

堰を越える落下水による酸素再曝気

炭本, 祥生
九州大学農学部生物資源環境学科生物資源生産科学コース生産環境情報学研究室

<https://hdl.handle.net/2324/1498282>

出版情報 : Kyushu University, 2001, 学士, 学士
バージョン :
権利関係 :

卒業論文

堰を越える落下水による酸素再曝気

九州大学 農学部 生物資源環境学科 生物資源生産科学コース

生産環境情報学研究室

炭本 祥生

平成14年3月

目次

| | |
|---------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 第2章 現地観測 | 2 |
| 第3章 酸素移動理論 | 8 |
| 3 - 1 物質移動係数 | 8 |
| 3 - 2 酸素移動 | 9 |
| 3 - 1 - 1 酸素移動速度 | 9 |
| 3 - 1 - 2 再曝気係数 | 10 |
| 再曝気係数に関する実験 | 12 |
| 4 - 1 実験装置と実験方法 | 12 |
| 4 - 1 - 1 実験装置 | 12 |
| 4 - 1 - 2 実験方法 | 15 |
| 4 - 2 再曝気係数算出式の誘導 | 32 |
| 再曝気係数のモデル化 | 39 |
| 5 - 1 落水水による酸素移動モデル | 39 |
| 5 - 2 落水水による再曝気モデル | 41 |
| 5 - 3 モデルの検討 | 43 |
| 5 - 4 考察 | 45 |
| 結論 | 46 |
| 謝辞 | 47 |
| 参考文献 | 48 |

第 1 章 序論

溶存酸素 (dissolved oxygen; DO) は水域生態系、水域での自然浄化において重要な因子である。酸素は水域において有機物やアンモニアの硝化過程及び生物の呼吸などにより消費され、大気からの吸収 (再曝気) や光合成により吸収される。DO 濃度はこの供給と消費のバランスによって変化する。

DO 濃度は汚濁の指標として水質分析に用いられる。有機物量が多く、汚濁の激しい水域では DO 濃度が低い。これは豊富な有機物が微生物の発生を促し、その微生物の呼吸によって酸素が消費されるためである。また DO 濃度が不足すると流水は嫌気性状態となり嫌気性細菌が有機物を分解する。このとき発生する硫化水素などの有害ガスによって水域は汚濁される。DO 濃度の低下を防ぐためには、汚濁源である有機物量を抑えることも必要であるが、もう一方で再曝気によって起こる、水域への酸素の供給を把握することが必要ある。その酸素移動速度を表す再曝気係数は水理因子、気象因子の影響を受ける。本実験では、河川および農業用水路における水利構造物、特に堰に着目し、水理因子である流量、落下高さ、被り水深を種々変えて、堰からの水の落下で起こる再曝気による DO 濃度の変化を測定し再曝気係数について検討した。

第 2 章 現地観測

室内水理実験を行なうにあたって、実際に河川に設置されている堰で DO 濃度がどのように変化しているか知るために、平成 13 年 10 月中旬から 11 月上旬にかけて多々良川において下流側 S1 から最上流 S17 までの計 17 地点で観測をおこなった。河川には様々な形態の堰、越流堰や刃型堰(図-2-1,図-2-2)、また二つが一体化したもの(写真 2-1,2-2(a),(b),2-3)が設置されており、それぞれに特徴を持っている。特に刃型堰(落下タイプの堰;以下落下堰)は図にも示すように落水脈表面が越流堰に比べ大きく、曝気能が高いと考えられる。

多々良川では農業用水路用の落下堰が多く見られた。本実験では落下堰に注目し、室内水理実験では落下堰を模擬した実験装置を用いて流量 Q 、落下高さ H 、被り水深 h の水理因子を現地調査に即した数値で設定し、実験を行なった。

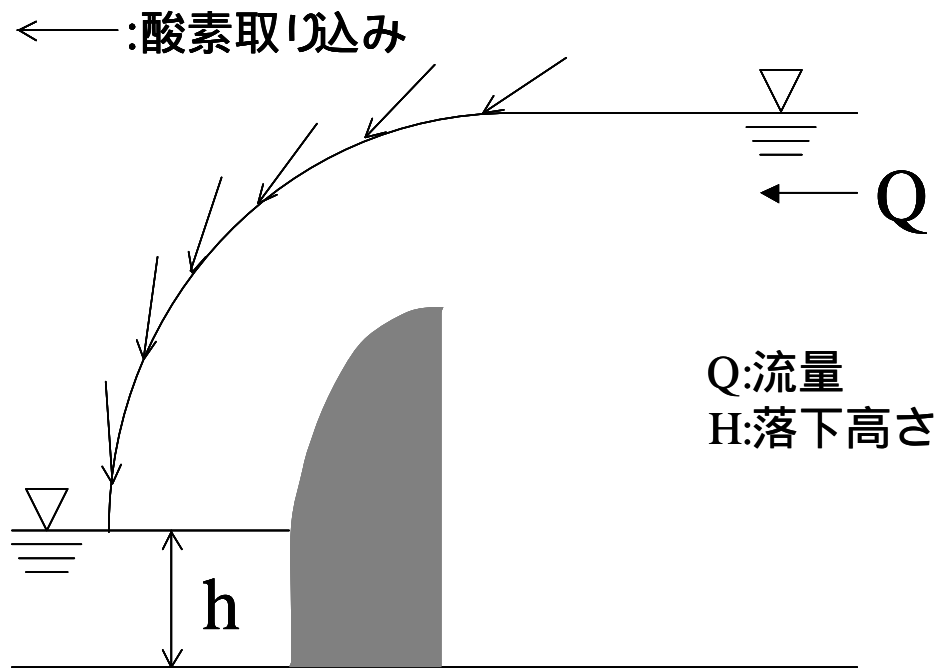


図 - 2 - 1 越流タイプ

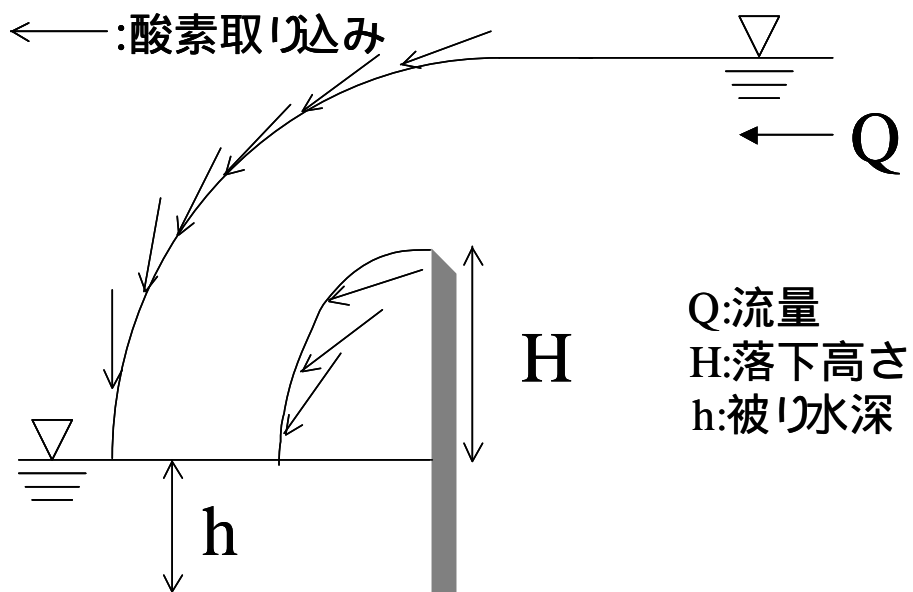


図 - 2 - 2 刃型タイプ



写真 2-1 Station4(越流堰)



写真 2-2(a) Station13(刃型堰)



写真 2-2(b) Station14(刃型堰)



写真 2-3 Station17(一体化型)

多々良川下流から上流にかけて 17ヶ所の堰で、堰上流と堰下流の DO 濃度を測定した。以下にその結果を示す。

表 2 - 1 多々良川における DO 濃度測定結果

| 観測地点:Station | 堰上流 DO 濃度 (mg/l) | 堰下流 DO 濃度 (mg/l) | 水温() |
|--------------|---------------------|---------------------|-------|
| S1 | 8.55 | 9.22 | 13.4 |
| S2 | 10.47 | 10.11 | 14.2 |
| S3 | 8.57 | 9.24 | 12.9 |
| S4 | 8.51 | 8.44 | 14.1 |
| S5 | 8.73 | 9.26 | 13.5 |
| S6 | 9.08 | 8.98 | 13.6 |
| S7 | 8.98 | 9.01 | 13.9 |
| S8 | 9.47 | 9.35 | 14.4 |
| S9 | 9.39 | 9.59 | 12.7 |
| S10 | 9.41 | 9.48 | 13.2 |
| S11 | 10.47 | 10.11 | 12.5 |
| S12 | 10.08 | 10.29 | 12.9 |
| S13 | 10.15 | 8.55 | 12.4 |
| S14 | 9.03 | 8.98 | 12.5 |
| S15 | 8.44 | 8.43 | 13.1 |
| S16 | 9.04 | 10.5 | 12.1 |
| S17 | 9.79 | 9.89 | 12.4 |

(注：観測地点は下流側から S 1)

本来河川は上流にいくほど溶存酸素量が高くなる。それは水温や河川の有機物量などが関わっており、温度が低く、有機物量が少ないほど DO 濃度は高い値を示す。観測地によって堰の形態は異なるが、表 - 2 - 1 から DO 濃度の傾向をみることは、できなかつた。これはそれぞれの地点における水域生態系環境が関係しているからだと考えられる。

第 3 章 酸素移動理論

3 - 1 酸素移動係数

堰を越える落下水による酸素移動現象は、落下水脈表面および着水後の気液界面での乱れの状態がその移動速度の支配的要因である。このような流れの場合における酸素移動を取り扱う場合には、この乱れをいかにしてモデルとして組み込むかが問題となる。化学工学の分野では、以下の 3 つのモデルが一般的に用いられている。

境膜モデル (Lewis&Whitman.1924) では物質移動抵抗が気体と液体の界面近傍の薄い静止境膜を分子拡散する場合、液相物質移動係数 K_L は D を対象成分の水中での拡散係数、 d_L を境膜厚さとするとき、

$$K_L = \frac{D}{d_L} \text{ (3 - 1)}$$

と表現されている。

浸透モデル (Higbie.1935) ではある時間 q_p の間、界面での静止している水塊エレメント中で非定常の拡散が起こるとし、 q_p の時間が経つと、瞬間的にそのエレメントは液本体から移動したエレメントで置き換えられると考えられている。このモデルによると時間平均の液相物質移動係数 K_L は、

$$K_L = 2 \left(\frac{D}{pq_p} \right)^{1/2} \text{ (3 - 2)}$$

で表される。

表面更新モデル (Danckwerts.1951) では、この水塊エレメントの更新はランダムに発生する統計的な現象であると捉えられている。平均の更新率を g とすると、

$$K_L = \sqrt{Dg} \quad \text{-----} (3 - 3)$$

で表される。

Dobbins (1956) は境膜の存在を仮定したが、その境膜が周期的に更新されるとして次式を導いた。

$$K_L = \sqrt{Dg} \coth \sqrt{\frac{gd_L^2}{D}} \quad \text{-----} (3 - 4)$$

上述のモデルはそのままで使用できるものではなく、パラメータである d_L, q_p, g 等を測定可能な流速などの水理量とどう関連づけるかが問題であり、このためには界面近傍での乱流構造の知識とモデル表現が必要である。本卒業論文では、実測で得られたマクロな水理量から乱れ特性量の普遍関数表示を用いて、水面での局所的な乱れ特性値を推定し、上述のモデルのうち、表面更新モデルの堰を越える落水水への適用性を検討した。

3 - 2 酸素移動

3 - 2 - 1 酸素移動速度

貯留槽内の水中への酸素供給速度は再曝気による酸素供給のみの場合、次式で示される。

$$\frac{dD}{dt} = -K_2 D \quad \text{-----} (3 - 5)$$

あるいは、

$$\frac{dC_L}{dt} = K_2(C_S - C_L) \text{ ----- (3 - 6)}$$

ここに、 D : 溶存酸素不足量 ($C_S - C_L$) (mg/l)

t : 時間 (min)

C_S : 飽和溶存酸素量 (mg/l)

C_L : 溶存酸素量 (mg/l)

K_2 : 再曝気係数 (1/min)

3 - 2 - 2 再曝気係数

再曝気係数 K_2 に関しては、河川における観測値に適合する実験式として、streeter と Pheips は、

$$k_2 = \frac{C_1 U^{n_1}}{H^2} \text{ ----- (3 - 7)}$$

ここに、 U : 流速(ft/s)

H : 水深(ft)

C_1, n_1 : 物理的・水理的条件により定まる定数

k_2 : 10 を底とする再曝気係数

$$K_2 = 2.31k_2 (1/\text{hr or } 1/\text{day})$$

O'conner と Dobinns は、

$$k_2 = \frac{(D_L U)^{1/2}}{2.3 H^{3/2}} \text{ (3 - 8)}$$

ここに、 D_L : 分子拡散係数 (ft²/day)

H : 流路の平均水深 (ft)

U : 流路の平均流速 (ft/day)

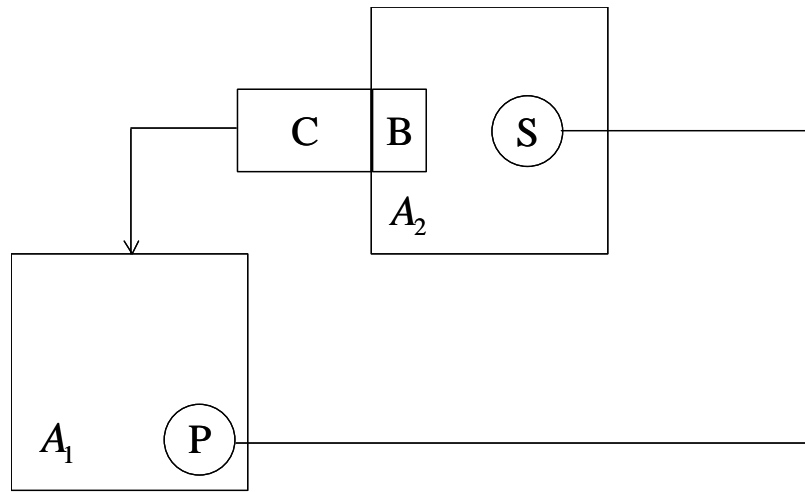
を提案している。

第4章 再曝気係数に関する水理実験

4 - 1 実験装置および実験方法

4 - 1 - 1 実験装置

本実験では河川に設けられている堰（矩形堰）を模擬的に再現した実験装置を用いた。その模式図を図 - 4 - 1 に示す。供給槽（堰上流側,50l）と貯留槽（堰下流側,220l）は塩化ビニール製である。また貯留槽の水深は60cmである。流出口には乱れの影響を小さくするために整流装置を設けた。堰は塩化ビニール製で幅15cm,全長25cmである。貯留槽からポンプにより水を吸い上げ、塩ビ管（内径50mm）とビニールパイプ接続した輸水管を通して供給槽に送り供給槽に取り付けた堰から落下させる。流量の調節はポンプに取り付けたインバーターで電圧を変化させ行ない、また被り水深の調節は貯留層内にブロックを設置して行なった。



