

京都大学大学院 学生員 佛原 肇
 京都大学工学部 正 員 岩佐義朗
 京都大学工学部 正 員 松尾直規

1 はじめに 近年、貯水池において、冷水、濁水長期化とともに富栄養化が大きな問題となってきたが、富栄養化は様々な自然的プロセスと、人為的要素とが複雑にかみあって進行するものだけに、その解明は十分に行なわれているとはいえない。従来の研究は、富栄養化をそれに関する水質因子の、化学的、生物学的挙動の面から、取り扱ったものが多かったが、本研究では、富栄養化と貯留水の化学的、生物学的挙動のみならず、物理的な面からも考察し、その挙動を貯水池水理モデルを用いて数値解析することにより、水理学的に取り扱おうとするものである。

2 水質指標について モデルを実際の貯水池に適用するさい、富栄養化の水質指標としてどのようなものをとればよいかということが問題となるが、対象とした厚生貯水池においては、夏期には水温成層が形成され、それにより表層付近の高温層に植物プランクトンが増大し、また一方では、植物プランクトンに摂取されることにより、無機態窒素やリン濃度が表層付近で低下し、それらの間に密接な関係があることがわかっている¹⁾。また従来より、植物プランクトンが富栄養化現象に関係する最も重要な因子とされ、窒素、リン、動物プランクトンも植物プランクトンの増殖、捕食に関係が深いとされているので、本研究では、これらを水質因子として選り、その指標として、クロロフィル α 、動物プランクトンに相当する炭素量、総リン、無機態窒素、有機態窒素を採用する。

3 モデルと基礎式 いま、対象とする貯水池水の水質は、水温同様、貯水池内において物理的には連続性を有する濃度として取り扱うことができるので、貯水池水の物理学的挙動を支配する基礎原理として、水の連続式、運動量保存則、水温収支則、濃度収支則が適用される。富栄養化を取り扱うに際しては、濃度収支則に化学的、生物学的生産、消費の項が附加されるが、それらについては図-1に示すようなものと考え、富栄養化を対象とする貯水池水理の基礎式は、コントロール・ボリューム法を用いて次のように表示される。なお、このときのコントロール・ボリュームは、対象とする水質の空間的变化の一様性やスケールを考え、濁水解析の場合と同様、流下方向、水深方向に貯水池を分割した体積要素としている。

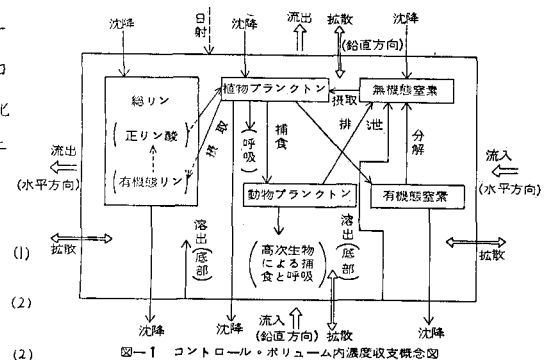


図-1 コントロール・ボリューム内濃度収支概念図

$$|U \cdot A|_{x_i}^{n+1} + |U \cdot B|_{x_i}^{n+1} \Delta y + \bar{q}_b = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{A} |U \cdot U \cdot B|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} |U \cdot V \cdot A|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A} |P \cdot B|_{x_i}^{n+1} + \frac{1}{A} |D_{mx} \cdot B \cdot \frac{\partial U}{\partial x}|_{x_i}^{n+1} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{xy} \cdot A \cdot \frac{\partial U}{\partial y}|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} U_b \cdot \bar{q}_b$$

$$P = \int_0^{H-y} \rho g \, dy$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{A} |T \cdot U \cdot B|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} |T \cdot V \cdot A|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A} |D_{Tx} \cdot B \cdot \frac{\partial T}{\partial x}|_{x_i}^{n+1} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{Ty} \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial y}|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} T_b \cdot \bar{q}_b + H$$

