

落差工における再曝気能力に関する研究

長 勝史

(生産環境工学講座)

平成8年8月10日 受理

Studies on Reaeration Capacity in Drop Flow

Katsushi CHO

(Laboratory of Water Control and Reclamation Engineering)

緒 言

最近、都市近郊の農村地域では混住化、宅地化等によって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おり、その結果として、作物の生育・収穫・品質等にさまざまな影響が出てきている。このような水質汚濁の原因の一つとして、水中の溶存酸素(DO)の不足が挙げられる。すなわち、流水が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が、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もある。

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が、その再曝気能力は、水路の水理特性によって異なると考えられる。ここでは水路中に設置された落差工における再曝気能力について実験的な検証を行い、積極的に再曝気能力を持たせる水路流況の把握を図る。落差工は水路の適正な勾配では余剰の落差を生じる場合に、急段落と減勢施設により落差を調整して水路の安全性の確保を図るための施設である。落差工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推測される。

再曝気過程の理論的考察

一般に、流水への酸素移動すなわち気相(大気)から液相(流水)への移行は、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相への移行、③界面から液相への移動によってなされると考えら

れている³⁾。

完全混合状態にある体積V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⁾。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_L A}{V} (C_s - C) = k_2 (C_s - C) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、C：溶存酸素量、C_s：溶存酸素飽和量、t：時間、K_L：物質移動係数(液膜係数)、k₂：再曝気係数。

これを積分すれば次式のようになる。

$$D = D_a \cdot 10^{(K_L A / V \cdot T)} = D_a \cdot 10^{(-k_2 \cdot T)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、D：溶存酸素不足量 D=(C_s-C)、D_a：溶存酸素不足量の初期値 D_a=C_s-C₀、C₀：溶存酸素量の初期値、T：空気と水との接触時間。

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。この物質移動係数K_L、あるいは再曝気係数k₂が水路における水理条件によって決まる値である。

落差工では、通常の水路での流れとは全く異なる大きな酸素吸収が予測される。落下下部での酸素吸収には、①落水柱による酸素吸収、②巻き込まれた気泡からの酸素吸収、さらに③落下流によって激しく攪乱された水表面からの酸素吸収、が関与すると考えられる。通常①は他に比べて寄与が小さいと思われる。これらの寄与を個別にとらえるのは困難なので、ここでは落下直前地点から落下後の下流部でほぼ通常の流れに回復した地点までを、総括的に一つの物質移動過程と考える。したがって、落差工における再曝気には、(2)式より再曝気係数を次式のように定義する。

$$K_L A = (\text{Log} D_U - \text{Log} D_D) (V/T) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 D_U : 落下前の酸素不足量, D_D : 落下後の酸素不足量.

また落差工での再曝気が行われる水流が存在する体積を V とし, 落下流量を Q とすると, 落下部での接触時間 T は $T=V/Q$ となるので

$$K_L A = Q(\text{Log} D_U - \text{Log} D_D) \dots\dots\dots(4)$$

とし, ここでは落差工の再曝気能力を(4)式の再曝気係数 $K_L A$ で表示することとする.

実験装置と方法

実験には Fig. 1 に示すように, 幅40cmの水路に

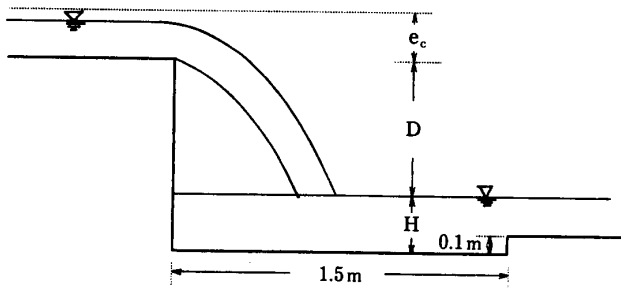


Fig. 1. Experimental setup.

一般的な落差工として供用されている規格に準じた落差工を設置し, 帰還水路につなぐ循環水路を用いた.

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, これを上流側の水槽から連続的に注入して, 流水中の溶存酸素量の調整を行った.