A_1 貯留槽

C:矩形堰

A_2 供給槽

P:ポンプ

B 整流装置

S:供給口

図 - 4 - 1 実験装置模式図



ポンプ

水深調節ブロック

攪拌器

写真 4 - 1 (a) 貯留槽



写真 4 - 2 (b) 供給槽



写真 4 - 2 実験装置全体図 (落下高さ H : 40cm のとき)

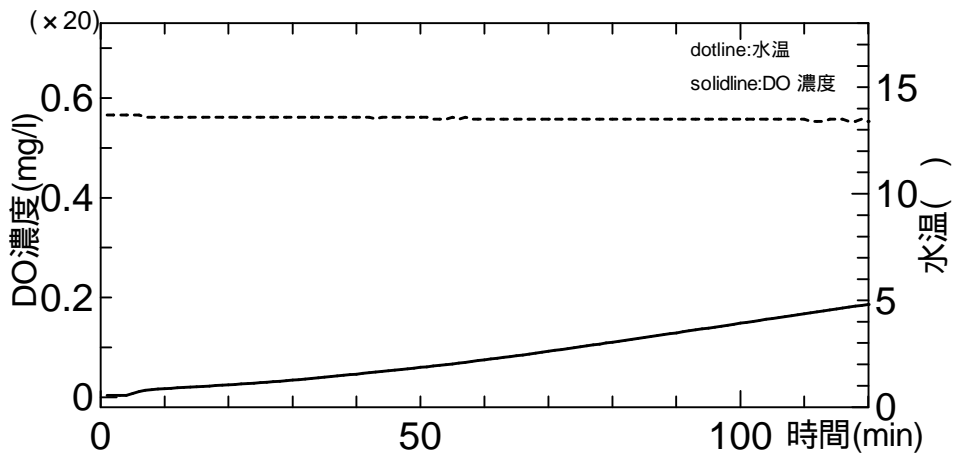
4 - 1 - 2 実験方法

まず、水道水を貯水タンクに溜めこれに亜硫酸ナトリウムを 0.1g/l の割合で添加し溶存酸素量をゼロ付近まで低下させておく。その水を貯留槽、供給槽に所定の量供給する。その後、ポンプの運転を開始し、所定の流量になるようにインバーターでポンプの電圧を調節し、循環させた。なお、貯留槽内の溶存酸素量を均一にし、DO メーターの精度を高めるために攪拌器により貯留槽を攪拌した。

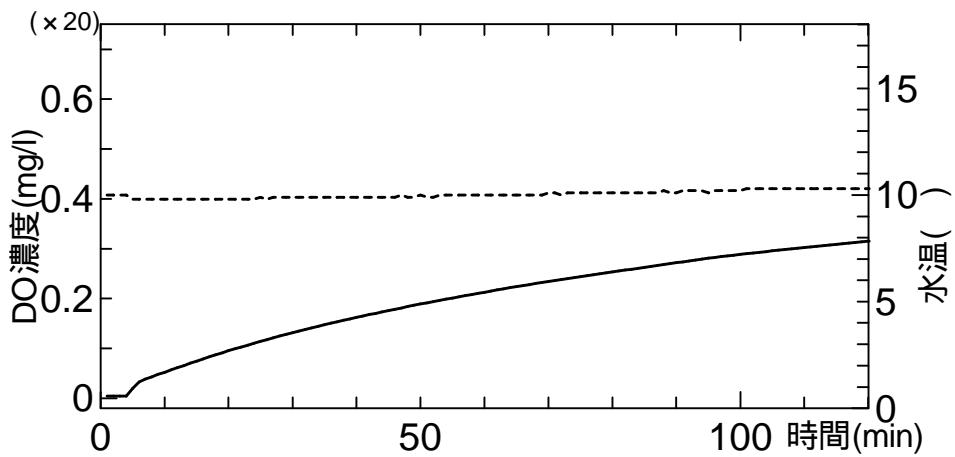
以上のような条件のもとで、あらかじめ挿入した DO メーターと水温センサにより貯留槽内の DO 濃度、水温の経時変化を連続的に測定、記録した。データの集録は時間間隔 1 分、データ数 120 個とした。

落下高さ H を 10,20,40,80,160(cm) の 5 パターン、流量 Q を 20,100,200(l/min)、被り水深 h を 10,40,60(cm) のそれぞれ 3 パターンについて組み合わせを変えて実験を行なった。

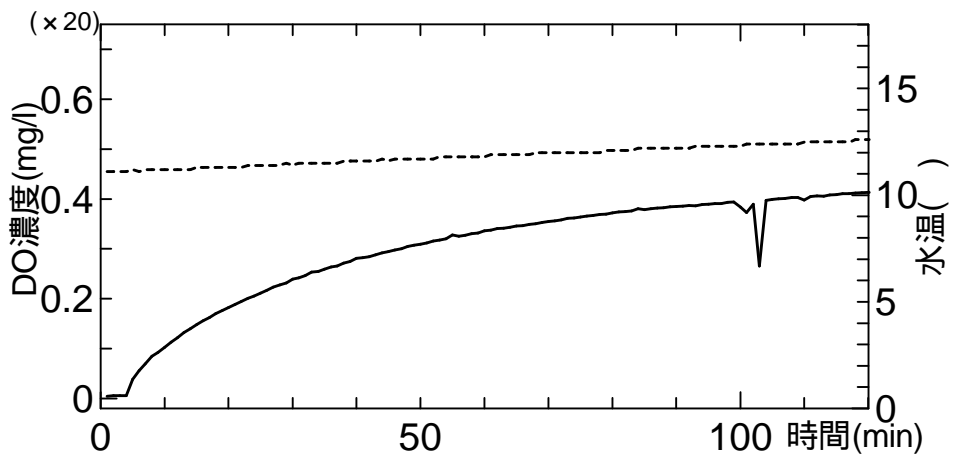
以下、図 - 4 - 2 (1) ~ (15) に溶存酸素量と水温の経時変化の測定結果を示す。



(a) 流量Q:20(l)



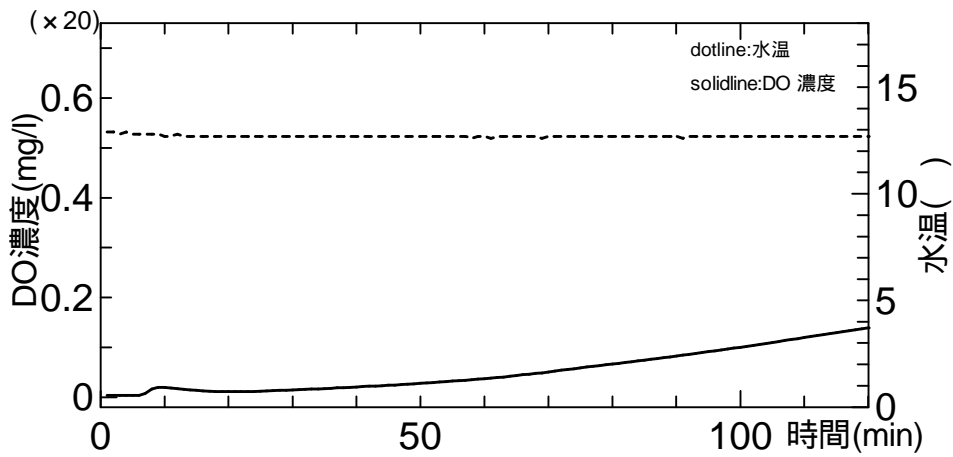
(b) 流量Q:100(l)



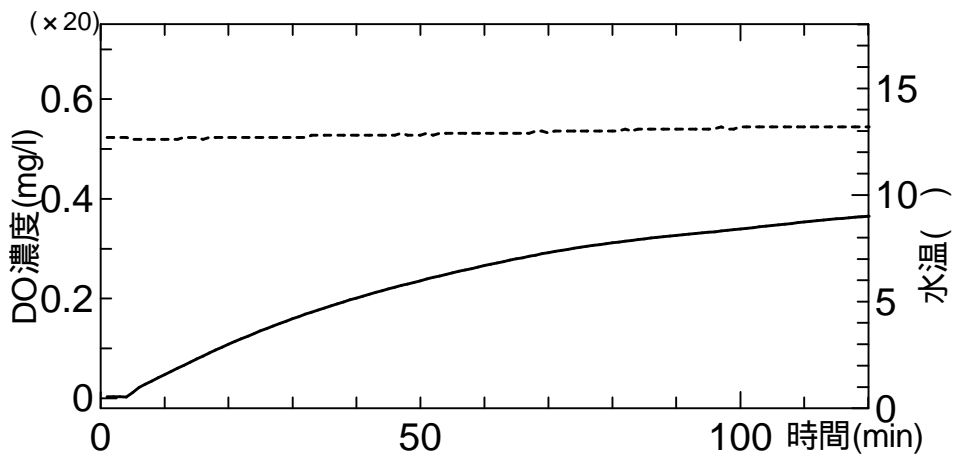
(c) 流量Q:200(l)

H=10,h=10の場合

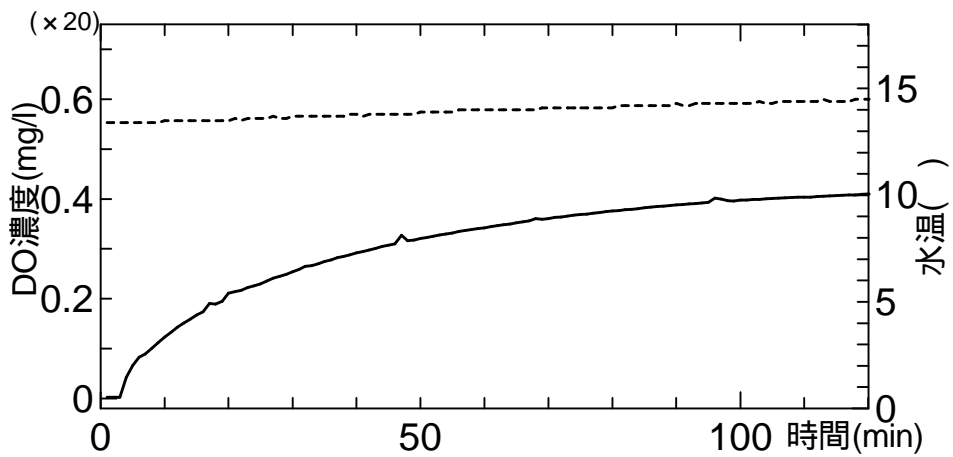
図4 - 2(1) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量Q:20(l)



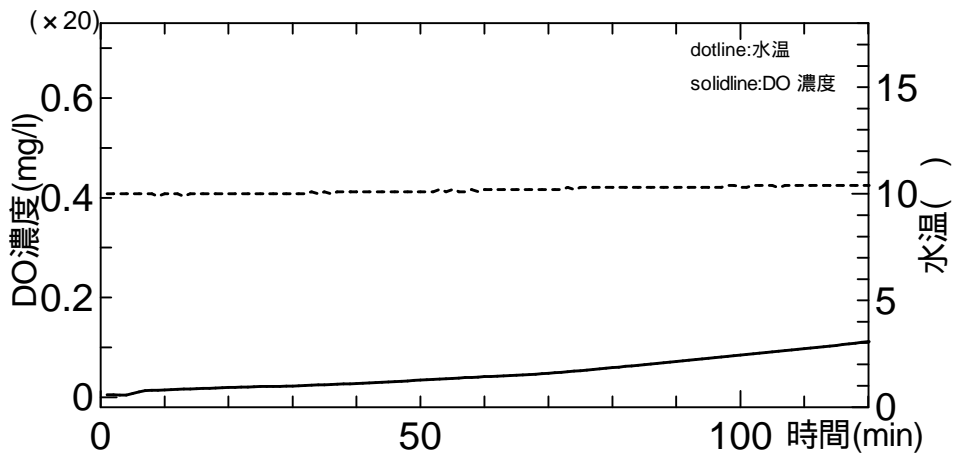
(b) 流量Q:100(l)



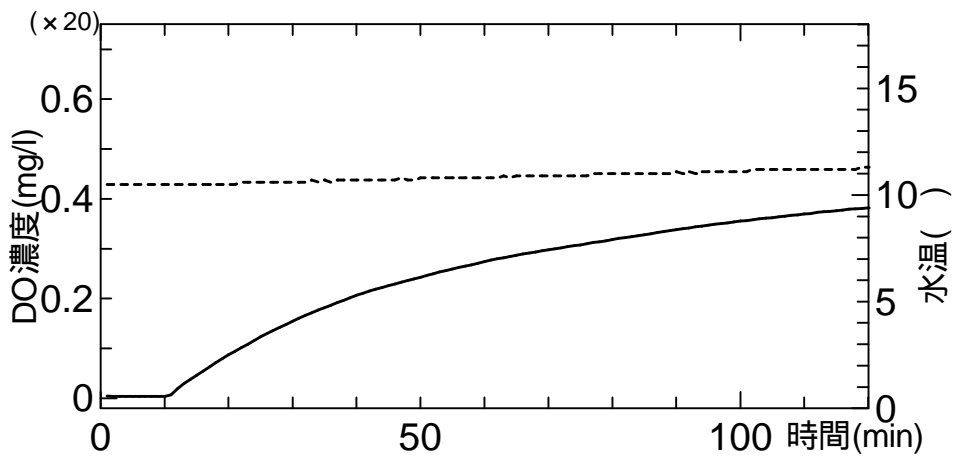
(c) 流量Q:200(l)

