

開水路における自然浄化機能に関する研究

長 勝史

(生産環境工学講座)

平成6年8月10日受理

Studies on Natural Purification Mechanism in Open Channel

Katsushi CHO

(Laboratory of Water Control and Reclamation Engineering)

緒 言

近年、農村地区における都市混住化により水域の汚濁が目立つようになり、農業用水としての水質や水環境が問題になっている。また、農村総合整備の一環としての農業集落排水事業においても、水処理後の放流水路での水質悪化も懸念されている。このような汚濁水は水域における自然浄化機能によって浄化が可能である。すなわち水路を流下する過程において、生物化学的分解や吸着などにより汚濁物質は時間的に減少していく。この際、生物化学的分解や窒素などの硝化反応のためには酸素が必要である。もし、消費される以上の酸素が流水中に供給されなければ、流水の汚濁は緩和されないことになる。流水中の溶存酸素、すなわち DO 濃度は流下過程での酸素の消費と供給とのバランスによって決まる。

酸素は大気中に約21% (容積比) 含まれ、流水中への酸素の吸収すなわち再曝気は大気と水域との気液界面を通して起こる。その再曝気量は、水路の水理特性によって異なると考えられる。ここでは大気から吸収される酸素、いわゆる再曝気による浄化能力と水路の水理的な諸要素との関係について実験的検証を行い、積極的に再曝気能力を持たせる水路流況の把握を図る。さらに、水路中に跳水現象が生じている場合に、その跳水による再曝気能力についても実験的な検討を行う。

再曝気過程の理論的考察

1. 溶存酸素の水質方程式

水路流水中の溶存酸素に関する一次元の水質方程

式は次式で表される¹⁾。

$$\frac{\partial D}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + V \frac{\partial D}{\partial x} + K_1 L - K_2 D - \alpha \quad \dots(1)$$

ここで L : 汚染物質の濃度, t : 時間, D_x : 流下方向 (x) の拡散係数, V : 平均流速, K_1 : 脱酸素係数, K_2 : 再曝気係数, α : 光合成による酸素生産率, $D = (C_s - C)$: 溶存酸素不足量, C_s : 溶存酸素飽和量, C : 溶存酸素量。

上式において $K_1 L$ が流下時の流水中で汚濁水を浄化するために消費される酸素量を, $K_2 D$ が流水中に吸収される酸素量を表している。

ここでは水路の水理条件と酸素吸収能力すなわち再曝気係数 K_2 との関係を実験的に検証することになるので, (1)式において, 実験水路では汚濁物質は流入することはないとして $L = 0$, また光合成は起こらないものとして $\alpha = 0$, さらに拡散を無視した定常状態であるとして(1)式を解くと

$$D = D_a \exp(-K_2 x / V) \quad \dots(2)$$

となる。ここで, D_a は酸素不足量の境界条件。これより再曝気係数 K_2 は

$$K_2 = (\ln D_a - \ln D) / (x / V) \quad \dots(3)$$

で表される。再曝気係数は一般的には常用対数を用いて計算されることが多いことから

$$k_2 = (\log D_a - \log D) / (x / V) \quad \dots(4)$$

を用いる。

ここでは, 水路流況と再曝気係数 k_2 との関係を実験的に求めることになる。

2. 流水への酸素移動

水路流水への酸素移動すなわち気相 (大気) から液層 (流水) への移行は, 一般に①気相本体から気

液界面への移動, ②界面での気相から液層への移行, ③界面から液層への移動によってなされると考えられている³⁾.

体積 W の水塊が表面積 A で大気と接している場合, 再曝気による酸素濃度の変化は, 次式で表される³⁾.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_L A}{W} (C_s - C) = k_2 (C_s - C) \quad \dots\dots(5)$$

ここで K_L : 物質移動係数 (液膜係数), W : 水の体積.