$$\frac{\partial C_P}{\partial t} = -\frac{1}{A} |C_P \cdot U \cdot B|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} |C_P \cdot V \cdot A|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A} |D_{Px} \cdot B \cdot \frac{\partial C_P}{\partial x}|_{x_i}^{n+1} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{Py} \cdot A \cdot \frac{\partial C_P}{\partial y}|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} C_{Pb} \cdot \bar{q}_b + \frac{1}{A \Delta y} |C_P \cdot U_{0,y} \cdot A|_{x_i}^{n+1} + G_{CP} - K_P \cdot T \cdot C_P - G_Z$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{1}{A} |Z \cdot U \cdot B|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} |Z \cdot V \cdot A|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A} |D_{Zx} \cdot B \cdot \frac{\partial Z}{\partial x}|_{x_i}^{n+1} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{Zy} \cdot A \cdot \frac{\partial Z}{\partial y}|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} Z_b \cdot \bar{q}_b + \alpha \cdot Q_Z \cdot G_Z - K_Z \cdot T \cdot Z - K_o \cdot Z$$

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = -\frac{1}{A} |N_0 \cdot U \cdot B|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} |N_0 \cdot V \cdot A|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A} |D_{Nx} \cdot B \cdot \frac{\partial N_0}{\partial x}|_{x_i}^{n+1} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{Ny} \cdot A \cdot \frac{\partial N_0}{\partial y}|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} N_{0b} \cdot \bar{q}_b - \beta G_{CP} + K_L (N_0 - \beta C_P - \beta Z) + \frac{1}{1000 \Delta y} \beta (1 - \alpha_0) G_0$$

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = -\frac{1}{A} |N_0 \cdot U \cdot B|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} |N_0 \cdot V \cdot A|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A} |D_{Nx} \cdot B \cdot \frac{\partial N_0}{\partial x}|_{x_i}^{n+1} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{Ny} \cdot A \cdot \frac{\partial N_0}{\partial y}|_{x_i}^{n+1} - \frac{1}{A \Delta y} N_{0b} \cdot \bar{q}_b + \frac{1}{A \Delta y} |N_0 \cdot U_{0,y} \cdot A|_{x_i}^{n+1} + \beta G_{CP} - K_L (N_0 - \beta C_P - \beta Z) - \beta (1 - \alpha_0) G_0$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{1}{A} |R_n \cdot U \cdot B|_{x_c}^{x_{c+1}} \frac{1}{A \cdot \Delta y} |R_n \cdot U \cdot A|_{y_n}^{y_{n+1}} + \frac{1}{A} |D_{nx} \cdot B \cdot \frac{\partial R}{\partial x}|_{x_c}^{x_{c+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta y} |D_{ny} \cdot A \cdot \frac{\partial R}{\partial y}|_{y_n}^{y_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta y} R_n \cdot g_b + \frac{1}{A \cdot \Delta y} |R_n \cdot U_n \cdot A|_{y_n}^{y_{n+1}} + \frac{L_p}{1000 \cdot \Delta y} \quad (9)$$

ただし、

$$g_b = \int \{ U_b \cos \theta(x, y) + U_b \cos \theta(y, z) + W_b \cos \theta(z, y) \} dA_b$$

$$C_{cp} = \mu_c \cdot K_{\mu} \cdot T \cdot \frac{I_p}{I_s} \cdot \exp \left[1 - \frac{I_p}{I_s} \right] \cdot \frac{N_c}{K_n + N_c} \cdot \frac{P_c}{K_p + P_c} \cdot C_p \quad (11)$$

$$C_{T2} = C_g \cdot \frac{K_{cp}}{K_p + C_p} \cdot Z \cdot C_p \quad (12)$$

従来のモデルの多くは、流体力による輸送や水温などの物理的因子の取り扱いについては、水の連続式、運動量保存式、水温収支則を連立して解くことなく、水の運動学的条件や水温をあらかじめ与えることにより代用し、(5)式から(9)式のような濃度収支則だけを用いて構成されていたが、流れの運動学的挙動や富栄養化に関係する物理因子としての水の運動ならびに水温の影響を明らかにするには、(1)式から(9)式を同時に解く必要がある。