H=10,h=40の場合

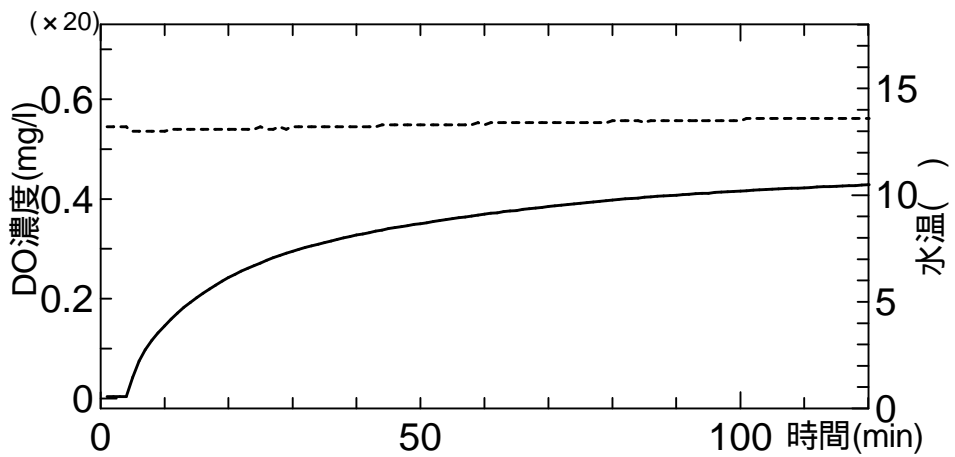
図4 - 2 (2) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20\text{ (l)}$



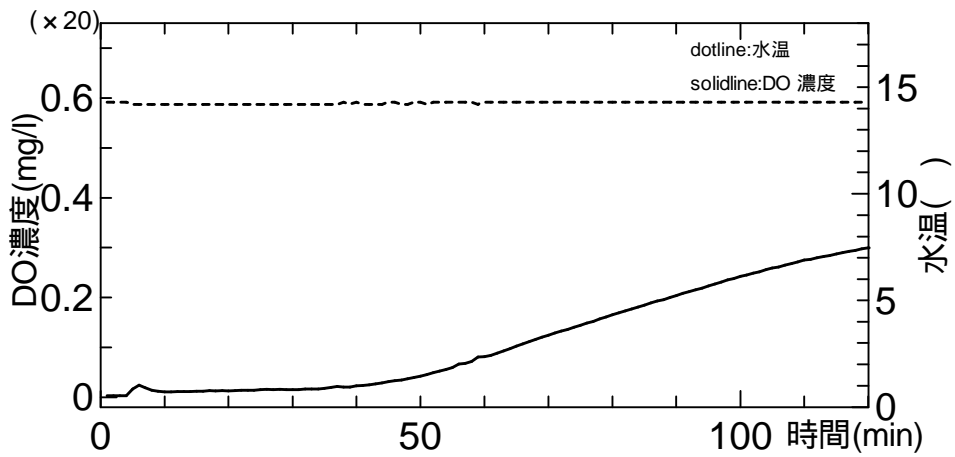
(b) 流量 $Q:100\text{ (l)}$



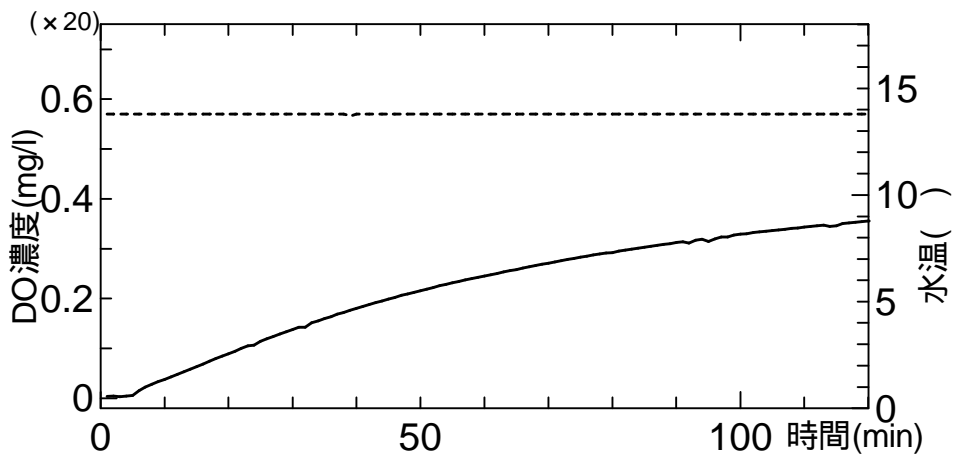
(c) 流量 $Q:200\text{ (l)}$

$H=10, h=60$ の場合

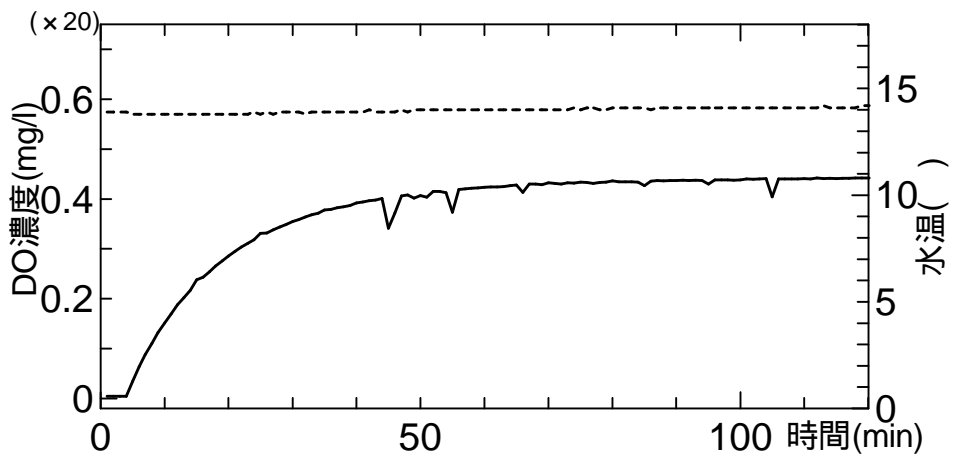
図4 - 2 (3) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量Q:20(l)



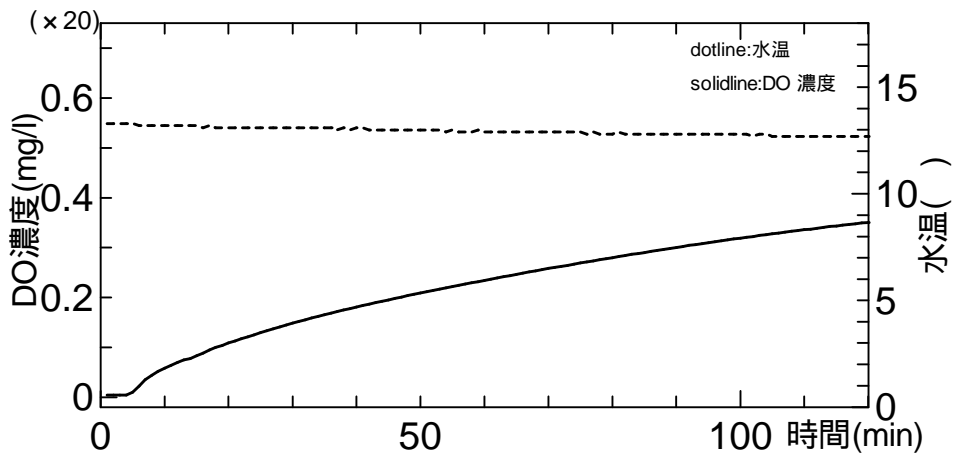
(b) 流量Q:100(l)



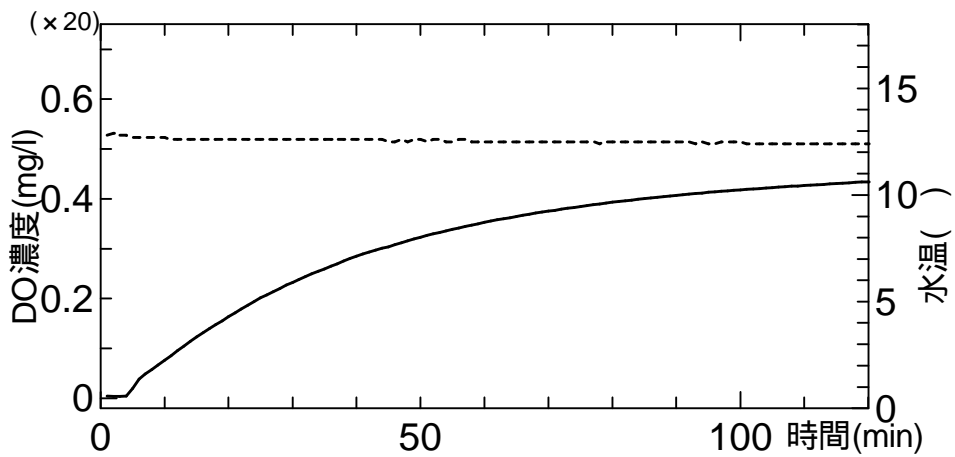
(c) 流量Q:200(l)

H=20,h=10の場合

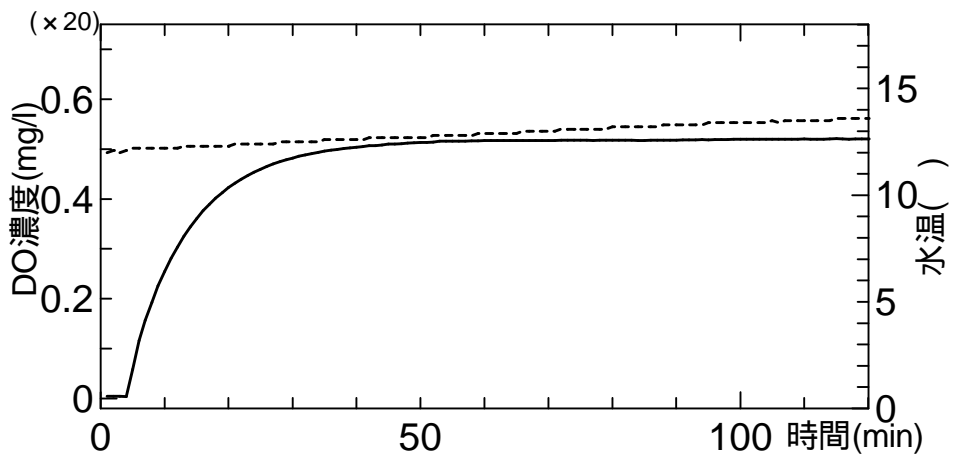
図4 - 2(4) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量Q:20(l)



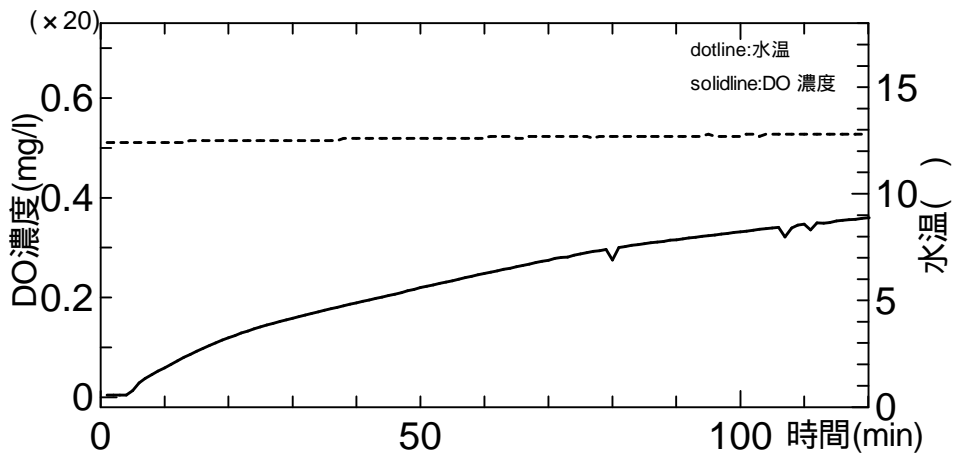
(b) 流量Q:100(l)



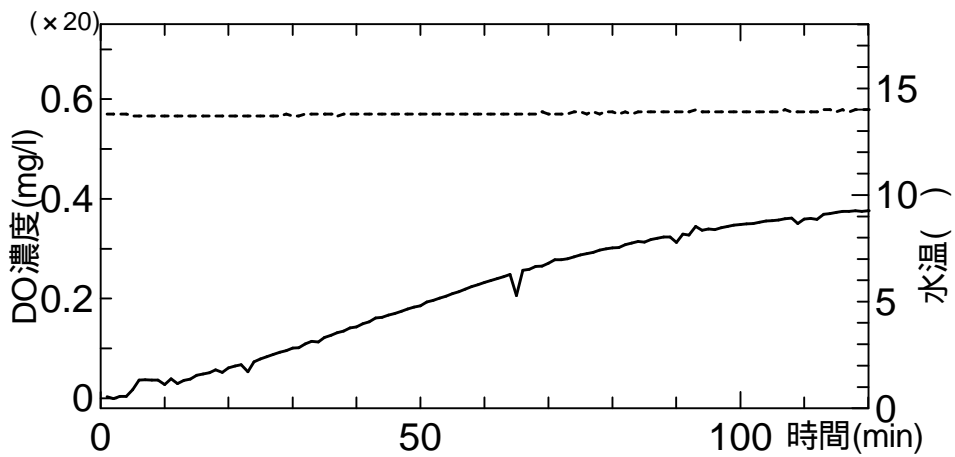
(c) 流量Q:200(l)

H=20,h=40の場合

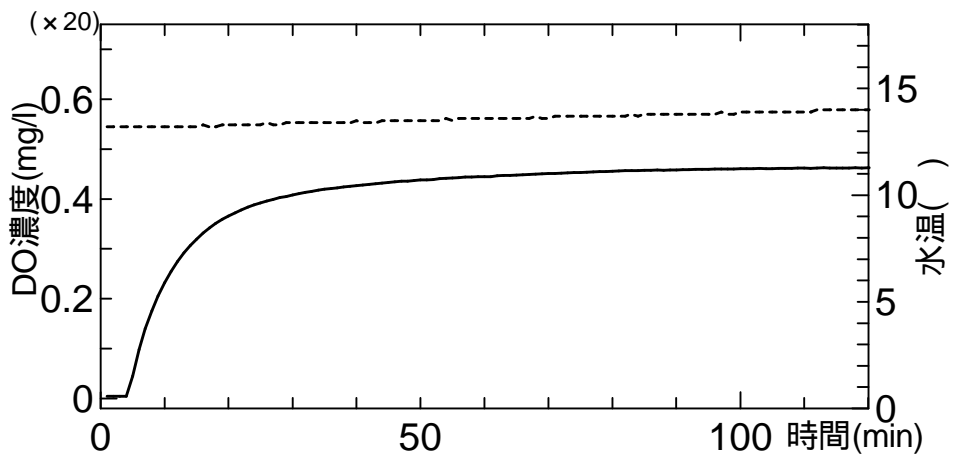
図4 - 2 (5) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20(l)$