これを積分すれば再曝気係数は次式ようになる.

$$k_2 = \{\text{Log}(C_s - C_0) - \text{Log}(C_s - C)\} / T \quad \dots(6)$$

ここで C_0 : 溶存酸素量の初期値, T : 接触時間.

物質移動係数 K_L に関与する因子としては, 酸素の水中での拡散係数, 水の密度, 表面張力などが考えられる.

実験装置と方法

実験には Fig.1 に示すように, 長さ 8.5m, 幅 40cm の床面はステンレス床, 側壁はアクリル製の勾配可変型水路を用いた.

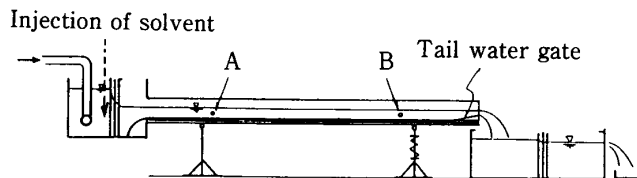


Fig.1. Experimental setup.

一般に上水道水中の溶存酸素は飽和状態であるので, 再曝気量を計測するには実験水を不飽和酸素の状態にする必要がある. その溶存酸素の調整には, 亜硫酸ナトリウム (Na_2SO_3) と, 触媒として塩化コバルト (CoCl_2) によって, 無酸素状態の水を作り, これを上流測の水槽から連続的に注入して, 流水の溶存酸素の調整を行った.

実験では, 水路上流側 A 地点を溶存酸素の基準点とし, 下流側 B 地点での酸素濃度の増加を水表面からの再曝気によるものとした. また, 飽和溶存酸素量 C_s から溶存酸素量 C を差し引き, 溶存酸素不足量 D とした. なお, 溶存酸素濃度は, A・B 両地点で酸素ビンに採水したものを, DO メータで計測した.

水路条件の設定には, 流量と水路勾配を各種変更して行った.

実験結果と考察

1. 等流流下時の再曝気係数

種々の水路の水利条件下での再曝気係数 k_2 の実験結果を Table 1 に示す. 再曝気係数 k_2 は測定した上流側溶存酸素濃度 C から求めた酸素不足量 D_u と下流側溶存酸素濃度 C から求めた酸素不足量 D_D を次式 (前述の(4)式より) に代入して算出している.

$$k_2 = (\text{Log}D_u - \text{Log}D_D) / (L/V) \quad \dots\dots(4)$$

ここで, L は上・下流間の距離で $L=4.0\text{m}$, V は平均流速.

Table 1. Reaeration coefficients and hydraulic factors (uniform flow)

Q (l/s)	I	H (cm)	V (cm/s)	Fr	t (°C)	k_2 (t °C 1/h)	k_2 (20°C 1/h)
3.0	1/50	1.12	67.0	2.02	15.4	9.67	10.90
	1/50	1.05	71.4	2.23	10.6	9.70	12.50
	1/70	1.29	58.1	1.64	13.7	6.13	7.24
	1/150	1.48	50.7	1.33	12.2	7.40	9.10
	1/600	2.49	30.2	0.61	12.2	2.70	3.30
	1/900	2.74	27.4	0.53	18.2	3.90	4.00
5.0	1/25	1.24	100.8	2.89	14.6	20.86	24.12
	1/50	1.67	74.9	1.85	18.1	14.75	15.46
	1/50	1.45	86.2	2.29	11.4	9.00	11.30
	1/70	1.85	67.6	1.59	15.0	10.67	12.12
	1/150	2.01	62.3	1.40	10.8	7.60	9.70
7.5	1/25	1.76	106.5	2.57	13.7	15.06	17.80
	1/50	2.21	84.8	1.82	14.0	15.94	18.68
	1/70	2.35	79.8	1.66	11.3	12.01	15.16
10.0	1/25	2.08	120.2	2.66	13.2	11.92	14.30
	1/50	2.72	91.9	1.78	14.1	15.42	18.04
	1/70	2.96	84.5	1.57	13.0	5.41	6.53

