

曝気を考慮した水質予測モデルの実貯水池への適用
Application of an eutrophication model considering
the flow induced by aeration to reservoirs.

(財) 電力中央研究所 正員 松梨 史郎 S. Matsunashi.
(財) 電力中央研究所 正員 宮永 洋一 Y. Miyanaga

1. まえがき

著者らは、貯水池や湖沼における富栄養化対策の1つとして提案されている曝気について、その連行現象を解析することによって、曝気による貯水池の水質変化を予測するモデルを構築し、モデルの妥当性を室内実験によって検証した。¹⁾

本研究は、同一水系、同一水質条件下での、実際に曝気を行っている貯水池と行っていない貯水池で、その水質と流動を測定して曝気の効果について把握するとともに、それぞれの貯水池に水質予測モデル²⁾、曝気を考慮した水質予測モデルを適用し、モデルの現地における適合性について検討したものである。

2. 水質予測モデルの概要

モデルは図1に示すように、貯水池を水平な層に分割し、各層内の平均水温を計算する鉛直1次元モデルで、対象とした水質項目は貯水池生態系の基本構造を構成する栄養塩、プランクトン、有機物および主要な関連項目を含む7項目である。これらの相互関係を図2に示す。栄養塩はリンまたは窒素を対象とし、有機物量の指標はTOCとした。

モデルの構造は、熱収支、流動、水質をそれぞれ計算するサブモデルから成る。このうち、熱収支と水質の計算は、当所が既に貯水池水質の予測を目的として作成した数値モデルに基づいている。²⁾

2.1 基礎方程式

基礎方程式は、流量、熱および物質の連続条件より以下のように表わされる。

$$\frac{\partial A V_w}{\partial z} = B (U_{in} - U_{out}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c A} \frac{\partial A \varphi}{\partial z} + J(T) \quad (2)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = (G_Y - R_Y - D_Y) Y + \frac{\partial w_{oY} Y}{\partial z} + J(Y) \quad (3)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = (G_Z - R_Z - D_Z) Z + J(Z) \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \sigma_{pY} [-G_Y + \beta_Y \{R_Y + (1 - f_Y) D_Y\}] Y + \sigma_{pz} \beta_z (R_Z + D_Z) Z + J(P) \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sigma_{cY} \{R_Y + (1 - f_Y) D_Y\} Y + \sigma_{cz} (R_Z + D_Z) Z - K_c C + \frac{\partial w_{oc} C}{\partial z} + J(C) \quad (6)$$

$$\frac{\partial O}{\partial t} = \sigma_{oY} (G_Y - R_Y) Y - \sigma_{oz} R_Z Z - \sigma_{oc} K_c C - \frac{K_b}{A} \frac{dA}{dz} + J(O) \quad (7)$$

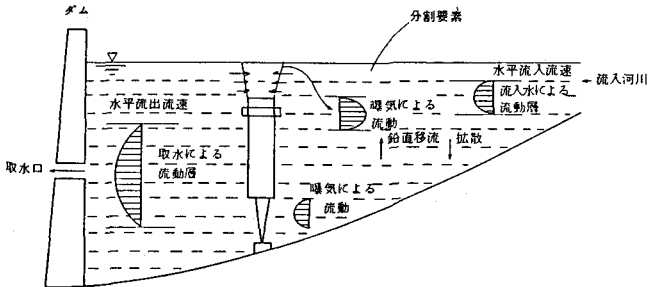


図1 貯水池の要素分割と内部の流れのモデル化

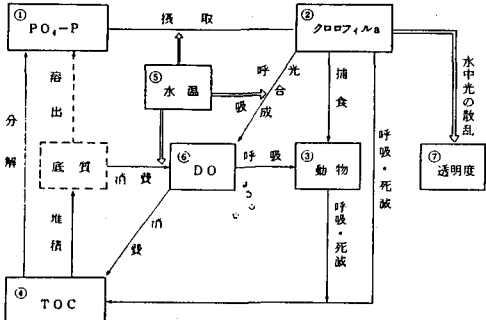


図2 水質項目間の相互関係(□内が計算対象項目)