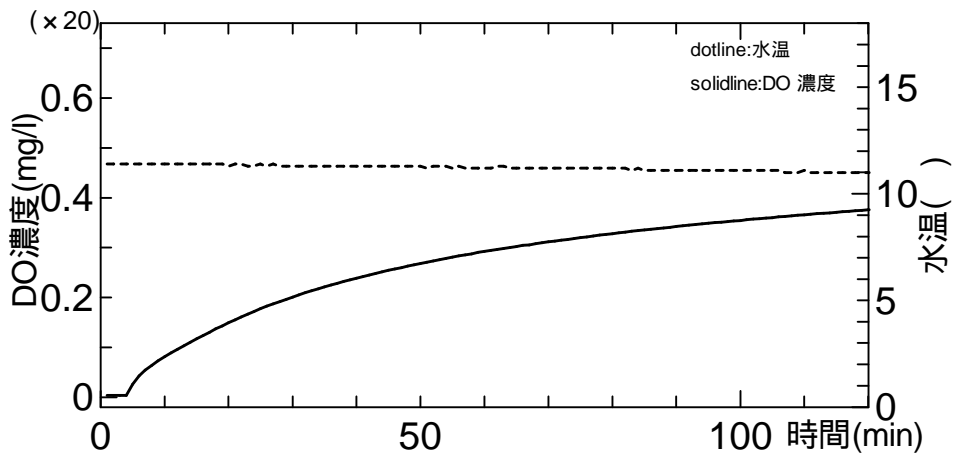
(b) 流量 $Q:100(l)$



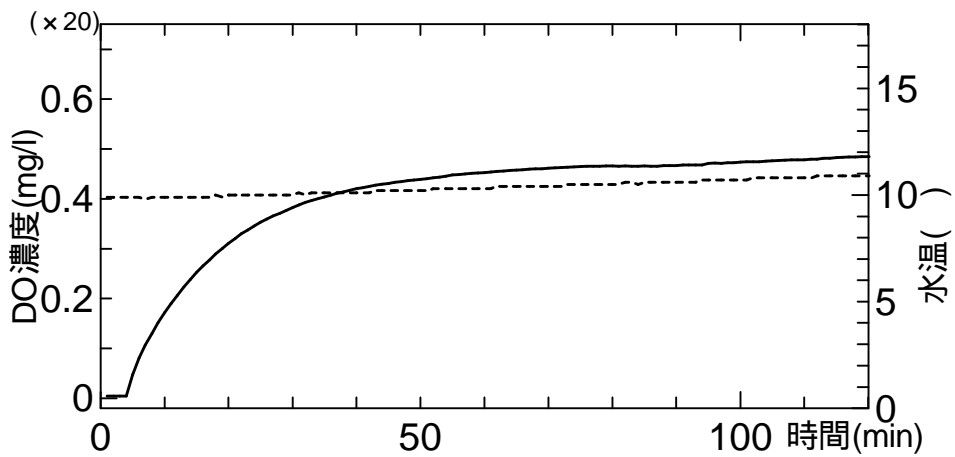
(c) 流量 $Q:200(l)$

$H=20, h=60$ の場合

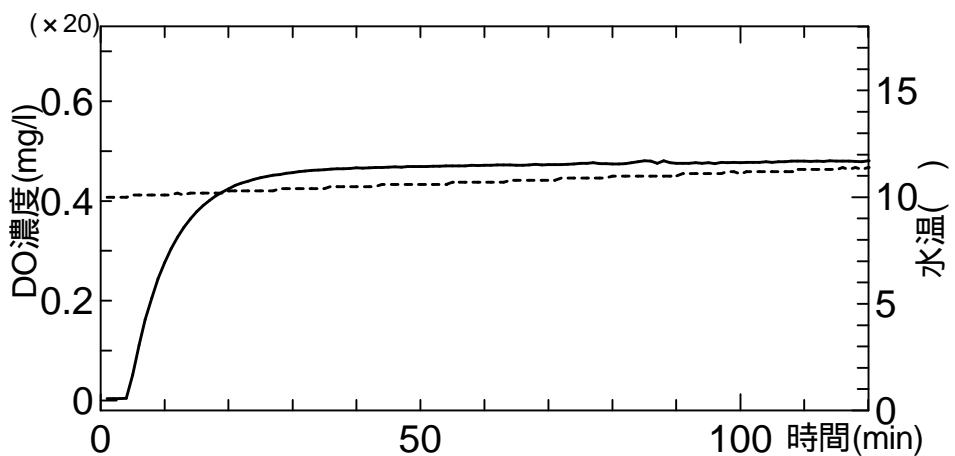
図4 - 2 (6) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20\text{ (l)}$



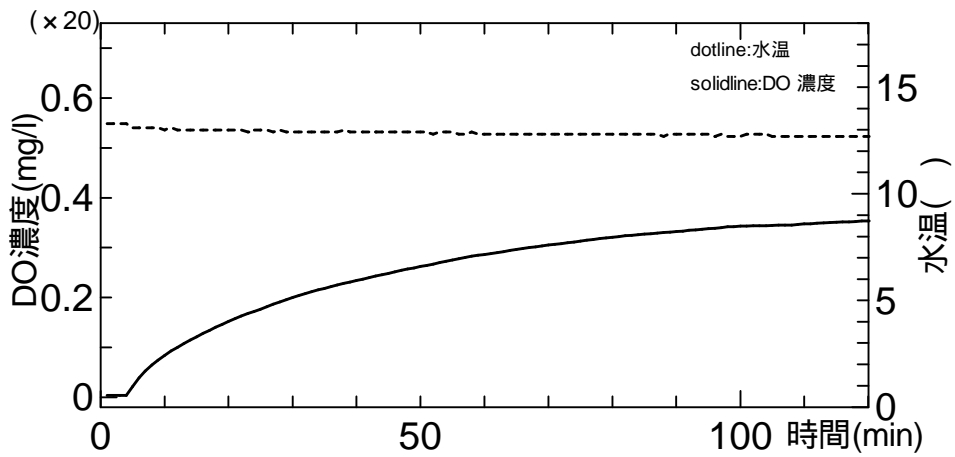
(b) 流量 $Q:100\text{ (l)}$



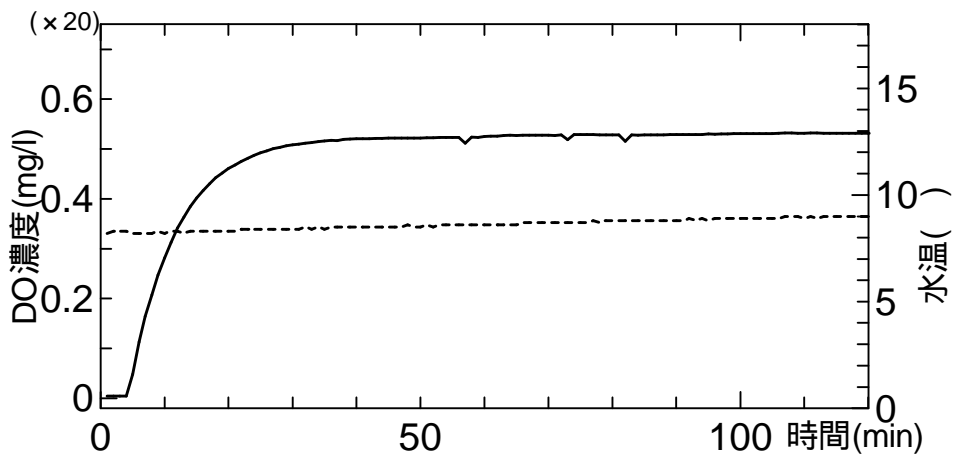
(c) 流量 $Q:200\text{ (l)}$

$H=40, h=10$ の場合

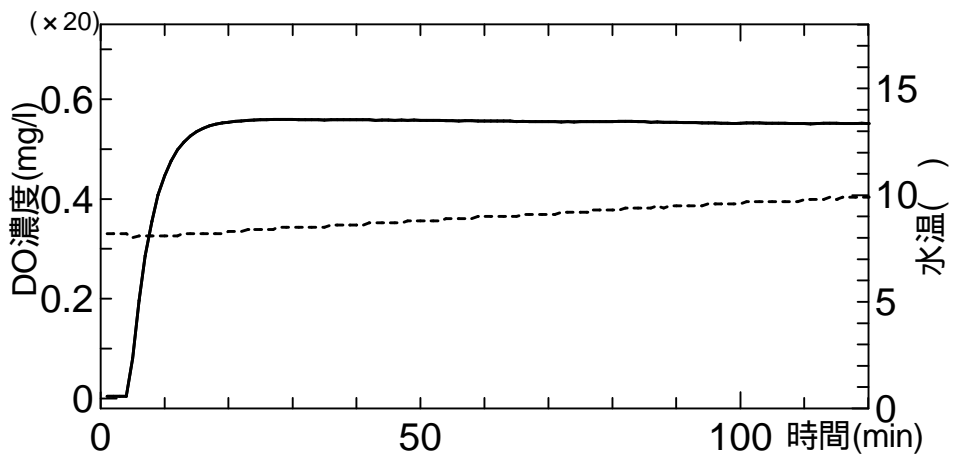
図4 - 2 (7) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20(l)$



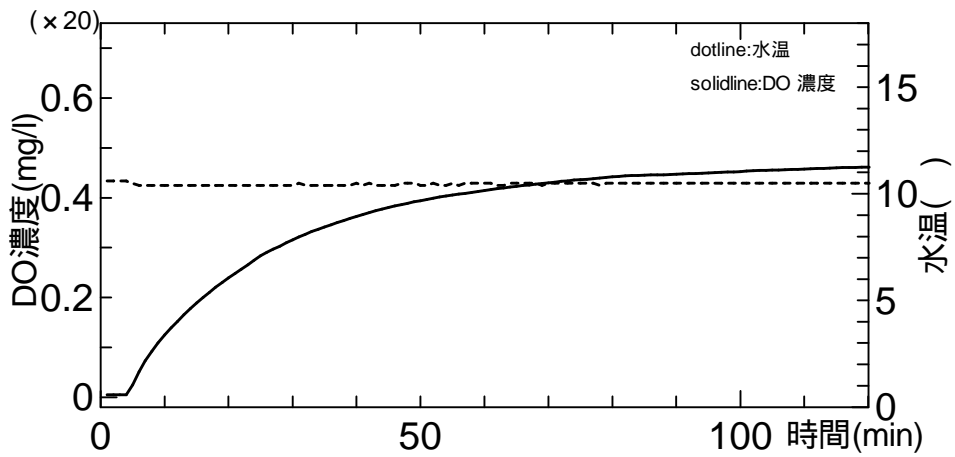
(b) 流量 $Q:100(l)$



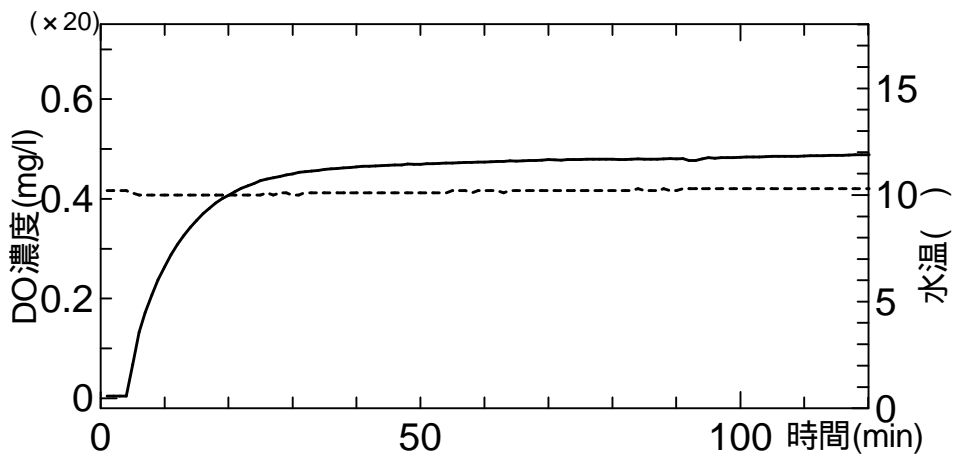
(c) 流量 $Q:200(l)$

$H=40, h=40$ の場合

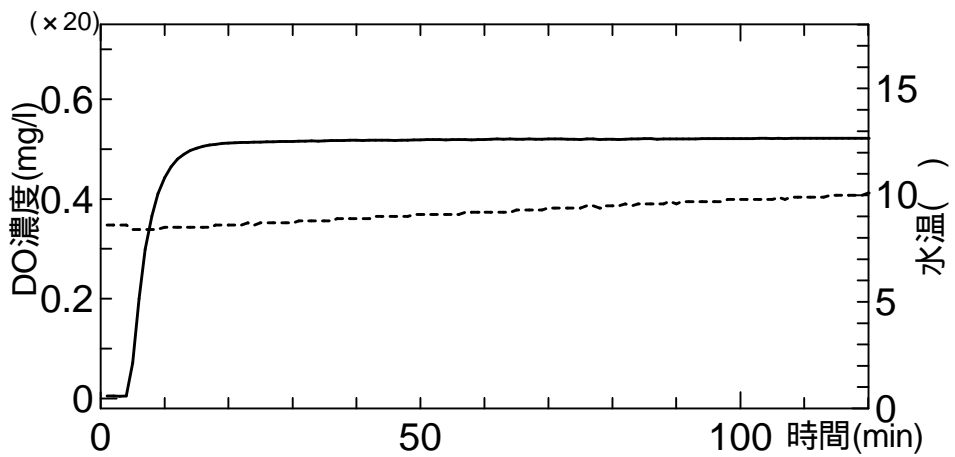
図4 - 2 (8) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量Q:20(l)