Q: Discharge I: Channel slope H: Depth V: Velocity Fr: Froude number
t: Water temperature k_2 : Reaeration coefficients

再曝気係数 k_2 は 1 時間当たりの値で示している。また実験時の水温にばらつきがあるため、 20°C の値に補正した再曝気係数 k_2 の値も並記している。その温度補正は次式を用いた¹⁾。

$$k_2(20^\circ\text{C}) = k_2(t^\circ\text{C}) \theta^{t-20} \dots\dots\dots(7)$$

ここで t : 採水時の温度, θ : 温度影響係数 $\theta = 1.027$

大気から水域に移動する酸素, すなわち再曝気による酸素濃度の変化は前出の(5)式で表されるが, 式中の接触面積 A に影響を与える因子としては, 流水表面での比表面の増大に關与する水面近傍の乱れの強度が考えられ, その水面の乱れの強度は平均流速 V に比例的であると考ええる。

また(5)式の水の体積 W に關与する因子としては流下距離と水深とが考えられるが, 一定流下距離(一定接触時間 T) では, 水深 H のみによって決まる。

したがって, 再曝気係数 k_2 に關与する因子としては温度を一定 (20°C の値に換算) であるとすれば

$$k_2 = f(V, H) \dots\dots\dots(8)$$

となる。そこで

$$k_{2p} = aH^bV^c \dots\dots\dots(9)$$

として, 実験結果を基に最小 2 乗法で(9)式の係数 a, b, c を決定すると

$$k_{2p} = 0.086 H^{-0.16} V^{1.17} \dots\dots\dots(10)$$

となる。ここで k_{2p} は計算値の再曝気係数である。この結果を図示したのが Fig.2 である。縦軸が測定

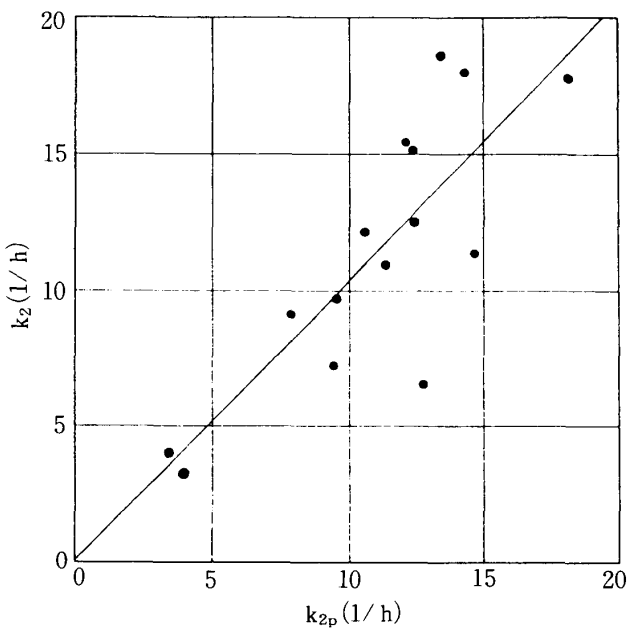


Fig.2. Relation between re-aeration coefficient and hydraulic factors (uniform flow).

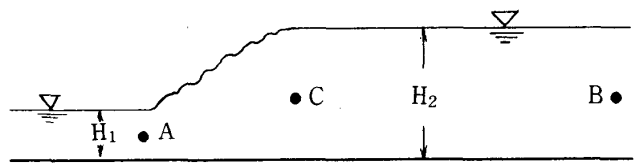


Fig.3. Measurement points in case of hydraulic jump.

