

中部工業大学 正員 ○ 松尾直規  
京都大学工学部 正員 岩佐義朗  
建設省土木研究所 正員 森北佳昭

1. はじめに 貯水池の富栄養化に関係する各種水質濃度の分布は、水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化することが知られている。いいかえれば、貯水池内でのこれらの変化は、水温成層や光層の深さに関係するばかりでなく、流入(出)水の流れの運動学的挙動及び流入栄養塩類の分布、さらには貯水池の複雑な幾何形状などによっても大きな影響を受ける。本研究は、こうした富栄養化関係物質の濃度分布特性を、著者らの貯水池水理モデルにより数値解析し、その結果に基づいて、富栄養化過程における各種水質要素の挙動とその変化に寄与する流れの場合との関係を考察したものである。

2. 数値解析モデル 貯水池における富栄養化の解析にも、水温及び濁度を対象とする場合と同様に、流体力学原理を出发点とした二次元の貯水池水理モデルが適用される。このモデルについては、既に詳述している<sup>1)</sup>ので説明は省略するが、富栄養化の解析にあたって、クロロフィル $a$ (植物プランクトン)、炭素(動物プランクトン)、総リン、無機態窒素及び有機態窒素の各濃度を指標に選び、これらの生物学的・化学的生産・消費項とそれらの濃度収支則に付加することにより、

表-1 富栄養化解析モデル

その適用を図ったものが、表-1に示す富栄養化解析モデルである。このモデルでは、各水質濃度の生産・消費項に因する水温の影響を指数関数で表現するとともに、津野<sup>2)</sup>が提案した植物プランクトンの増殖に関するスペース効果( $\beta_s$ )と浮遊物質(ここではクロロフィル $a$ 濃度で代表している)による日射の減衰係数 $\eta$ の影響を考慮している。なお、式中の各記号の説明は紙面の都合上省略するが、既報<sup>2)</sup>で用いたものと同様である。

3. 数値解析結果とその考察 表-1のモデルを奈良県宝生貯水池に適用し、昭和52年1月25日～10月31日の期間について、各種水質濃度の変化を数値解析したが、その結果の一例が図-1～4である。解析にはRunge-kutta法を用い、 $\Delta x = 200\text{m}$ ,  $\Delta y = 1\text{m}$ とし、また安定条件を満たすように $\Delta t$ を与えた。なお、境界条件はらばに各種のパラメータ値等については、既報のものと同様である。

図-1～4は、安定した水温成層が標高270m～275mの位置に形成されてい

## 1. 水の連続式

$$|u| \frac{\partial B}{\partial x} + |v| \frac{\partial B}{\partial y} + q_b = 0$$

## 2. 運動量保存則(流下方向)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{A} |u| u \frac{\partial B}{\partial x} - \frac{1}{A \Delta y} |u| v \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{1}{A \Delta y} |u| q_b + \frac{1}{A} |P| B \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{A} |D_{xy}| \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{xy}| \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial y} A \frac{\partial u}{\partial y}$$

## 3. 運動量保存則(水深方向)

$$P = \int_0^H \rho g dy$$

## 4. 水温収支則

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{A} |T| u \frac{\partial B}{\partial x} - \frac{1}{A \Delta y} |T| v \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{1}{A \Delta y} |T| q_b + \frac{1}{A} |D_{xy}| \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{xy}| \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial y} A \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{1}{A \Delta y} |D_{xy}| \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial y} A \frac{\partial T}{\partial y}$$

## 5. 濃度収支則

5-1. 700 $\mu\text{m}$ 濃度

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = F(C_p) - \frac{1}{A \Delta y} |C_p| v \frac{\partial B}{\partial y} A \frac{\partial C_p}{\partial y} + G_{Cp} - R_{Cp} \theta_{Cp}^{T_{20}} C_p - G_Z$$