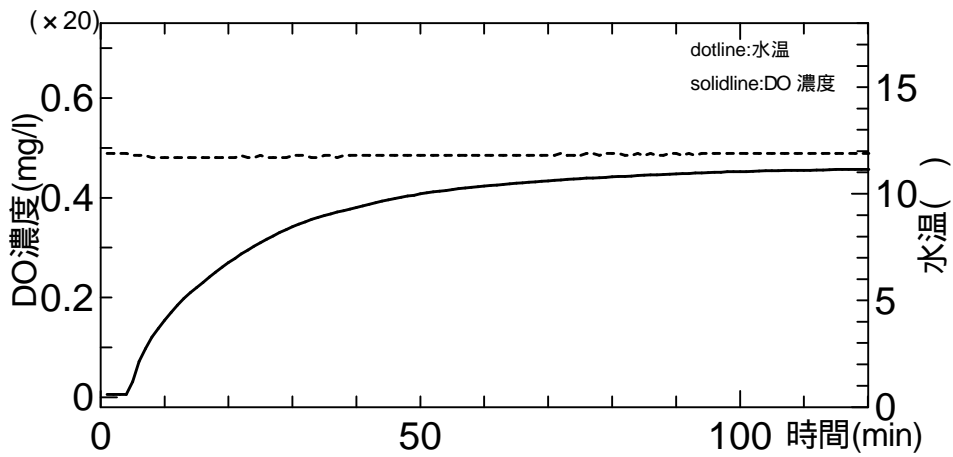
(b) 流量Q:100(l)



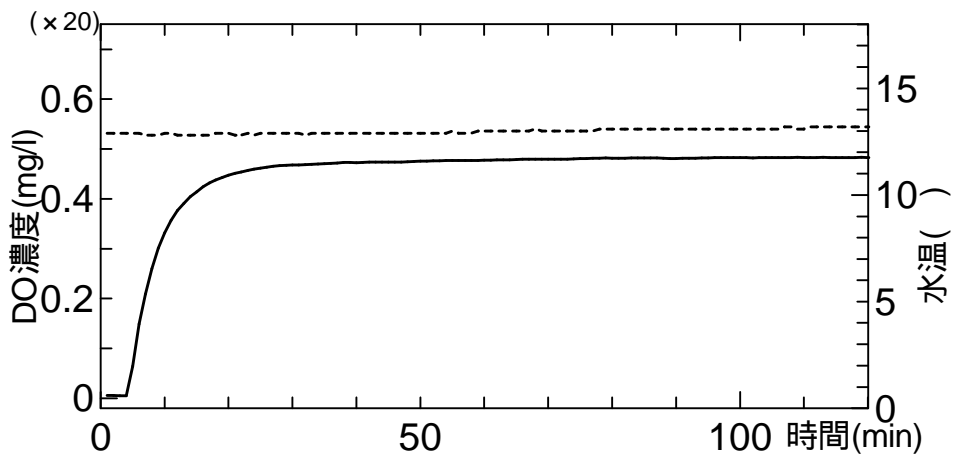
(c) 流量Q:200(l)

H=40,h=60の場合

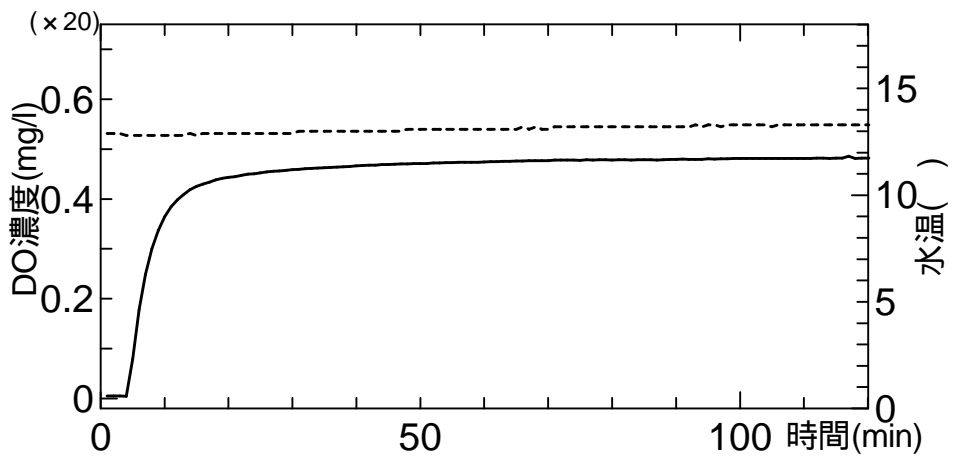
図4 - 2 (9) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20$ (l)



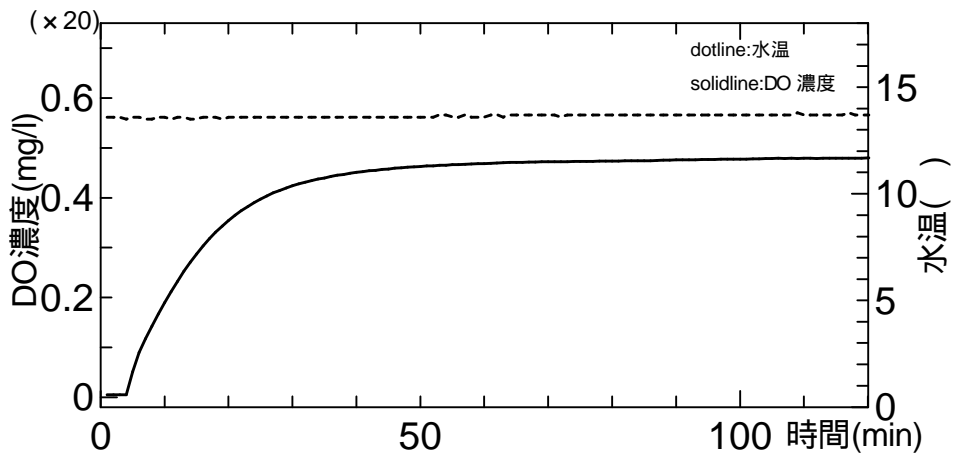
(b) 流量 $Q:100$ (l)



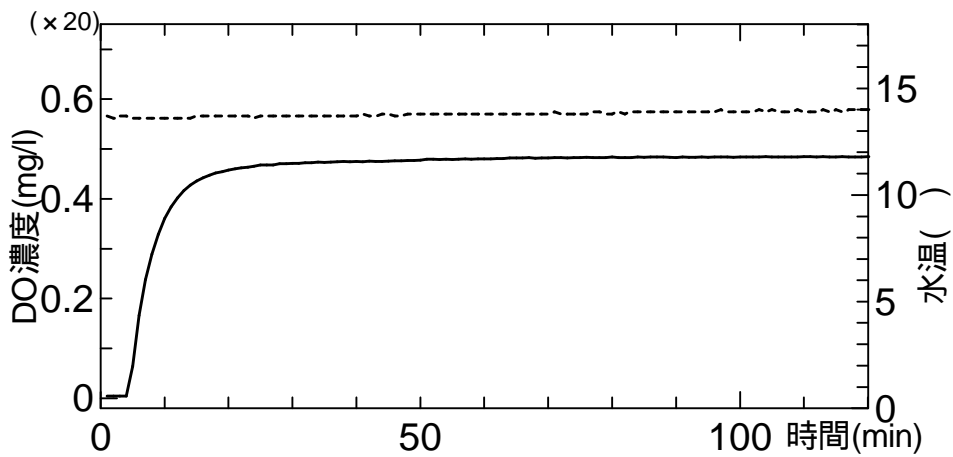
(c) 流量 $Q:200$ (l)

$H=80, h=10$ の場合

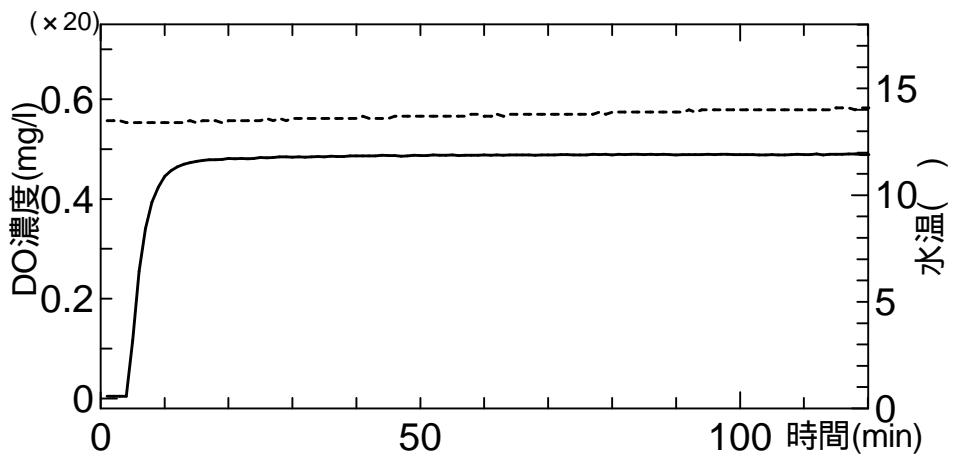
図4 - 2 (10) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量Q:20(l)



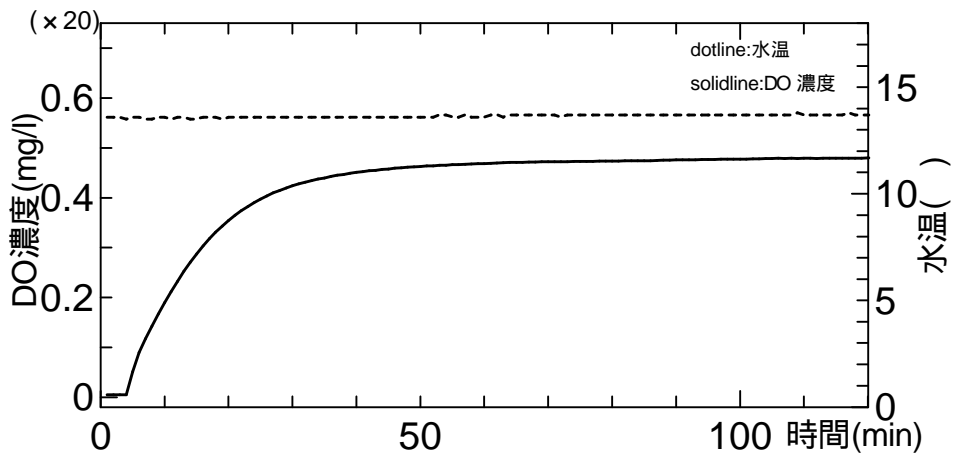
(b) 流量Q:100(l)



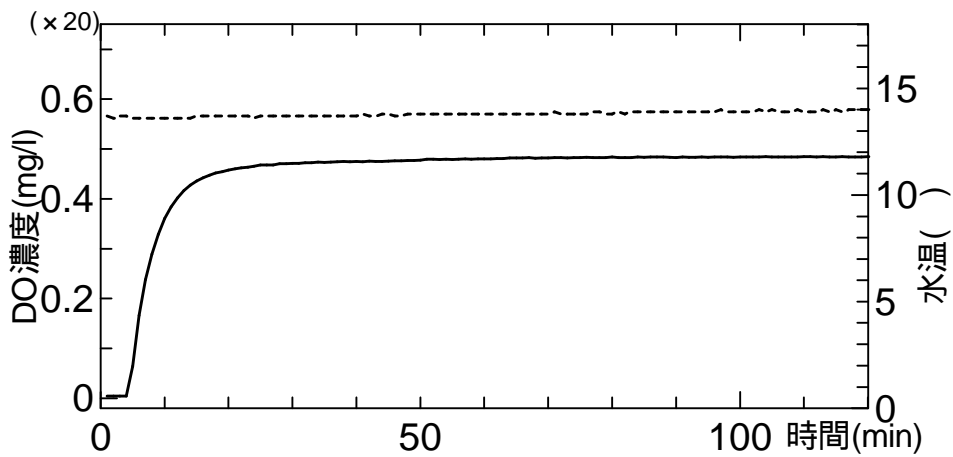
(c) 流量Q:200(l)

H=80,h=40の場合

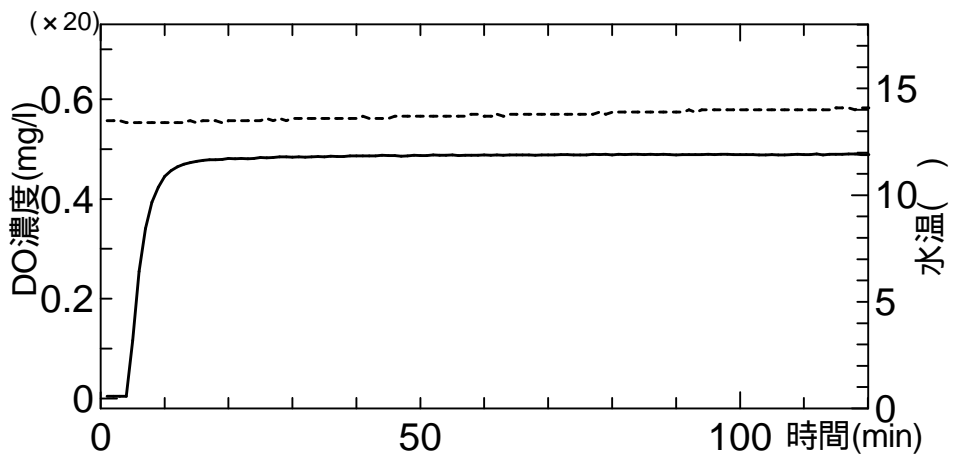
図4 - 2 (11) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20(l)$