なお、記号の説明は、紙面の都合から講演時に述べる。

4 聖生ダム湖への適用とその結果

上記(1)~(9)式を筆者らが、水温、濁度のシミュレーション解析に用いたものと同様の境界条件のもとで、階差式に変形して計算を進める。なお、(2)式の圧力項は、計算の簡単化のため省略する。表-1、2には、計算に用いた、水質の流入条件と各係数値の値を示している。図-2、3は、その計算結果の一例である。図-2より水温ならびに各水質指標の時間的変化は比較的良好にシミュレートされているといえるが、それぞれ値については十分とはいえない部分もある。また、出水時(4月上旬、6月下旬)には、貯水池への汚濁物質の流入に伴う、総リン、無機態窒素、有機態窒素濃度の急激な上昇がみられ、その後の植物プランクトンの大増殖に大きな影響を与えており、表-1に示した流入条件の検討が必要であろう。図-3の鉛直分布の計算結果では、水温の空間的変化は良く表現されており、また、各水質指標についても分布形状はおおむね説明されているといえよう。

5 おわりに 以上より、貯水池水理モデルによるシミュレーションでは、対象とする水質の時間的、空間的変化が、少なくとも定性的に正しく説明されており、貯留水の物理的挙動の詳細な把握がこうした結果に反映されていると考えて良いであろう。しかしながら、表-2の係数値の同定を含め、各水質指標の生物学的化学的变化に関する不確定要素が、シミュレーション結果にかなりの影響を及ぼすため、その点に注意するとともに、さらに今後検討を要するであろう。

参考文献 1) 松尾、岩佐、佛原；貯水池水の物理的挙動と富栄養化について、第33回工学会年次学術講演会、1978

2) 岩佐、松尾、遠藤；洪水時における貯水池の成層破壊について、京都大学防災研究所年報第20号-B、1977

係数値	採用値	係数値	採用値
μ_c	1.02	g_b	0.6
K_{θ}	0.04 (1/c)	K_{θ}	0.002 (1/°C·day)
I_s	360 (cal)	K_{θ}	0.01 (1/day)
K_N	0.1 (mg/l)	B	0.01 (ppm-n/ppb-chla)
K_p	0.01 (mg/l)	K_L	0.005+0.001·T (1/day)
K_A	0.005 (1/°C·day)	γ	0.2 (ppm-n/ppm-c)
C_g	0.25 (1/mg·C·B)	$V_{c,sp}$	0.3 (1/day)
K_{cp}	60 (ppb)	$V_{o,pH}$	0.3 (1/day)
α	0.05	$V_{o,DO}$	0.3 (1/day)

表-1 生成項の各係数値

表-2 流入条件

水質因子	流入濃度(平均)	備考
水温	観測値(毎3)	観測値の平均
クロロフィルa	$L=0.34560$	
動物プランクトン(炭素量)	$L=0$	
無機態窒素	$L=109.5Q^{0.972}$	$L=$ 相関より 相関係数 0.94
有機態窒素	$L=32.17Q^{1.263}$	$L=$ 相関より 相関係数 0.76
総リン	$L=12.40Q^{1.004}$	$L=$ 相関より 相関係数 0.92

L : 流入負荷量 (kg/日) Q : 流入流量 (m³/秒)

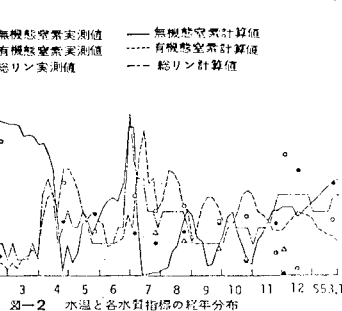
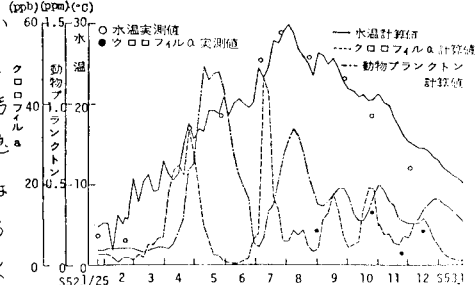


図-2 水温と各水質指標の経年分布

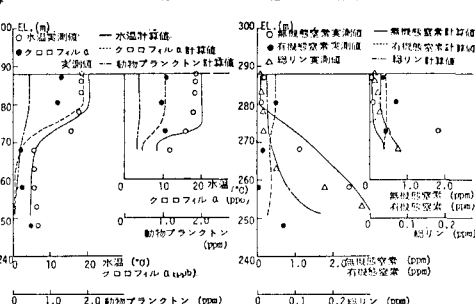


図-3 水温・各水質指標の鉛直分布計算結果