実験では, 落差工直前での流水中の溶存酸素量を基準点とし, 落差工直後地点での流水中の酸素濃度の増加を再曝気量とした. なお, 溶存酸素濃度は, 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.

実験では, 流量と落差工の落下高さを変量として進めた.

実験結果と考察

落差工の流下流量と落下高さを再曝気能力の水力要因とした実験結果を Table 1 に示す. なお実験時の水温にばらつきがあるため, 20℃の値に補正した

Table 1. Reaeration coefficient and hydraulics factors

Q (l/s)	e_c (cm)	D (cm)	H (cm)	$K_L A$ (cm ² /s)
5.0	3.8	44.7	10.7	483
		58.4	12.0	708
		81.5	12.4	810
10.0	6.0	43.4	12.0	1318
		56.6	15.1	1426
		78.8	15.1	1562
15.0	7.9	41.9	13.4	1740
		54.3	16.7	1960
		77.5	16.4	2267
20.0	9.5	40.4	15.0	2231
		54.3	18.1	2432
		76.1	17.8	3209
25.0	11.4	38.6	16.8	2311
		76.1	19.4	2589
		74.8	19.1	3647
30.0	12.5	37.2	18.2	2642
		52.2	20.2	3128
		73.7	20.2	5128
35.0	13.8	35.6	19.8	2932
		49.9	22.5	3833
		71.1	22.8	5466
40.0	15.2	34.1	21.3	3352
		49.9	24.0	4381
		69.4	24.5	4995

Q : Discharge e_c : Critical specific energy H : Depth D : Height of drop $K_L A$: Reaeration coefficient

再曝気係数の値に換算している。その温度補正は次式を用いた²⁾。

$$K_L(20^\circ\text{C}) = K_L(t^\circ\text{C})\theta^{t-20} \dots\dots\dots(5)$$

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

落差工による酸素吸収は、水面の攪乱と気泡の生成によって成されるが、その酸素吸収量に關与する因子としては、落下流量 Q , 落下高さ H の流体の持つエネルギー E

$$E = w_0 \cdot Q \cdot (H + e_c) \dots\dots\dots(6)$$

に依存すると推察する。 e_c : 落下前の限界比エネルギー。

ここで落下高さ H は、落下後の水面までの高さ D (Fig. 1を参照) を基準とすれば、(4)式の落差工による再曝気係数 $K_L A$ は

$$K_L A = C \{w_0 \cdot Q \cdot (D + e_c)\}^\alpha \dots\dots\dots(7)$$

と表す。実験結果から、この関係は Fig. 2に示すようになり、相関係数も $r=0.975$ とかなり高い。最小自乗法によって(7)式は、

$$K_L A = 0.015 \{w_0 \cdot Q \cdot (D + e_c)\}^{0.861} \dots\dots\dots(8)$$

となる。ただし、単位は $\text{gf}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$ で表す。

ただ、落差工で流下した水脈は通常の落差工では底部まで達するので、(6)式の落下高さは落差工の底部までとするとも解釈できる。そこで、(6)式の H は、落差工の底部までとし、(4)式の落差工による再

曝気係数 $K_L A$ は

$$K_L A = C \{w_0 \cdot Q \cdot (D + H + e_c)\}^\alpha \dots\dots\dots(9)$$

と表す。ここで H は落下部での水深とし、 $D+H$ は落差工の高さとなる。実験結果から、この関係は Fig. 3のようになり、相関係数も $r=0.982$ と高い。最小自乗法によって(9)式は、

$$K_L A = 0.059 \{w_0 \cdot Q \cdot (D + H + e_c)\}^{0.758} \dots\dots\dots(10)$$

となった。ただし、単位は $\text{gf}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$ で表す。

落下高さを、落下後の水面までとした場合と、落差工の底部とした場合で、相関係数にほとんど差がない。この理由は落下高さや流量の変化に伴う落差工での水深 H にそれほど差がないためと考えられる。実際の落差工においても水深にはそれほど差がなく、またその水深も予測し難いため、ここでは落差工による再曝気能力の予測式として(10)式を提唱する。なお、落差工における酸素吸収に落下部の水深 H が、独自に關与することも考えられるが、実際の落差工では、Fig. 1に示すような掘込みがあるため、水深 H はある程度大きく、水深の差異は酸素吸収にそれほど大きな要因とはならないと考える。