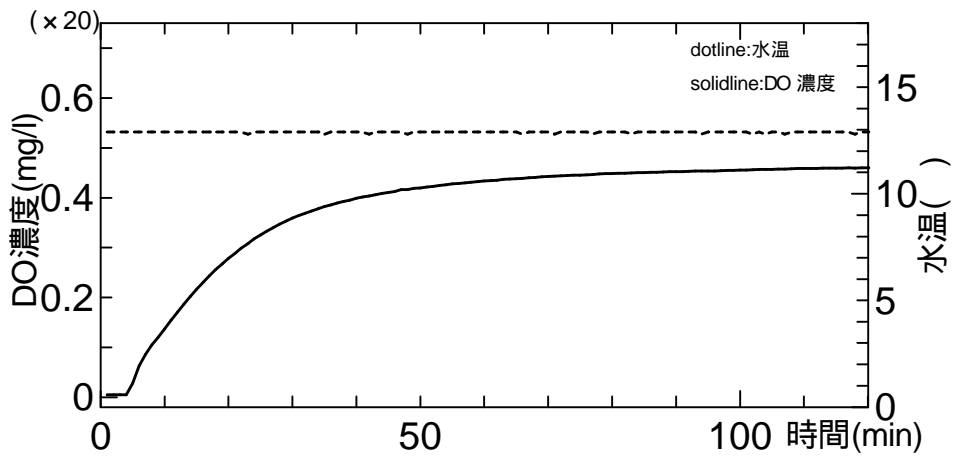
(b) 流量 $Q:100(l)$



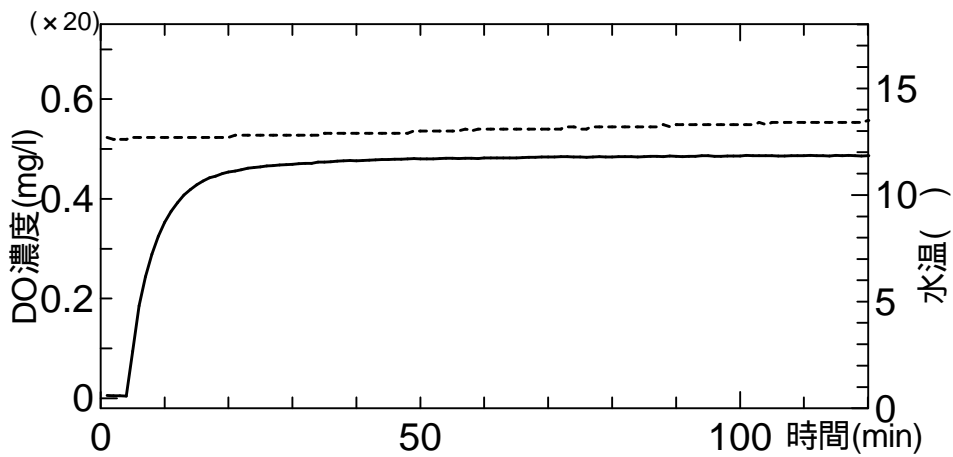
(c) 流量 $Q:200(l)$

$H=80, h=40$ の場合

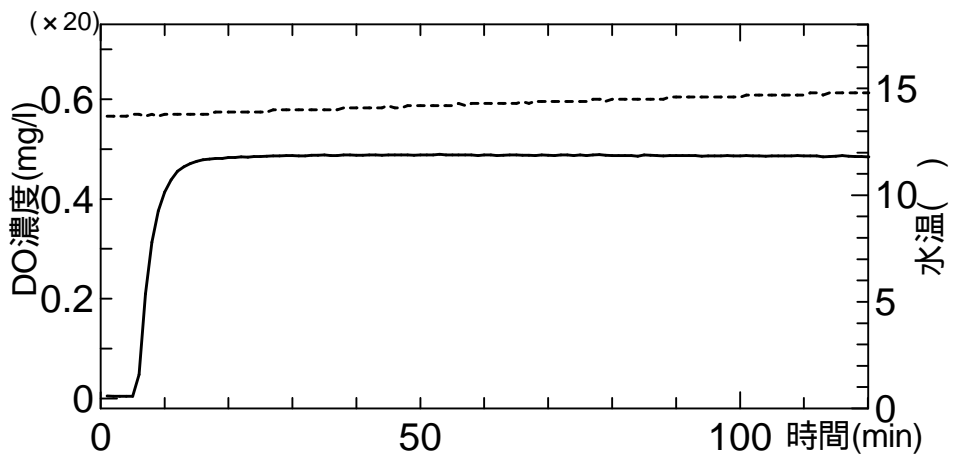
図4 - 2 (11) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20$ (l)



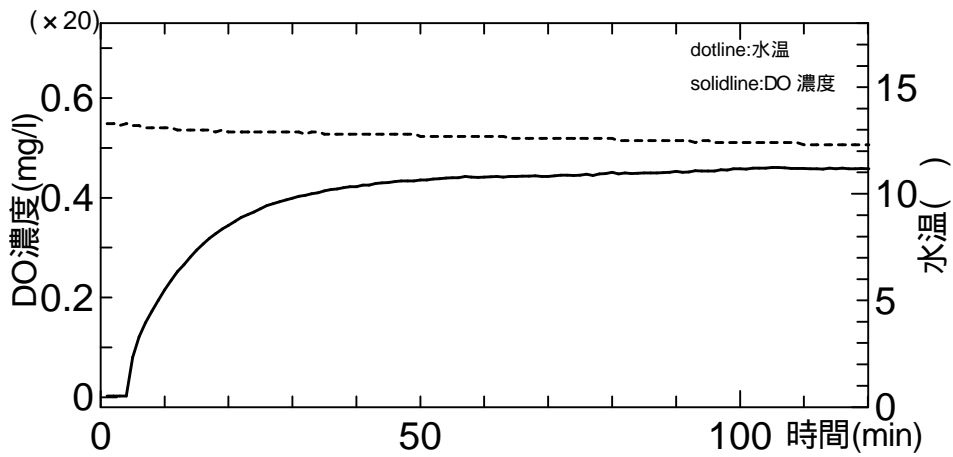
(b) 流量 $Q:100$ (l)



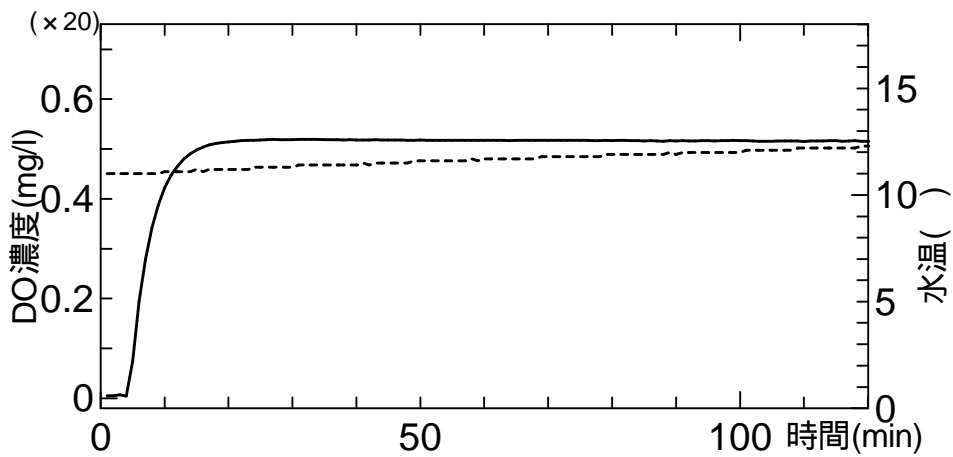
(c) 流量 $Q:200$ (l)

$H=80, h=60$ の場合

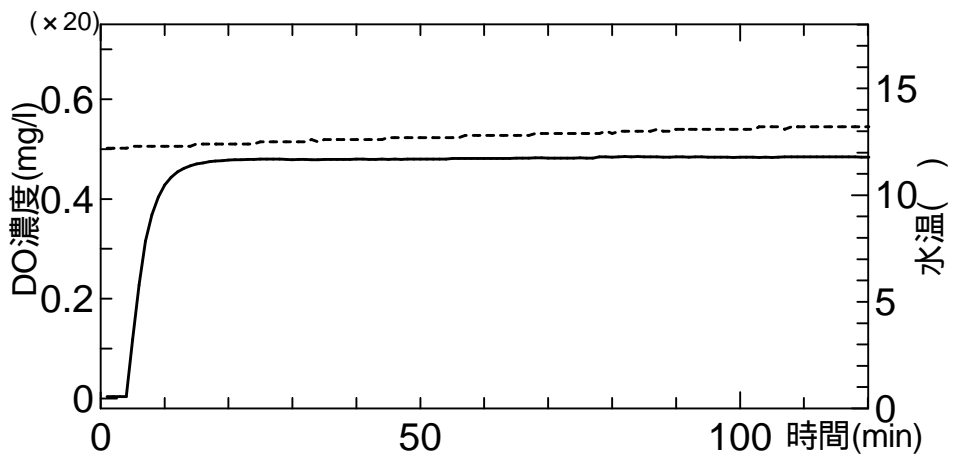
図4 - 2 (12) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量 $Q:20$ (l)



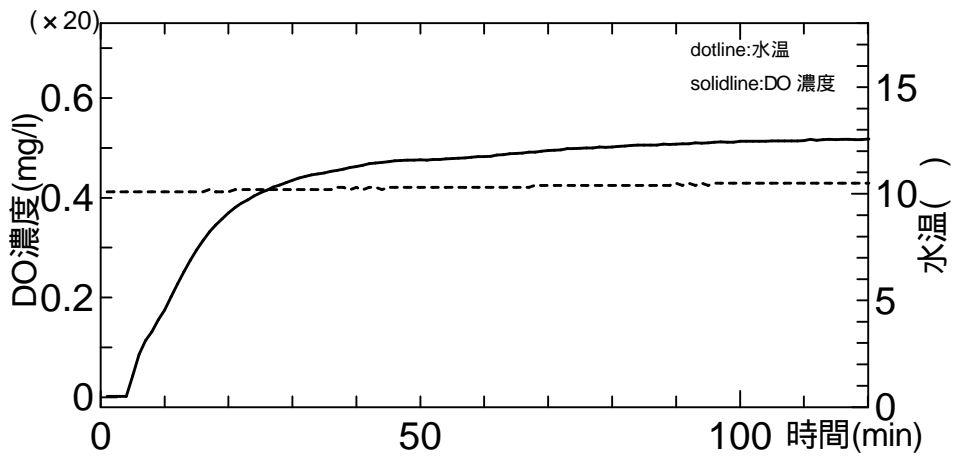
(b) 流量 $Q:100$ (l)



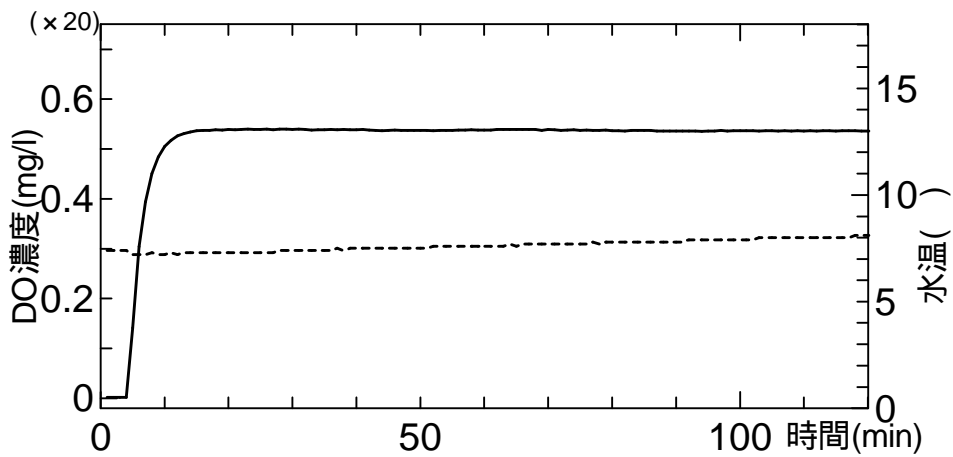
(c) 流量 $Q:150$ (l)

$H=160, h=10$ の場合

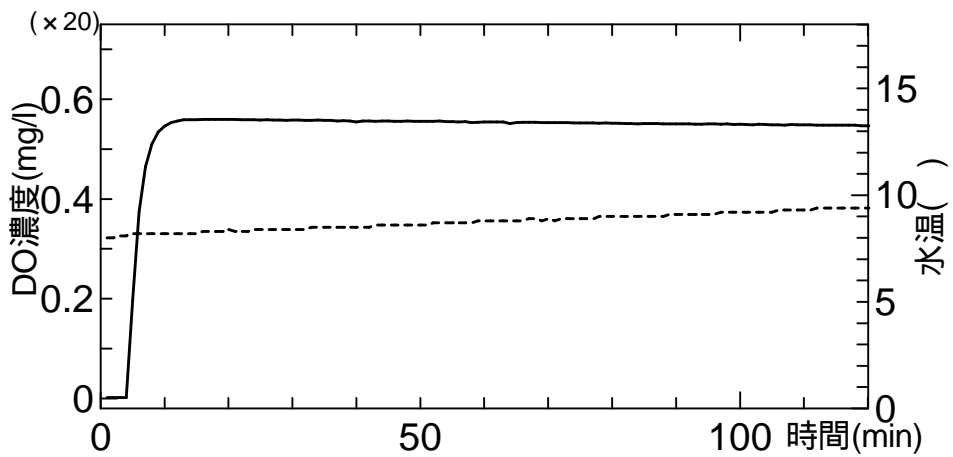
図4 - 2 (13) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量Q:20(l)



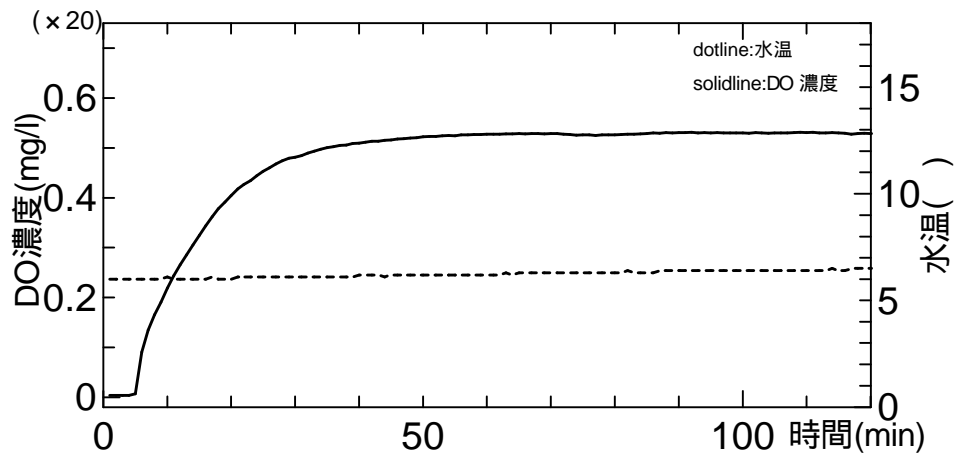
(b) 流量Q:100(l)



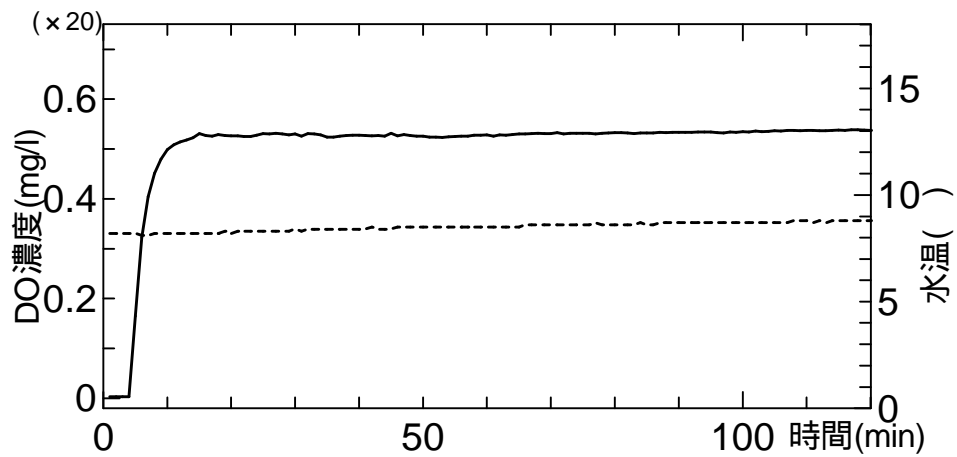
(c) 流量Q:150(l)