ここに、T：水温、Y：クロロフィルa量、Z：動物プランクトン量、P：リン酸態リン量、O：溶存酸素、C：TOC、A：貯水池平面積、B：貯水池平均幅、Uin、Uout：水平流入、流出流速、Vw：鉛直流速、 φ ：水中輻射熱、 ρ 、c：水の密度、比熱、G：増殖率、R：呼吸率、D：死滅率、w₀：沈降速度、 β ：リンの回帰率、f_y：動物プランクトンの同化効率、Kc：TOCの分解速度定数、Kb：単位面積底泥の酸素消費フラックス、 $\sigma_{xx'}$ ：単位換算係数（水質x'→水質x）、添字Y、Z、Cはそれぞれ植物、動物、TOCを表わす。またJは移流、拡散による水質xの変化を表わす次のような関数である。

$$J(X) = \frac{B}{A} (U_{in} X_i - U_{out} X) - \frac{1}{A} \frac{\partial V_w A X}{\partial z} + \frac{E_x}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (8)$$

ここに、X_i：流入水質、E_x：鉛直方向拡散係数である。

2.2 流速の計算式

間欠式曝気を対象に、水平流速を次式で計算する。

$$U_{in} = U_i + U_{ai} \quad (9)$$

$$U_{out} = U_o + U_{ae1} + U_{ae2} \quad (10)$$

ここに、U_i、U_o：それぞれ曝気なしのときの流入、流出流速、U_{ai}：曝気による戻り流速、U_{ae1}、U_{ae2}：曝気による連行流速である。U_i、U_oは次式で計算する。

$$U_i = Q_i U \left(\frac{z - z_i}{\delta_i} \right) \quad (11)$$

$$U_o = Q_o U \left(\frac{z - z_o}{\delta_o} \right) \quad (12)$$

ここに、Q_i、Q_o：流入量、流出量、z_i、z_o：流入流、流出流の中心高さ、 δ_i 、 δ_o ：流入流、流出流の流動層厚、Uは次のような関数である。

$$U(\zeta) = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{1}{2}(3.92\zeta)^2\right\} / \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} B\{z(\zeta_1)\} \exp\left\{-\frac{1}{2}(3.92\zeta_1)^2\right\} d\zeta_1 & (|\zeta| \leq \frac{1}{2}) \\ 0 & (|\zeta| > \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (13)$$

U_{ae1}は曝気筒の下端からの連行流速で、次式で計算する。

$$U_{ae1} = Q_{ae1} U \left(\frac{z - z_{ea}}{\delta_{ea}} \right) \quad (14)$$

ここに、Q_{ae1}は曝気筒下端からの連行流量で次式で表わされる。³⁾

$$Q_{ae1} = \begin{cases} \frac{W_{am1} A_1 \Delta t_2}{\Delta t_1} & (\Delta t_1 \geq \Delta t_2) \\ W_{am1} A_1 & (\Delta t_1 < \Delta t_2) \end{cases} \quad (15)$$

ただし、W_{am1}：曝気筒内の気泡上昇速度、A₁：曝気筒断面積、 Δt_1 ：曝気筒の空気室の容量が満たされるのに要する時間、 Δt_2 ：気泡が筒内を上昇するのに要する時間である。また δ_{ea} 、z_{ea}：それぞれ下層連行流の流動層厚、流動の中心高さである。

U_{ae2}は曝気筒外部の気泡噴流による連行流速で、次式で計算する。

$$U_{ae2} = \begin{cases} \frac{1}{B} \frac{d Q_{ae2}}{dz} = - \frac{1}{B \sqrt{f f_a} F^2} \frac{d F}{dz} & (0 \leq z \leq z_s) \\ 0 & (z_s < z) \end{cases} \quad (16)$$

ここに、Q_{ae2}は気泡噴流による連行流量で次式で表わされる。

$$Q_{ae2} = \frac{Q_a^{atm}}{\sqrt{f f_a} F}, \frac{1}{F} = \sqrt{A_2 \frac{\rho - \rho_a}{\rho} g \int_0^z \frac{P_{atm} \sqrt{W_{am2}} Q_a^{atm}}{P_{atm} + \rho g (H_2 - z)} dz + \frac{f_a Q_{ae1} W_{am1} A_2}{Q_a^{atm^2}}} \quad (17)$$