このように、落差工による再曝気能力は、流水が落下前に持っていたエネルギーに比例するものと考えられるが、(4)式の再曝気係数 $K_L A$ の式には、すでに流量 Q が含まれているので、実際には落差工における再曝気能力は、落差工の落下高さに比例的

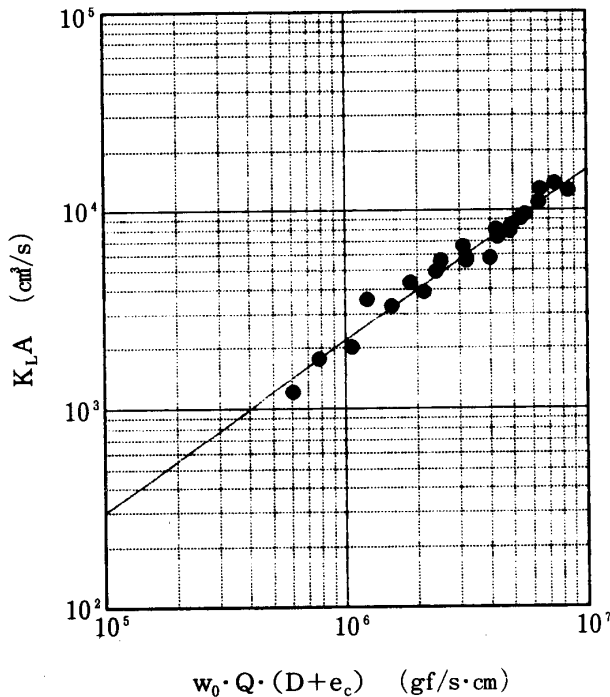


Fig. 2. Relation between re-aeration coefficient and energy of drop flow.

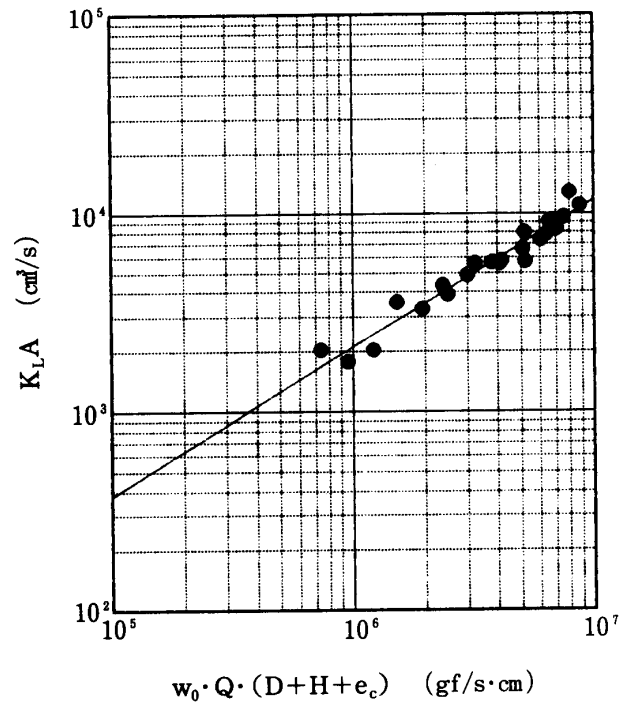


Fig. 3. Relation between re-aeration coefficient and energy of drop flow.