## 5-2. 動物プランクトンに相当する炭素濃度

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F(Z) + \alpha A_Z \cdot G_Z - R_{Z20} \theta_Z^{T_{20}} Z$$

## 5-3. 総リン濃度

$$\frac{\partial Ph}{\partial t} = F(Ph) - \frac{1}{A \Delta y} |Ph| v \frac{\partial B}{\partial y} A \frac{\partial Ph}{\partial y} + \frac{L_{Ph}}{1000 \Delta y}$$

## 5-4. 無機態窒素濃度

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = F(N_i) - \frac{1}{A \Delta y} |N_i| v \frac{\partial B}{\partial y} A \frac{\partial N_i}{\partial y} - B_{Ni} G_{Cp} + R_{N20} \theta_{N_i}^{T_{20}} (N_i - B_{Ni} C_p - Z) + B_{Ni} (1 - \alpha_Z) \cdot G_Z$$

## 5-5. 有機態窒素濃度

$$\frac{\partial N_o}{\partial t} = F(N_o) + B_{Ni} G_{Cp} - R_{N20} \theta_{N_o}^{T_{20}} (N_o - B_{Ni} C_p - Z) - B_{Ni} (1 - \alpha_Z) G_Z$$

## CIC

$$F(C) = -\frac{1}{A} |C| u \frac{\partial B}{\partial x} - \frac{1}{A \Delta y} |C| v \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{1}{A \Delta y} |C| q_b + \frac{1}{A} |D_{xy}| \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{1}{A \Delta y} |D_{xy}| \frac{\partial C}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial y} A \frac{\partial C}{\partial y}$$

$$\{C = C_p, Z, Ph, N_i, N_o\}$$

$$G_{Cp} = \beta_s \mu_{Cp} \theta_{Cp}^{T_{20}} \cdot \frac{I_0}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I_0}{I_s}\right) \cdot \frac{N_i}{K_{N_i} + N_i} \cdot \frac{Ph}{K_{Ph} + Ph} \cdot C_p$$

$$G_Z = C_p \cdot \frac{K_{Cp}}{K_{Cp} + C_p} \cdot C_p \cdot Z$$

$$\beta_s = \exp(-0.0385 C_p)$$

$$I_0 = I_0 \exp\{-\eta (y_s - y)\}$$

$$\eta = 0.2 + 0.001 C_p$$

た平常時のものであるが、まず図-1より、このときの水の貯留水の流れの運動学的特徴について述べると次のようである。宝生貯水池では、ダムでの表層取水(図中のQ<sub>2</sub>)に加え、貯水池中央部に設置された取水口から水道用水の取水(Q<sub>2</sub>)が行なわれているため、その影響によって、上流側では流入水が表層水を連行しながら取水口水深まで拡がる形で表層水を流れるのに対し、下流側ではダム取水口へ向かう流れの速度が減じられ、一部では逆に上流側へ向かう流れがあらわれている。また、水道用取水口の下流側では表面付近を除くと流速は乏わめて小さく、深水層の水はほとんど動かないと考えてよいであろう。

図2~4に示した各水質濃度の分布は、こうした貯留水の流の特徴を反映したものと考えられる。すなわち、流入した栄養塩は、水道用取水口の上流側表層に移流、拡散されるが、それより下流側への輸送は十分ではなく、また貯水池底より湧出する栄養塩も、上流側では表層内に移送されるが、下流側では深水層内にとどまり表層へ運ばれることはほとんどないことが表現されている。このため、取水口より上流側の表層では、豊富な栄養塩の供給を背景に、植物プランクトンの増殖が顕著化し、その結果、クロロフィル濃度の高濃度域が形成されることが、図-2の計算例に表わされている。とくに、高温かつ日射が十分な表面付近では高い濃度となっている。一方、この取水口よりダムにかけての水域では、クロロフィル濃度は比較的値く、先に述べた流れの運動学的特徴を反映するような分布形状を示していることがわかる。これから、この水域では、栄養塩の供給が十分でないために植物プランクトンの増殖は余り顕著化せず、むしろ上流の高濃度域からの移流物質の影響が大きいことが予想される。こうしたクロロフィル濃度の分布、すなわち生物学的生産に関する空間的特徴は、図-3の無機態窒素濃度の分布において、流入した比較的高濃度の窒素が上部表層でほとんど消費され、それより下流側での濃度は乏わめて低いことから理解できるとであろう。