ただし、Q_a^{atm}：大気圧下での注入空気量、f、f_a：分布形より決まる係数、A₂：噴流断面積、 ρ_a ：空気

密度， P_{atm} ：大気圧， W_{am2} ：気泡噴流内の平均気泡上昇速度， H_2 ：曝気筒上端の水深である。また周囲水はその水温成層のために、次式で定義する連行効率 R には上限値の存在することが考えられるため、その値を R_c ，そのときの鉛直方向位置を z_s とし、それ以浅の水深では連行計算を打ち切ることとする。

$$R = \frac{Q_{ae2} - Q_{ae1}}{Q_a^{atm}} \tag{18}$$

U_{ai} は曝気による戻り流速で、次式で計算する。

$$U_{ai} = Q_{ai} U \left(\frac{z - z_{ia}}{\delta_{ia}} \right) \tag{19}$$

ここに、 Q_{ai} は最終的に連行された流量で

$$Q_{ai} = \begin{cases} \frac{Q_a^{atm}}{\sqrt{f f_a} F(H_2)} & (z_s > H_2) \\ R_c Q_a^{atm} + Q_{ae1} & (z_s \leq H_2) \end{cases} \tag{20}$$

また δ_{ia} ， z_{ia} ：それぞれ戻り流れの流動層厚，流動の中心高さで、 U_{ai} は貯水池内の等密度の高さに流入するものとする。

2.3 プラントンの増殖，呼吸，死滅率の計算式²⁾

各計算式は以下のとおりである。

$$G_Y = G_{Ymax20} \theta^{T-20} f_I f_P \tag{21}$$

$$G_Z = \sigma_{ZY} f_Y C_{g20} \theta^{T-20} Y \tag{22}$$

$$R = R_{20} \theta^{T-20} \quad (\text{動物，植物共通の関数形}) \tag{23}$$

$$D_Y = C_{g20} \theta^{T-20} Z \tag{24}$$

ここに、 θ ：温度係数， f ：効率関数（添字は因子を表わす）， I ：照度または日射量， C_g ：動物プランクトン濾水速度，添字 20 は水温 20℃における値を意味する。各効率関数は以下のように与える。

$$f_I = (I / I_s) \exp(1 - I / I_s) \tag{25}$$

$$f_P = P / (K_P + P) \tag{26}$$

$$f_Y = a_s K_Y / (K_Y + Y) \tag{27}$$

3. 現地実測

次に、実際に曝気を行っている貯水池と、行っていない貯水池の水質と流動を測定し、比較検討した。

調査の対象とした貯水池は、K 貯水池（曝気なし）とその余水を貯留している M 貯水池（曝気あり）で、前者は治水、かんがい、工業用水、発電等に、後者は工業用水に利用されている。両貯水池の運用の相互関係を図 3 に、M 貯水池の曝気装置の設置位置を図 4、装置の概要を表 1 に示す。

調査は両貯水池の湖内水質、K 貯水池の流入河川水質と流速、M 貯水池の曝気による流動について行った。調査地点を図 4 に示す。

図 5～8、12～14 に M 貯水池の流速測定結果と水質測定結果を、図 9～11 に K 貯水池の水質測定結果を示す。

図 5、6 は電磁流速計による流速成分の時系列データ（測定時間 10 min，間隔 0.1 sec），及び自己相関係数の 1 例を示したものである。流速変動は不規則で、乱れ強度が大きいことを示しているが、両図とも 6～8 sec 間にピークが見られ、間欠式曝気の周期性が認められる。

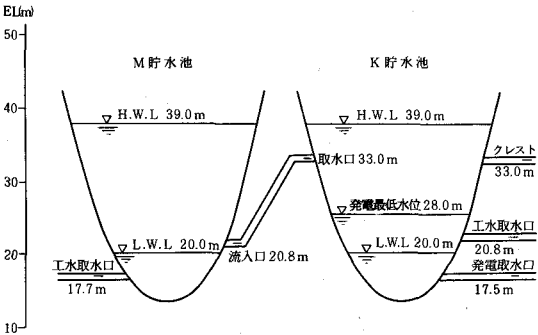


図 3 K，M 両貯水池の運用水位と相互関係

表1 M貯水池曝気装置の概要

注入位置	注入方式	曝気筒 口径×長さ(m)	注入空気量 (m^3/min)	運転時間 (hr)
ダム上流	間欠	$\phi 0.4 \times 8.0$ (4台)	0.56 (5台)	24
50~300m	周期	$\phi 0.4 \times 7.0$ (1台)		(4月~
6箇所	5~10sec	$\phi 0.3 \times 5.0$ (1台)	0.39 (1台)	10月のみ)

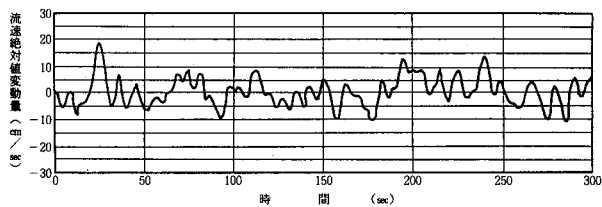


図5 M貯水池流速の時系列
(曝気筒より3.5 m, 水深0.2 m)

