例するとすれば, λ の所の混合距離は

$$l = C_1 \lambda = C_2 \sigma / \rho U^2$$

又, 平均流速は対数分布をしているとして

$$\frac{dU}{dy} = \frac{1}{\kappa y} \left(\frac{U_0}{\rho} \right)^{1/2} = \frac{1}{\kappa y} (gRI)^{1/2} \quad \left(\frac{U_0}{\rho} \right); \text{摩擦速度, } g; \text{重力の加速度, } R; \text{径深}$$

I ; 勾配
 λ の厚さを無視して $y = H$ (H : 水深) とすれば

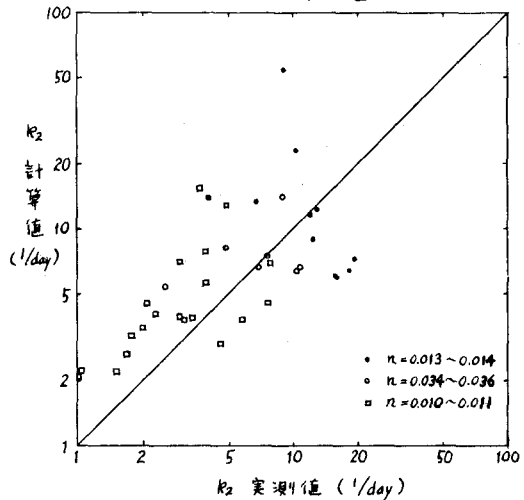
$$|U| = C_2 \frac{\sigma}{\kappa \rho H} (gRI)^{1/2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

(1), (2) 式より, 再曝気係数 k_2 は

$$k_2 = \frac{K_L}{H} = C \frac{g^{1/4}}{\kappa^{1/2}} \cdot \frac{D_M^{1/2} (RI)^{1/4}}{H^{1/2}}$$

模型水路を用いて種々の水理条件の下で再曝気係数を求め, (3) 式の C を求めると, 平均して 0.75 であつた。(実験方法等については参考文献 3) に報告してある。) (3) 式において $C = 0.75$ として計算した k_2 と実験の k_2 との比較を図-1 に示す。図-1 によると, $n = 0.010 \sim 0.011$ の場合は比較的一致しているが, 他の場合は殆んど関連がない程ばらついてける。実験の精度にもいくらか問題があるので, 早急に結論を出すのは控えたが, この実験でみる限りは, Levich の理論はあてはまらない様に思われる。

図-1 Levich の理論による計算値と
 実験値との比較

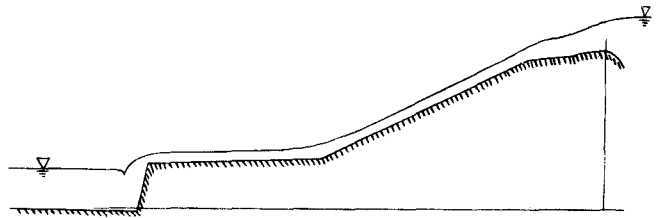


2. 堰による再曝気

堰による曝気は再曝気の特徴な形と考えられ、河川に堰が設けられている場合などでは、堰での落下に伴う溶存酸素の変化が計算できれば、酸素の収支を計算するのに都合が良い。又、防潮堰を新たに設ける場合など、堰を設置するのが水質的に有利か不利かの見当をつけることができる。この問題については、チームズ川での実測をはじめ、2, 3の研究があるが、未だ研究途上の問題である。

実験に用いた水路は流水の再曝気に用いたのと同じ水路で、水路中に模型堰を置き、堰の落下高を6〜40 cm に変化させ、堰の上流と下流との間の溶存酸素の変化を調べた。模型堰としては、2次元の刃形全幅堰と図-2 に示す様な実際河川(石神井川)の段落ちの模型の2種類の模型を用いた。前者の模型では堰からの水は自由落下し、後者の模型では射流になる。

図-2 石神井川の堰の模型



堰での溶存酸素の変化は、溶存酸素不足量比で表わすのが便利である。

$$r = \frac{C_s - C_u}{C_i - C_u}$$

ここで、 r : 溶存酸素不足量比, C_s : 飽和溶存酸素量, C_u : 堰の上流側の溶存酸素量, C_i : 堰の下流側の溶存酸素量

この様に表わした場合、 r は落下高 H の関数として経験的に次の様に表わされる⁴⁾。

$$r_T = 1.0 + f_H H e^{T-T_0}$$

----- (3)