値の再曝気係数 k_2 を, 横軸が(10)式で計算した再曝気係数 k_{2p} である。このときの相関係数は $r = 0.81$ とかなり良好である。したがって, 等流状態で流下している水路での再曝気係数 k_2 と水路の水理量との関係は(10)式で予測できる。

この結果から, 等流状態で流下している場合の水路での再曝気能力を増加させるには, 水深は浅く, 流速が大きな水路流況を構築すればよいことになる。

2. 跳水現象による再曝気係数

跳水時には水流の激しい攪乱により, かなり大きな再曝気能力があると思われるので, ここでは跳水による再曝気能力について検証した。

実験では流量と可変水路の勾配を射流状態になるように設定し, 水路下流端の水位調整ゲートを上げて, 跳水を発生させる。Fig.3 に示すように採水は, 跳水直前の A 点と, 跳水による水面の乱れが治まった B 地点で行った。ただ, 跳水直後の C 地点と B 地点との間には前述の等流状態での流水表面からの酸素吸収も含まれる。そこで BC 間の再曝気量については前述の(10)式に, その条件のときの水理条件 (H, V) を代入してその間の再曝気量を算出して差し引き, ここでは純粋に跳水現象のみによる再曝気量とした。種々の水理条件下での実験結果を Table 2 に示す。ここでの跳水による再曝気係数 k_j は, 単位時間当たりの値で示している。なお, ここでも実験時の水温にばらつきがあるため, (7)式によって 20°C の値に補正した再曝気係数 k_j も並記している。

跳水による再曝気量すなわち酸素吸収量は, 跳水の強度を表すフルード数 Fr に一義的に關係するものと考え, 跳水前のフルード数 Fr_1 と跳水による再曝気係数 k_j との關係を Fig.4 に示す。ここで縦軸を $k_j \times Q$ としたのは, k_j が単位時間当たりの溶存酸素濃度 (ppm) の増加であるので, 跳水によって吸収される酸素の絶対量としては, 流量 Q を掛ける必要があるためである。しかしながら Fig.4 より明ら

Table 2. Reaeration coefficient and hydraulic factors (hydraulic jump)

Q(l/s)	I	H ₁ (cm)	V ₁ (cm/s)	Fr ₁	t(°C)	k _j (t °C 1/1)	k _j (20°C 1/1)
3.0	1/50	1.18	63.5	1.87	14.7	0.018	0.021
	1/70	1.32	56.8	1.58	14.3	0.032	0.023
5.0	1/25	1.38	90.6	2.46	11.5	0.029	0.036
	1/50	1.72	72.7	1.77	11.4	0.022	0.028
	1/70	1.86	67.2	1.57	12.6	0.037	0.045
7.5	1/25	1.78	105.3	2.52	12.8	0.026	0.031
	1/50	2.28	82.2	1.74	13.0	0.019	0.023
	1/70	2.51	74.7	1.51	13.1	0.041	0.049
10.0	1/25	2.33	107.3	2.25	13.2	0.036	0.043
	1/50	2.96	84.5	1.57	13.1	0.057	0.069
	1/70	3.18	78.6	1.41	13.7	0.067	0.079
20.0	1/25	4.02	124.4	1.98	12.2	0.202	0.249
	1/50	4.91	101.8	1.47	12.7	0.082	0.100
	1/70	5.32	94.0	1.30	12.0	0.062	0.077
30.0	1/25	5.43	138.1	1.89	12.3	0.028	0.034
	1/50	6.41	117.0	1.48	13.5	0.086	0.102
	1/70	6.75	111.1	1.37	12.6	0.149	0.181

Q: Discharge I: Channel slope H₁: Depth V₁: Velocity Fr₁: Froude number
 t: Water temperature k_j: Reaeration coefficients

かなように、フルード数との間には明確な相関は見られない・フルード数の範囲が狭かったことにもよるが、跳水による再曝気能力は跳水の強度を表すフルード数のみに関与するものではないと考えられる。流水への酸素吸収は、(5)式に示すように水と空気