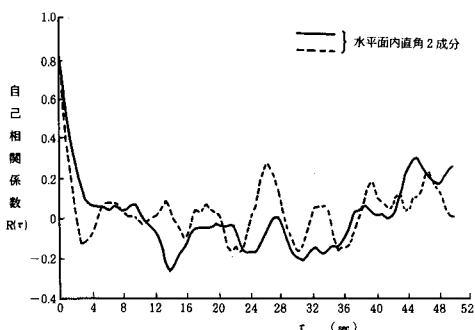


図6 M貯水池流速の自己相関係数
(曝気筒より3.5 m, 水深0.2 m)

図7に、M貯水池の曝気筒から3.5, 7.0, 10.5 m離れた3断面における平均流速の鉛直分布を示す。曝気筒から広がる放射状の流れは、表層の範囲内でほぼ直線分布を成し、曝気筒から10.5 mの断面内の最大値が8 cm/secであることと、水深0.5 m以深に曝気筒に向う弱い水平流の存在すること、K貯水池の表層流速が7~9 cm/sec程度であることを考慮して、曝気筒から離れるに従って風等の自然による流れが卓越するが、貯水池全体にはゆるやかな循環が生じている可能性が考えられる。

図8に、M貯水池の曝気筒から東西対称に3.5 m離れた2断面における、表層付近の詳細な平均流速分布を示す。この流速分布より流量を算出し、単位注入空気量当りの連行流量を求めた結果は表2のようになり、200程度の値となっている。

図9, 10にK貯水池の、図12, 13にM貯水池の水温及びDOの鉛直分布の経時変化を示す。水温分布は、K貯水池は水面から水底まで直線的な成層が見られるのに対し、M貯水池では鉛直方向にほぼ一様な分布となっているのがわかる。DO分布は、K貯水池は表層の高い値が急激に低下

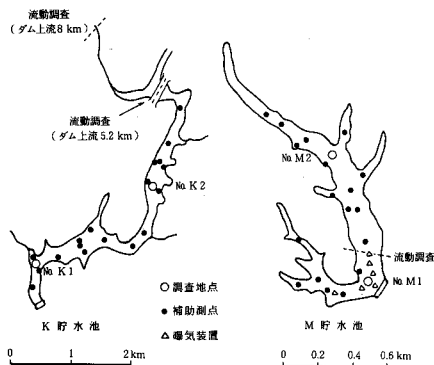


図4 調査地点

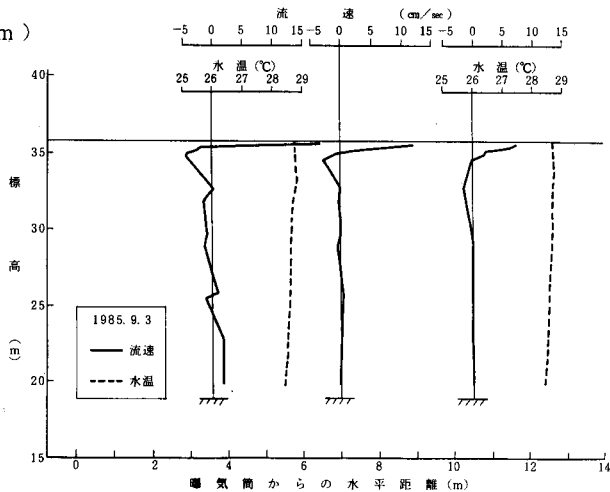


図7 曝気筒付近の平均流速の鉛直分布
(曝気筒から3.5, 7, 10.5 m)

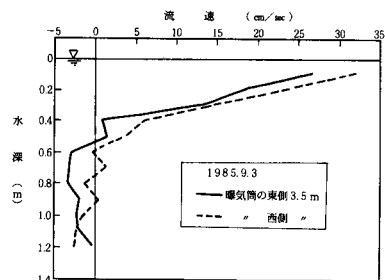
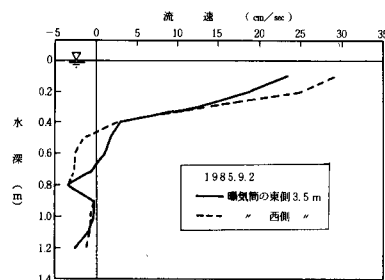