H=160,h=40の場合

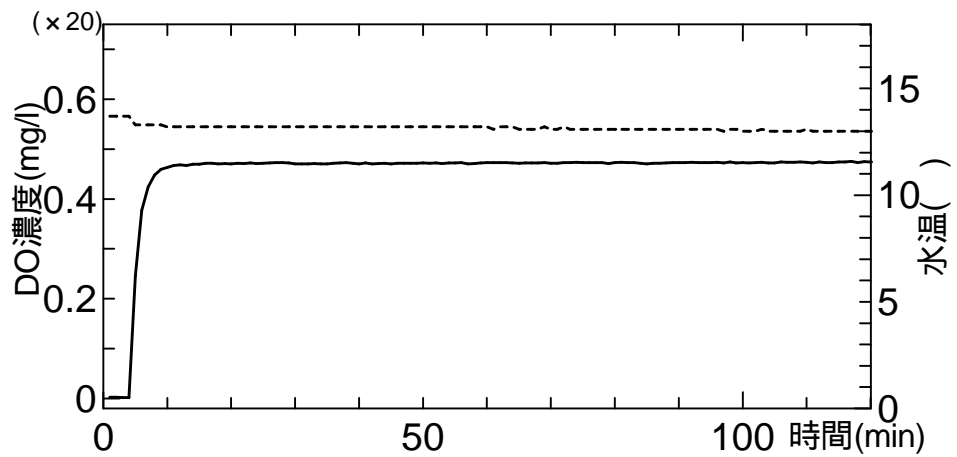
図4 - 2 (14) 溶存酸素量と水温の経時変化



(a) 流量Q:20(l)



(b) 流量Q:100(l)



(c) 流量Q:150(l)

H=160,h=60の場合

図4 - 2 (15) 溶存酸素量と水温の経時変化

4 - 2 再曝気係数の算出方法

4 - 2 - 1 再曝気係数算出式の誘導

再曝気係数算出のための実験装置模式図を図 - 4 - 3 に示した。

D 地点において堰からの水の落下により再曝気が起こり、循環水中の溶存酸素量は C_L になる。(貯留槽、供給槽の水面からの酸素の取り込みは D 地点で起こる再曝気に比べ微少であるので無視するものとする。)

よって、実験装置での酸素移動は、飽和溶存酸素量を C_S 、水の落下による再曝気係数 K_2 とすると(3.1)式と同じく次式で示される。

$$\frac{dC_L}{dt} = K_2(C_S - C_L) \text{ -----(4.1)}$$

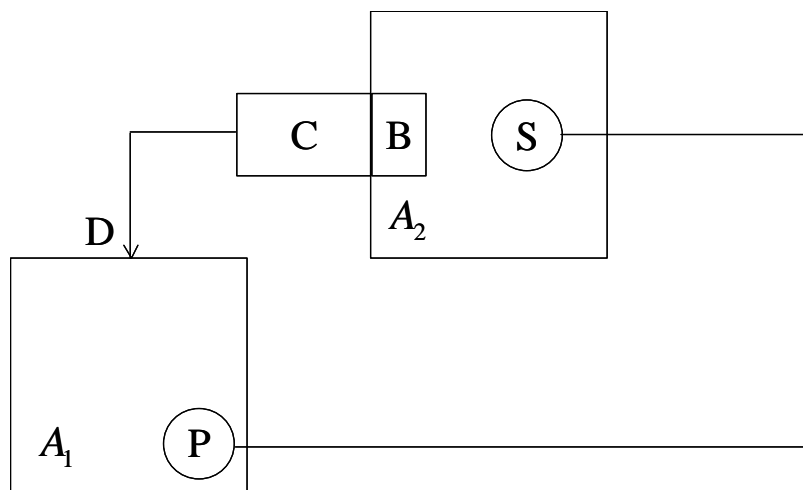


図 - 4 - 3 再曝気係数算出のための実験模式図

(4.1)式を t で積分すると次式となる。

$$\frac{C_S - C_L}{C_S - C_0} = e^{-K_2 t} \text{-----}(4.2)$$

(4.2)式を t について解くと、

$$K_2 = -\frac{\log A}{t} \text{-----}(4.3)$$

ここに、 $A = \frac{C_S - C_L}{C_S - C_0}$

溶存酸素量 C_L および水温の経時変化の測定結果をもとに、以下の手順で溶存酸素不足量 $C_S - C_L$ を求め、式(4.3)を用いて再曝気係数 K_2 を算定した。

まず、表 - 4 - 1 に示す水温と飽和溶存酸素量 C_S の関係を二次曲線で近似させ、ついで測定した溶存酸素量 C_L を差し引いて溶存酸素不足量 $C_S - C_L$ の経時変化を求めた。測定結果から算出した各水理因子ごとの再曝気係数 K_2 を図 - 4 - 5 に示す。

表 - 4 - 1 水中飽和溶存酸素量

| 温度 () | 飽和溶存酸素量 (mg/l) |
|-----------|-------------------|
| 0 | 14.16 |
| 1 | 13.77 |
| 2 | 13.40 |
| 3 | 13.04 |
| 4 | 12.70 |
| 5 | 12.37 |
| 6 | 12.06 |
| 7 | 11.75 |
| 8 | 11.47 |
| 9 | 11.19 |
| 10 | 10.92 |
| 11 | 10.67 |
| 12 | 10.43 |
| 13 | 10.20 |
| 14 | 9.97 |
| 15 | 9.76 |
| 16 | 9.56 |
| 17 | 9.37 |
| 18 | 9.18 |
| 19 | 9.01 |
| 20 | 8.84 |

飽和溶存酸素量 C_s

■ 飽和溶存酸素量 (mg/l)
— 近似曲線

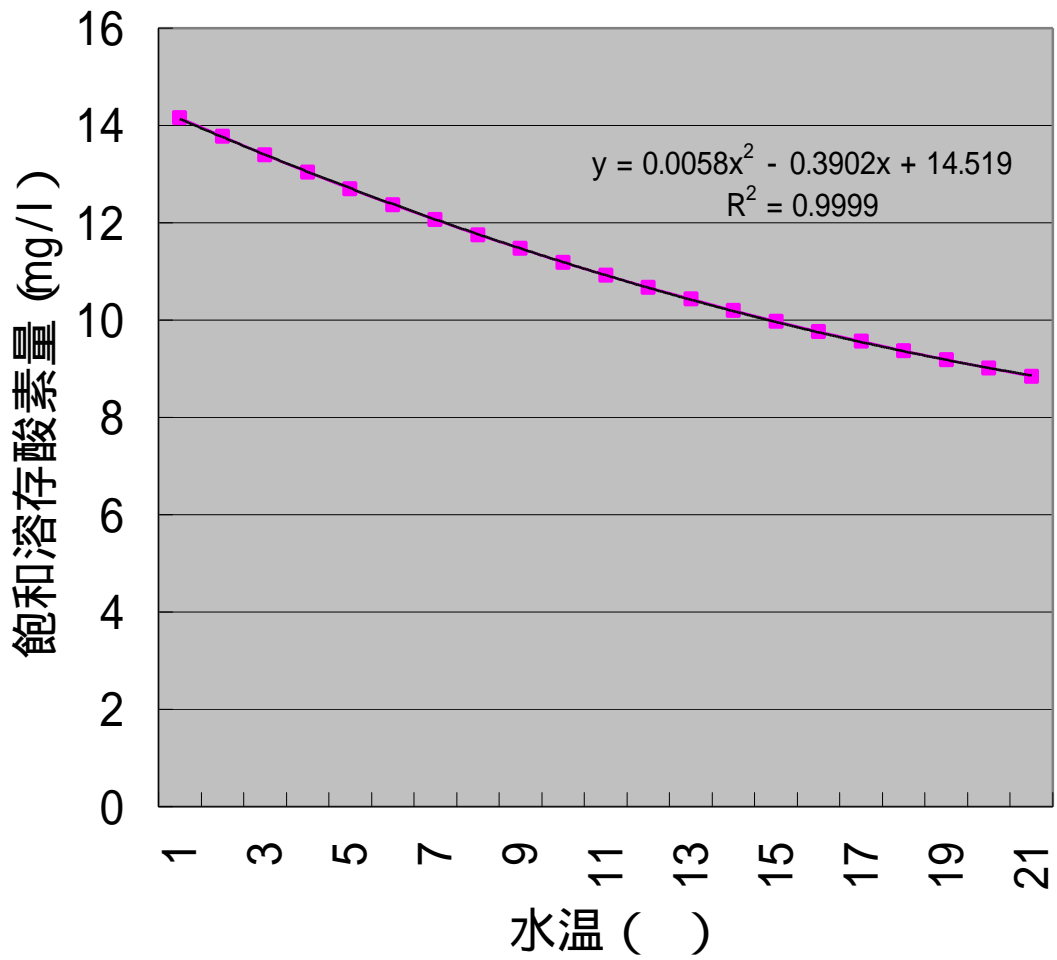


図 - 4 - 4 飽和溶存酸素量 C_s と水温の関係

| 落下高さ:H(cm) | 流量 :Q(l/min) | 被り水深 :h (cm) | | |
|------------|--------------|--------------|----------|----------|
| | | 10 | 40 | 60 |
| 10 | 20 | 2.79E-03 | 1.50E-02 | 1.40E-02 |
| 10 | 100 | 8.16E-03 | 1.14E-02 | 1.01E-02 |
| 10 | 200 | 1.70E-02 | 2.04E-02 | 2.30E-02 |
| 20 | 20 | 1.02E-02 | 1.02E-02 | 1.09E-02 |
| 20 | 100 | 3.75E-03 | 1.78E-02 | 9.63E-03 |
| 20 | 200 | 2.99E-02 | 3.55E-02 | 3.89E-02 |
| 40 | 20 | 1.32E-02 | 1.35E-02 | 2.30E-02 |
| 40 | 100 | 2.97E-02 | 4.78E-02 | 3.85E-02 |
| 40 | 200 | 4.05E-02 | | 5.88E-02 |
| 80 | 20 | 2.67E-02 | 4.32E-02 | 2.96E-02 |
| 80 | 100 | 5.43E-02 | 6.33E-02 | 5.80E-02 |
| 80 | 200 | 5.47E-02 | 7.94E-02 | 8.45E-02 |
| 160 | 20 | 3.51E-02 | 3.86E-02 | 3.49E-02 |
| 160 | 100 | 6.39E-02 | 6.31E-02 | 6.56E-02 |
| 160 | 150 | 8.58E-02 | 1.00E-01 | 6.93E-02 |

図 4 - 5 各水理因子での再曝気係数 K_2

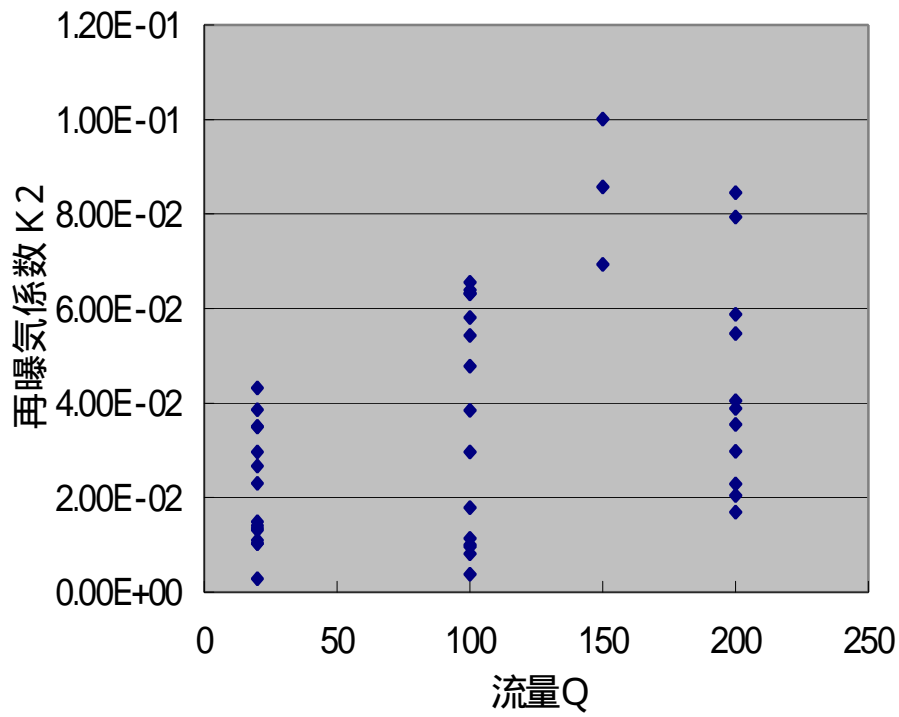
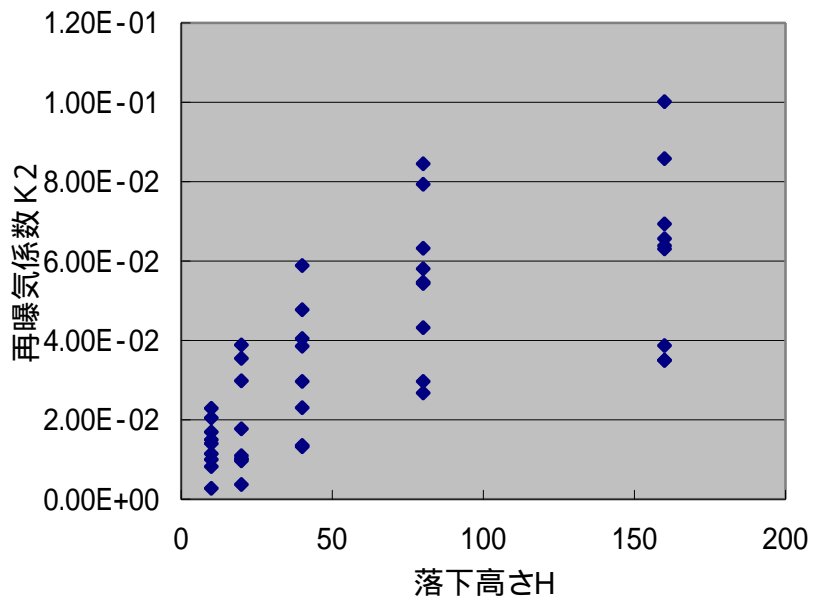