(大気)の接触面積に関係するが、これは跳水前に有していた比エネルギーE₁(H₁ + V₁²/2g)に比例的ではないか考え、

$$k_{jp}Q = aE_1^b \dots\dots\dots(11)$$

として、実験結果を基に最小2乗法によって a, b

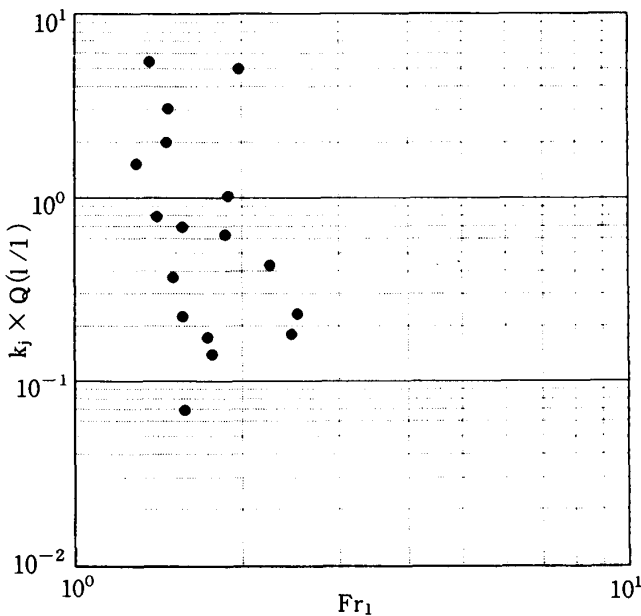


Fig.4. Relation between reaeration coefficient and Froude number (hydraulic jump).

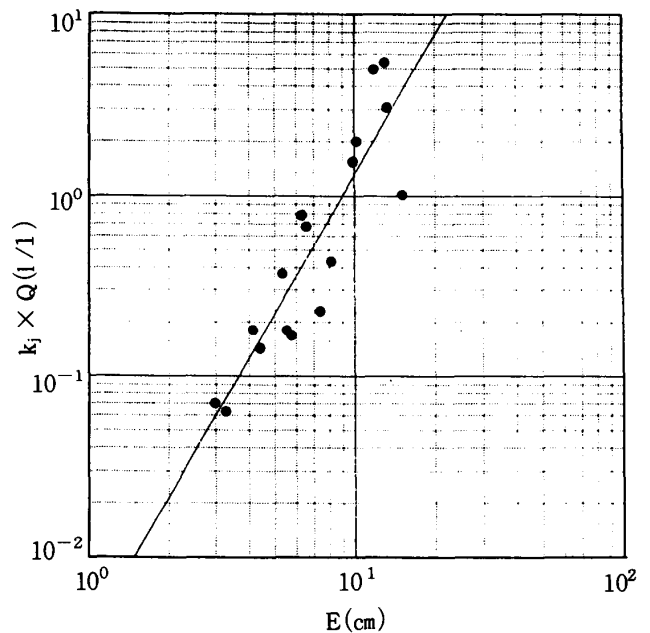


Fig.5. Relation between reaeration coefficient and specific energy (hydraulic jump).

Table 3. Comparison of reaeration potential of hydraulic jump with that of uniform flow.

Q(l/s)	I	Fr ₁	k _j (1/l)	T ₁ (sec)	L ₁ (m)	T ₂ (sec)	L ₂ (m)
3.0	1/70	1.58	0.023	7.6	4.34	16.5	5.24
5.0	1/70	1.57	0.045	9.4	6.33	20.2	7.63
7.5	1/70	1.51	0.049	11.1	8.32	22.3	9.86
10.0	1/70	1.41	0.069	12.5	9.83	22.4	11.33
20.0	1/70	1.30	0.100	17.0	15.95	26.7	17.82
30.0	1/70	1.37	0.181	19.9	22.16	34.0	25.25