図8 曝気筒付近の平均流速の鉛直分布
(曝気筒から3.5 m)

表2 連行流量と連行効率

測定日	流動層 厚さ(m)	水温勾配 ($10^{-3}^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	連行流量 (m^3/sec)	注入空気量 ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$)	連行流量 注入空気量
9月2日	0.60	6.2	1.70	9.33	182
9月3日	0.55	12.8	1.86	9.33	199

* 東側と西側断面の平均

** " , 水深0.1mと16mの水温測定値(3回平均)より算出

*** 1気圧時のコンプレッサー吐出し空気量

し、中層でわずかに回復するS字形を呈しているのに対し、M貯水池では表層から中層付近までDOが豊富で底層のみが貧酸素状態となっている。

図11にK貯水池の、図14にM貯水池の表層のクロロフィルaの経時変化を示す。K貯水池に比べてM貯水池では全般的に値が低く、植物プランクトンの発生の抑えられているのがわかる。

4. 水質予測モデルの適用

K貯水池及びM貯水池に、それぞれ曝気による流動を考慮しないモデルと考慮したモデルを適用し、既に実験室規模で検証した曝気による水質変化予測モデルの、実規模貯水池での整合性について検討した。

K貯水池の水温、DOの鉛直分布の計算結果と実測値との比較を、それぞれ図9、10に示す。水温の計算値は実測値の成層状態をよく模擬している。DOの計算値は表層では低めの値となっているが、実測値のS字形の傾向はよく模擬できているものと思われる。

K貯水池は表3に示すように、実測のN/Pの値から窒素、リン両制限型と考えられるため、式(5)の栄養塩が窒素、リンの両方について計算を行ったが、表層のクロロフィルaは図11に示すように窒素制限型の計算がやや良好という結果になっている。

次に表5に示す曝気流動の入力条件に基づいて、M貯水池に水質予測モデルを適用した。入力条件のうち曝気筒数は、湖内に設置された曝気筒の形状が異なるため5.5本とし、1本の曝気筒による連行量を5.5倍した。

表3 TN/TP,DTN/DTP値
(K貯水池測点混合値)

項目 \ 月日	6/27	8/1	8/27	9/27
TN/TP	15.6	12.8	14.1	13.6
DTN/DTP	12.6	13.2	13.3	20.7

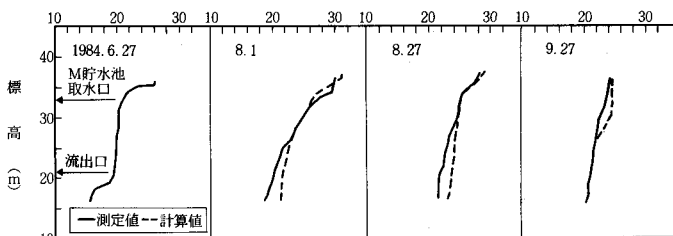


図9 水温鉛直分布(K貯水池)

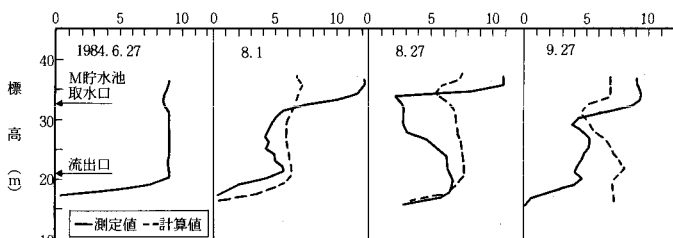


図10 DO鉛直分布(K貯水池)

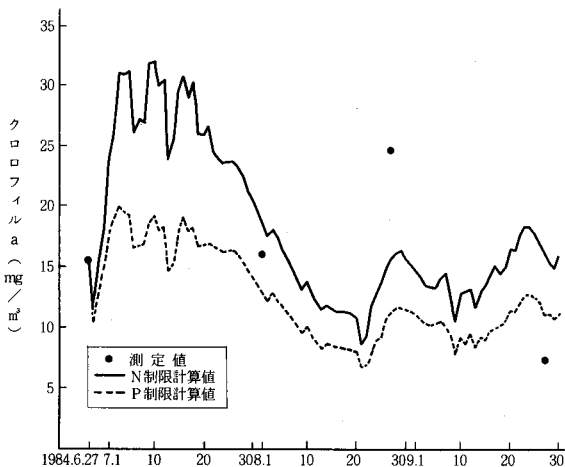


図11 表層クロロフィルa(K貯水池)