Table 2. Reaeration capacity in cases of non-drop flow and drop flow

Case	Q (m ³ /s)	I	H (m)	C _U (mg/l)	C _D (mg/l)
Non Drop	0.5	1/250	0.197	3.0	5.13
2 Drop	〃	1/1000	0.310	〃	6.55
Non Drop	1.0	1/250	0.310	3.0	4.19
2 Drop	〃	1/1000	0.495	〃	5.99
Non Drop	2.0	1/250	0.495	3.0	3.63
2 Drop	〃	1/1000	0.811	〃	5.61

Q: Discharge I: Channel slope H: Depth C_U: Amount of oxygen at the most upstream C_D: Amount of oxygen at the most downstream

である。いずれにしろ、(10)式を用いれば流量と落差工の高さが与えられると、落差工における再曝気量を求めることができる。

実用水路での適用

一般に落差工のない通常の水路においても、流下中に水面からの酸素吸収によって再曝気されるが、流下水深が大きい場合にはあまり効果的な再曝気能力は期待できない¹⁾。そこで、一つの例として、落差工での大きな再曝気能力を積極的に利用するための試算を行った。水平距離 L = 1,000 m, 水平落差 Z = 4 m (勾配 I = 1/250), 水路幅 B = 2 m, 粗度係数 n = 0.015 として、上流部での DO 濃度を 3.0 mg/l, 水温 20℃ (飽和溶存酸素量 C_s = 8.84 mg/l) として次のような流下条件を設定する。

① 落差工を設けずに水路勾配が I = 1/250 の水路条件。

② 段差 D = 1.5 m の落差工を水路の途中に等間隔に 2 カ所設置し、水路勾配が I = 1/1,000 の水路条件。

いずれの場合とも水路の最上流端と最下流端の標高差は同一である。なお、流下中での酸素の消費はないものとする。また、等流で流下している場合の再曝気量は落差工の場合とは異なり、次式を用いる¹⁾。

$$k_2 = 0.053H^{-1.36}V^{0.69} \dots\dots\dots(9)$$

ここで、H: 等流水深、V: 平均流速。

この再曝気係数 k₂ を(2)式に代入して酸素吸収量を求める。落差工での酸素吸収量は、ここでの実験結果から得られた(10)式で算出した。シミュレーション結果を Table 2 に示す。

流量が少ない場合 (Q = 0.5 m³/s) には、落差工

がない場合でも水深が小さく、接触時間も長くなるために、かなりの再曝気が期待でき、落差工を設置した場合とそれほど顕著な差はない。しかし、流量が多い場合 (通常の計画流量程度) は、落差工がない場合には水深が大きく接触時間も短くなるために、水面からの再曝気の程度は少なくなり、落差工を設置することによる効果が顕著に表れる。

要 約

最近、農村地域での水域の汚濁が目立つようになっており、農業用水の水質が問題になっている。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が、そ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。ここでは水路に設置された落差工における酸素吸収、いわゆる再曝気による浄化能力について実験的検証を行った。その結果を要約すれば次のようになる。

1. 落差工における再曝気係数は(10)式で与えられる。すなわち再曝気量は、落下直前の流水の持つエネルギーに比例する。

2. 流量が多い場合には落差工を設置することによる再曝気効果は、等流状態で流下している場合の水面からのみの酸素吸収量に比べて、大きな再曝気能力がある。

文 献

- 1) 長 勝史: 開水路における自然浄化機能に関する研究。鹿大農学術報告, 45, 71-76 (1995)
- 2) Elmore, H. L. and West, W. F.: Effect of water temperature on stream reaeration. A. S. C. E., 87 (SA6), 59-71 (1961)
- 3) 谷垣昌敬: 水域での酸素吸収過程。宗宮 功編, 自然の浄化機構。211-217, 技報堂出版, 東京 (1990)

Summary

Recently, conspicuous water pollutions have been prevailing at the public water bodies in the farming areas; wherein, serious considerations should be paid to the water quality in the agricultural water. Generally speaking, clarification of such water pollutions might be carried out by the self-purification mechanism in a water basin. However in this case, as a sort of the prerequisite, the existence of oxygen is necessary for the biochemical decomposition and the nitrification of nitrogen. The present experimental investigation were carried out to clarify the relationships between reaeration and hydraulic factors of the drop flow set in the open channel. The main findings in the present study may be summarized as in the following:

1. Reaeration capacity in the drop flow is to be expressed by eq. (10). This is to say that reaeration from the atmosphere increase in proportion to the increasing of the energy of drop flow.

2. In the practical channel in which discharges are quite prominent, production of more bulky reaeration capacity in drop flow may be expected, in comparison with that in case of the uniform flowing.