Q: Discharge k_j: Reaeration coefficients of hydraulic jump

I: Channel slope Fr₁: Froude number in front of hydraulic jump

T₁, L₁: Flow time and length in front of hydraulic jump

T₂, L₂: Flow time and length in back of hydraulic jump

を決定すると

$$k_{jp}Q = 0.0036 E_1^{2.56} \dots\dots\dots(12)$$

となった。ここで k_{jp} は計算値の再曝気係数である。これを図示すると Fig.5 のようになる。相関係数も r = 0.90 とよく、跳水による再曝気能力は、跳水前に持っていた比エネルギーに比例するものと考えられる。(12)式を用いれば、流量や水理条件が与えられると、跳水による再曝気量を求めることができる。

跳水による再曝気量は等流で流下している場合の、どの程度の流下時間、流下距離に相当するかを試算してみた。実験で得られた等流で流下している場合の再曝気係数の式(10)を用いて、跳水前・後の水理条件(水深 H, 流速 V)を代入して計算した跳水前の流下時間 T₁ と流下距離 L₁ および跳水後の流下時間 T₂ と流下距離 L₂ を Table 3 に示す。表から明らかのように、跳水による再曝気量は、等流で流下している場合の流下距離 10~20m 程度に相当し、流量が多くなるに伴って大きな流下距離に相当しているが、予想していたほどの大きな再曝気量ではないようにも思われる。しかし実際の水路では一般に流量が大きいため、等流で流下している場合には水深が大きくなり、再曝気能力はそれほど大きくなりないのに対して、跳水の場合には流量、比エネルギーとも大きいためかなりの再曝気量となり、等流で流下している場合の数 km に相当することもあり得ると考えられる。

要 約

近年、水域の汚濁が目立つようになってきている。このような汚濁水は水域における自然浄化機能によって浄化が可能である。この際、生物化学的分解や窒素などの硝化反応のためには酸素が必要である。もし、消費される以上の酸素が流水中に供給されなければ、流水の汚濁は緩和されないことになる。ここでは大気から吸収される酸素量、いわゆる再曝気による浄化能力と水路の水理的な諸要素との関係について実験的検証を行なった。その結果を要約すれば次のようになる。

1. 等流における再曝気係数と水路の水理要因との関係は(10)式で与えられる。すなわち大きな再曝気量を得るためには水深が浅く、流速が大きな水路流況を構築すればよい。

2. 跳水による再曝気係数は(12)式で与えられる。すなわち跳水前の比エネルギーと流量に比例して増加する。実際の水路では流量が大きく比エネルギーも大きいので、大きな再曝気能力が期待できる。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：水理公式集。p.464-462(1971)
- 2) Elmore, H. L. and West, W. F. : Effect of water temperature on stream reaeration. A. S. C. E., 87(SA6), p.59-71 (1961)
- 3) 宗宮 功編：自然の浄化機構。p.211-217(1990)

Summary

Recently, in public water body, conspicuous water pollution has been prevailing. The self purification mechanism in a water basin makes it possible to clarify such water pollution. But in this occasion, in order to carry out the biochemical decomposing and nitrification of nitrogen, the presence of oxygen is indispensable.

Accordingly, unless the amount of oxygen supplied from atmosphere exceeds that of oxygen consumed, it becomes impossible for purification to go on. In this study some experimental examinations were made in order to clarify the relation between the rate of atmospheric reaeration and hydraulic factors of the open channel. The main findings in the present study can be summarized as in the following:

1. Under a uniform flowing, the relation between reaeration coefficients and hydraulic factors of open channel can be expressed by eq. (10). But this it is meant that a production of bulky reaeration can be brought out by making the channel depth shallower and the flowing velocity in the channel faster.

2. Reaeration coefficients derived from atmosphere through hydraulic jump can be expressed by eq.(12). This is to say that reaeration from atmosphere increases in proportion to the increasing of the specific energy in front of hydraulic jump and discharge. In practical channel in which both discharge and specific energy are quite prominent, production of bulky reaeration may be expected.