なお、以上に述べた各水質濃度の分布傾向は、実測資料においてもみられるものであり、図-1~4の計算結果は、実際の濃度分布特性をおおむね説明し得るものと考えられる。

4. おわりに 以上の解析により、富栄養化に関係する各種水質要素の空間的分布特性とその変化に寄与する流れの場との関連が、少なくとも定性的には明らかにされた。

<参考文献> ① 岩佐・松尾：土木学会論文報告集308号、1981年4月  
② 津野：国土公電研報告第6号、1979  
③ 松尾・岩佐：第24回水講演文集、1980年2月

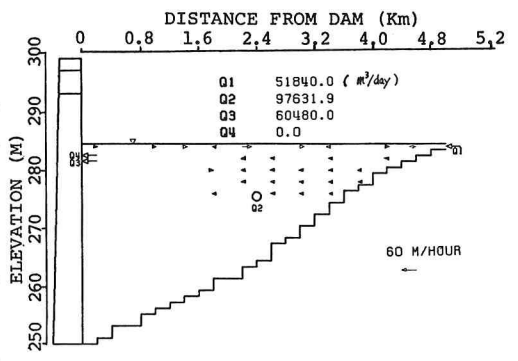


図-1 流速分布(宝生貯水池, 昭和52年8月31日)

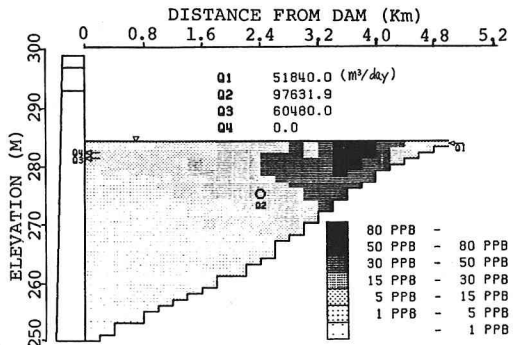


図-2 クロロフィルa濃度の分布(宝生貯水池, 昭和52年8月31日)

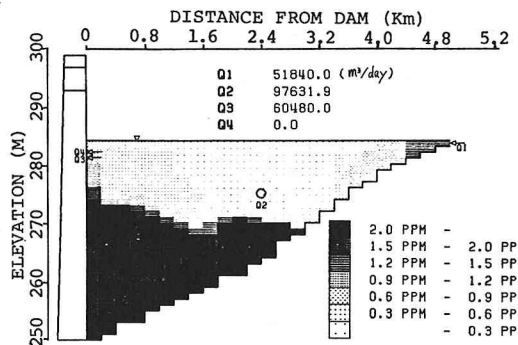


図-3 無機態窒素濃度の分布(宝生貯水池, 昭和52年8月31日)

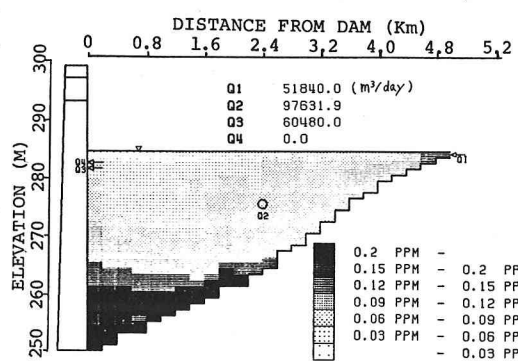


図-4 総リン濃度の分布(宝生貯水池, 昭和52年8月31日)