表4 TN/TP,DTN/DTP値
(M貯水池測点混合値)

項目 \ 月日	6/27	8/1	8/27	9/27
TN/TP	20.9	22.7	22.1	22.1
DTN/DTP	23.8	32.9	24.5	28.3

表5 曝気流動入力条件

パラメーター及び係数	数 値
空気室入口から曝気筒上端までの距離 H_1 (m)	8.0
曝気筒上端の標高 (m)	31.69
曝気筒下端の標高 (m)	23.69
空気室の容積 V (m ³)	0.042
曝気筒直径 (m)	0.4
注入空気量 Q_a^{atm} (m ³ /s)	0.009
曝気筒数 (本)	5.5

表6 曝気筒1基の連行流量(計算値)

層	標 高	6/27	8/ 1	8/27	9/27
20	37.00-37.71	—	—	2.887	—
19	36.00-37.00	2.167	2.750	1.966	2.331
18	35.00-36.00	1.532	1.405	1.336	1.593
17	34.00-35.00	0.966	0.937	0.917	0.977
16	33.00-34.00	0.610	0.603	0.597	0.613
15	32.00-33.00	0.346	0.345	0.344	0.347

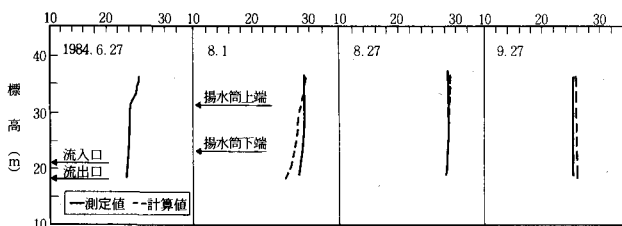


図12 水温鉛直分布 (M貯水池)

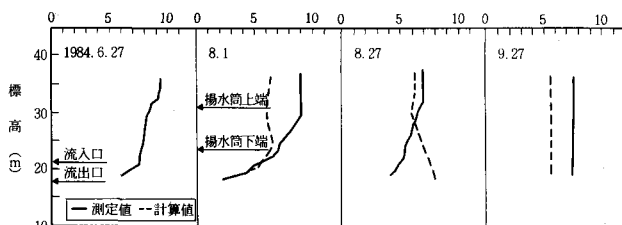


図13 DO鉛直分布 (M貯水池)

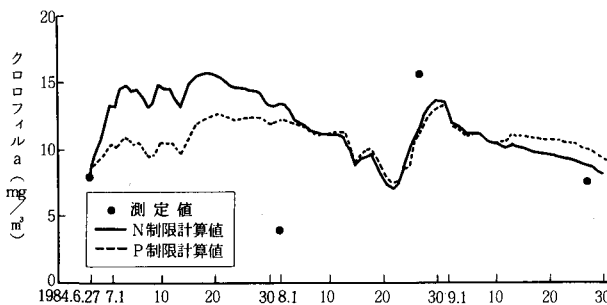


図14 表層クロロフィルa (M貯水池)

表6に、シミュレーションによる連行流量の計算結果を示す。連行効率に上限値を設けず、表層まで連行計算を行っているため表層の値は若干高めているが、ほぼ妥当な値が計算されていると考えられる。

M貯水池の水温、DOの鉛直分布の計算結果と実測値との比較を、それぞれ図12、13に示す。水温の計算値は上下層の混合をよく模擬しており、DOは表層の値が低くなっているが、鉛直分布の傾向はほぼ模擬できているものと考えられる。

また表4に示すように、M貯水池は実測のN/Pからはリン制限と判断されるが、図14に示されるように、表層クロロフィルaの計算値は窒素制限型、リン制限型に顕著な差は現われていない。

5. 結 語

同一水系、同一水質条件下での、実際に曝気を行っている貯水池と行っていない貯水池で、その水質と流動を測定し、曝気による混合効果を確認するとともに、既に実験室規模でその適合性を検証した、曝気を考慮した水質予測モデルを適用し、実規模貯水池においても曝気による水質変化がモデルによって予測し得ることが確認できた。

参考文献

- 1) 松梨・宮永：曝気による貯水池内の流動のシミュレーション，第31回水理講演会論文集，1987。
- 2) 宮永・白砂：貯水池富栄養化現象の数値シミュレーションモデル，電力中央研究所報告No.383044，1984。
- 3) 松梨・宮永：曝気による貯水池内流動のモデル化，第41回年次講演会概要集，1986。