図 - 4 - 6 再曝気係数と流量の関係



第5章 再曝気係数のモデル化

5 - 1 落下水による酸素移動モデル

堰を越える落下水による酸素移動現象は、落下水脈表面および着水後の気液界面での乱れの状態がその移動速度の支配的な要因であると考えられる。河川・水路での流れによる酸素移動速度を推定するモデル式には、エネルギー逸散率モデルと乱れ強度モデルが提案されている。何れのモデルも、酸素移動係数 K_L に対して、以下に示す Dankwart の表面更新モデル用いている。

$$K_L = \sqrt{D_m g} \text{ ----- (5 - 1)}$$

ここに、 D_m : 拡散係数 (cm^2/s)、 g : 表面更新率($1/\text{s}$)である。

酸素移動速度推定モデルでは、(5 - 1)式の表面更新率 g をどのように表すかが重要となる。

まず、表面更新率 g の表現法にはつぎの2通りのが用いられている。つまり、表面更新率 g は次元 [1 / 時間] をもつから、

エネルギー逸散率 (供給率) と動粘性係数を用いて以下のように表す。

$$g = \left(\frac{G}{\nu} \right)^{1/2} \text{ ----- (5 - 2)}$$

ここに、 G : エネルギー逸散率 (供給率) (cm^2/s)、 ν : 動粘性係数 (cm^2/s) である。

速度スケール u および長さスケール l を用いて以下のように表す

$$g = u/l \quad \text{----- (5 - 3)}$$

の2通りが用いられている。

長さスケール l は、表面張力 s (g/s^2)、密度 r (g/cm^3)、速度 u (cm/s) を用いると次元解析により、

$$l = s/ru^2 \quad \text{----- (5 - 4)}$$

と表せる。

つぎに、表面更新率 g を表すのに、kolmogoroff の最小渦の特性か、エネルギー保有渦の特性を用いるかでモデルが異なる。モデルに kolmogoroff の最小渦の特性を用いたものがエネルギー逸散率モデルと呼ばれ、モデルにエネルギー保有渦の特性を用いたものが乱れ強度モデルと呼ばれている。

エネルギー逸散率モデル：このモデルは (5 - 3)、(5 - 4) 式の数値スケールに kolmogoroff の最小渦の数値スケールを用いて導かれており、次式で表されている。

$$K_L = c_1 \sqrt{D_m (r/s)(ne)^{3/4}} \quad \text{----- (5 - 5)}$$

ここに、 e : エネルギー逸散率、 c_1 : 定数である。

また、(5 - 2)式のGにエネルギー逸散率を用いると次式が導かれる。

$$K_L = c_2 \sqrt{D_m (e/n)^{1/2}} \quad \text{----- (5 - 6)}$$

ここに、 C_4 : 定数である。

乱れ強度モデル : このモデルは (5 - 3) (5 - 4) 式の数値スケールに乱れ強度を用いて導かれており、次式で表せる。

$$K_L = c_3 \sqrt{D_m (r/s) u'^3} \quad \text{----- (5 - 7)}$$

ここに、 u' : 乱れ強度(cm/s)、 c_3 : 定数である。

また、(5 - 2)式のGに水面への乱れエネルギーの供給率を乱れ強度を用いて表すと、

$$K_L = c_4 \sqrt{D_m \{ (ru'^5/s)/n \}^{1/2}} \quad \text{----- (5 - 8)}$$

が導かれる。ここに、 c_4 : 定数である。

5 - 2 落水水による再曝気モデル

堰を越えた落水水による酸素吸収は、落水水脈表面、下流側水面および落水水により発生する気泡によるものと考えられる。ここで、落水水の水面衝突による気泡発生に基づく酸素吸収が他のものより大きいと推察される。つまり、堰を越えた落水水脈による酸素吸収は落水水の持つ単位時間、単位幅あたりの水面突入時の運動エネルギーと密接に関係するものと考えられる。そこで、前述の河川・水路における酸素移動係数モデルであるエネ

ルギー逸散率モデルおよび乱れ強度モデルのうち、後者の乱れ強度モデルの適用を試みる。

落下時のエネルギー損失を無視すると、ベルヌーイの定理により、落下水の単位幅あたりの運動エネルギー E/B に関して、次式が成立する。

$$\frac{E}{B} = \frac{rQ}{B} \left(\frac{v_1^2}{2} \right) = \frac{rQ}{B} \left(gH + \frac{v_0^2}{2} \right) \text{----- (5 - 9)}$$

ここに、 Q : 落下水量 (cm^3/s)、 v_0 、 v_1 : それぞれ積を越える前および水面突入時の流速 (cm/s)、 g : 重力加速度 (cm/s^2)、 H : 落下高さ (cm)、 B : 落下水の幅 (cm) である。

いま、(5 - 9) 式右辺の () の第 2 項を第 1 項に比べて無視できるものとする、

$$\frac{E}{B} \cong \frac{rQgH}{B} \text{----- (5 - 10)}$$

となる。

乱れ強度モデル (5 - 7) と (5 - 8) 式を用いて、(5 - 10) 式から、落下水による酸素移動係数推定モデルとして次式を得る。

$$K_L = c_3 \sqrt{D_m (r/s) (wgQH/ub)^{3/5}} \text{----- (5 - 11)}$$

$$K_L = c_4 \sqrt{D_m \{ (r/s) (wgQH/rB) \}^{1/2}} \text{----- (5 - 12)}$$

5 - 3 モデルの検討

落水水による酸素移動係数推定モデル(5 - 11)式および(5 - 12)式についてそれらの適合性について検討する。

河川・水路の水面付近での酸素移動を検討する場合には、その移動速度の指標としては、(13)式で示されるように水深の影響を大きく受ける再曝気係数 K_2 より、面積あたりの移動量を表す酸素移動係数 L_L が適切であるといえる。

$$K_L = K_2 \left(\frac{V}{A} \right) \text{-----} (5 - 13)$$

ここに、 V : 体積(cm^3/s)、 A : 接触面積(cm^2)であり、 V/A は水深を表している。

本卒論では、前述の水理実験で示しているように、落水水による酸素移動を再曝気係数 K_2 で測定した。また、全ての実験は $V = \text{const.}$ 、 $A = \text{const.}$ 、つまり水深 = 一定の条件で行っているので、モデル(5 - 11) (5 - 12)式において $K_L \rightarrow K_2$ と置き換えてそれらの適合性を検討する。すなわち、(5 - 11)式、(5 - 12)式から得られる

$$K_2 \propto (QH)^{3/10} \text{-----} (5 - 14)$$

$$K_2 \propto (QH)^{1/4} \text{-----} (5 - 15)$$

の適合性を実験結果を用いて検討する。図 - 5 - 1、図 - 5 - 2に K_2 と $(QH)^{3/10}$ 、 $(QH)^{1/4}$ の関係を示した。

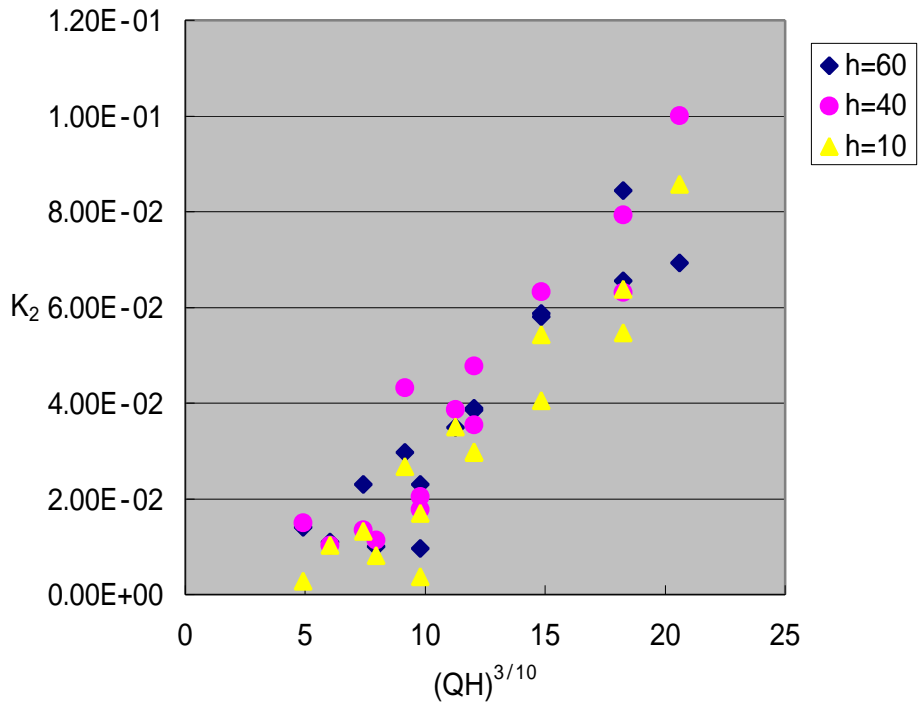


図 - 5 - 1 K_2 と $(QH)^{3/10}$ の関係

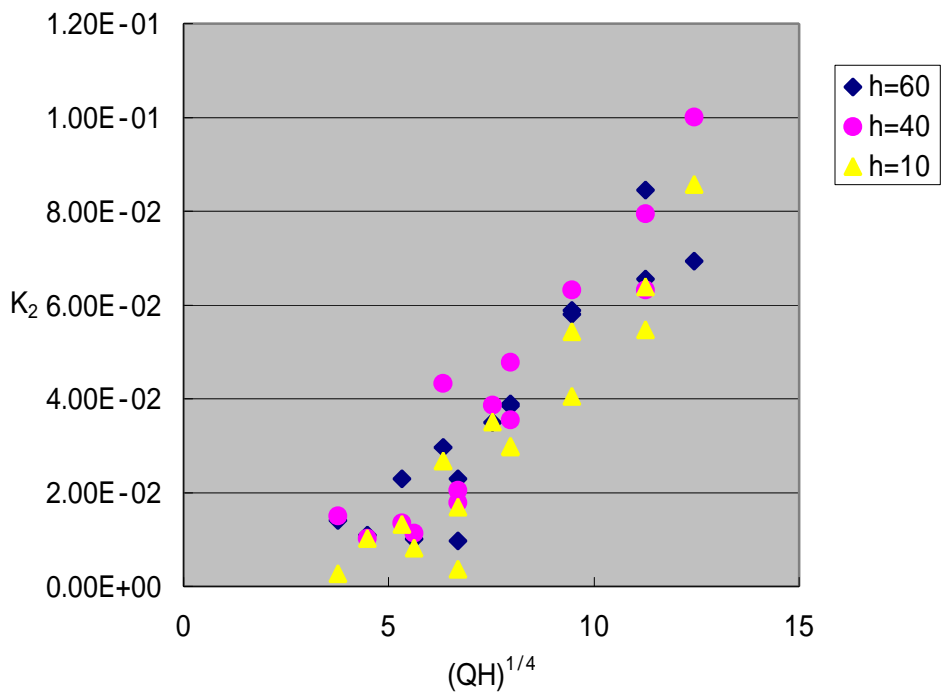


図 - 5 - 2 K_2 と $(QH)^{1/4}$ の関係

5 - 4 考察

図 - 5 - 1、図 - 5 - 2 とも勾配によるバラツキは小さく直線関係が得られるが、(5 - 15) 式であらわされた K_2 と $(QH)^{1/4}$ の関係よりも、(5 - 14) 式であらわされた K_2 と $(QH)^{3/10}$ の関係のほうが切片がゼロに近く、乱れ強度モデルを用いた再曝気モデルの適合性が高いといえる。しかし、乱れパラメータの適用は、推定に用いるマクロな水理量が正しく測定されているか、再曝気係数は正しく求められているかなどの問題がある。落水の再曝気係数の推定方法、現象のモデル化については、さらに検討が必要であると考えられる。また、今回の実験であつかった被り水深パラメータによる規則性が顕著には認められなかった。これは流量、落下高さのスケールに対して実験装置の規模が小さかつたことが考えられる。

第6章 結論

本実験より水理因子である、流量、落下高さを増大させることにより、再曝気係数の値が著しく大きくなることがわかった。これはエネルギー量の値と密接と関係していて、着水後の気液界面での乱れが特に曝気能が高いということを示している。また、被り水深を大きくすることによって、落下水の水面突入時に取り込まれた酸素（気泡）の滞留時間が長くなり、気泡は水中に溶け込みやすくなるため曝気能が高くなると推測したが、その傾向は認められなかった。

酸素吸収能を高めるためには、流量と落下高さを高める方法があるといえる。また河床に粗度を設け、乱れ強度を高めるという方法も考えられる。従来散気式、機械的かき混ぜ式等の曝気方式よりも、建設、維持管理が簡単で経済性の高い曝気方式、つまり堰の有する酸素吸収能、すなわち自然浄化能を積極的に利用することは省資源、省エネルギーの観点から重要である。

また、本実験により、乱れ強度モデルが酸素移動係数を推定するのに適当可能であるということが推察された。しかし、現象のモデル化についてはさらなる検討が必要であると考えられる。また越流堰との比較検討も今後の課題として挙げられる。

謝辞

本論文の作成にあたり，御指導，御協力を承りました九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学部門生産環境学講座の森健教授，井上英二助教授，原口智和助手に深く感謝し，厚く御礼申し上げます。

また，同講座修士課程衛藤鑑氏，尾崎彰則氏には，本研究を進めるに当たり終始惜しめない熱意と愛情溢れる御助言，御教示をいただくと共に，本論文の作成にあたり最後の最後まで温かい御激励をいただき，心より御礼申し上げます。

また，多方面にわたり広く御意見，御協力をいただいた同生産環境情報学講座の博士課程松井正実氏，平井康丸氏，修士課程紺屋秀之氏，高瀬敬史氏，桑野朋子氏，光岡宗司氏，すべての皆様に深く感謝いたします。

さらに，講座配属以来，本日に至るまで励ましあい，助け合った村松亮介氏，中島敬太郎氏，中島央晶氏，中村生子氏，福島崇志氏，丸谷一郎氏に深く感謝いたします。

最後にいつもかけながら協力，激励してくださった家族に心より感謝の意を捧げて結びとさせていただきます。

2002年3月 炭本 祥生

参考文献

- 1 . Davies J.J : Turbulence phenomena, Academic Press,
- 2 . 石原 藤次郎編 : 水工水理学、丸善
- 3 . 会田 健 : 水質工学基礎編、丸善
- 4 . 平山 公明、松尾 友矩、今岡 正美、平山 けい子 : 乱れ強度モデルに基づく
河川の再曝気係数の推定式、土木学会論文集、1995.8