ここで、 r_T : $T^\circ\text{C}$ での溶存酸素不足量比, f_H : 基準の温度 $T_0^\circ\text{C}$ での係数, e : 温度係数
模型堰を用いた実験結果を図-3 に示す。実がいくらあばうつていりるが、(3)式の形に整理すると、

$$\text{刃直全堰} \quad r = 0.0047H + 1$$

H : 水深 cm (平均水温 25°C) ---- (4)

$$\text{図-2の堰} \quad r = 0.0023H + 1$$

H : 水深 cm (平均水温 6°C) ---- (5)

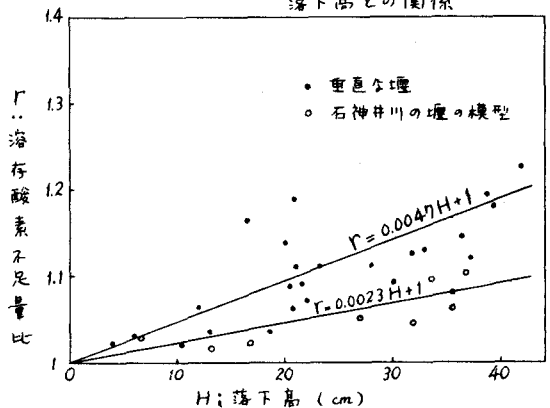
以上の2つの実験式は水温がかなり異なるので、温度係数 e を1.016として(5)式を 25°C に換算すると、

$$r = 0.0031H + 1$$

この様に f の値は堰の形状によってかなり異なり、図-2の様な堰の場合、自由落下の場合の約 $1/1.5$ になる。又、Gameson等によれば、多段の段落ちの場合は、自由落下の1.3倍になるとされている。

f に関係する因子は、堰の形状の他に、水質、下流側水深、下流側粗度等々も関係する。

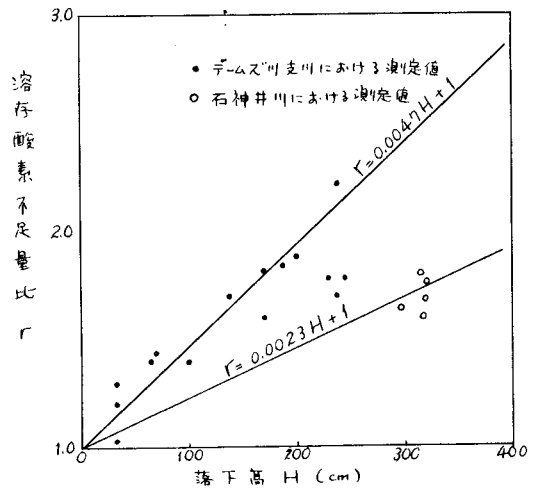
図-3 模型堰による溶存酸素不足量比と落下高との関係



実験式と実際河川での堰での曝気が一致するかどうかを調べるために、垂直な堰については、Gameson 等がテムズ川の支川の堰で測定した値と比較し、石神井川の段落ちの模型については、現場での実測値と比較した。結果を図-4に示すが、(4)、(5)の実験式と非常に良く合うことがわかった。

堰における曝気は、落下する水の曝気、落下した際の激しい表面攪乱による曝気、飛び散った水塊の曝気、水面下に巻き込んだ気泡によるバブルエアレーションに細分できると考えられるので、(3)式の様な単純な式で表わせるかどうか尚疑問が残っているのを、今後更に研究して行く積りである。

図-4 実験公式と実測値との比較



参考文献

- 1) G. Levich, "Physicochemical Hydraulics", Prentice-Hall, Inc. 1962
- 2) 片岡 広也 "乱流域の攪拌槽自由表面におけるガス吸収について", 化学工学 第30巻, 第5号
- 3) 杉本昭典他 "再曝気に関する2,3の考察", 土木学会 第21回年次学術講演会, 1966
- 4) A.L.H. Gameson "The Effect of Temperature on Aeration at Weirs", Wat. & Wat. Engrng., Nov., 1958