

ダム貯水池におけるプランクトンの動態—調査と解析 Plankton Dynamics in a Reservoir : Observations and Analyses

(財)電力中央研究所 正 員 ○宮永洋一・白砂孝夫・安芸周一

1. ま え が き

本論文は、ダム貯水池におけるプランクトンおよび水質の動態（約10日間）を対象に、現地観測および数値解析を行った結果について述べたものである。

貯水池や湖沼の水質変化は、物理学のプロセス（移流、拡散など）および生物化学のプロセス（プランクトンの消長、有機物の分解など）を含んでいる。あらゆる水質指標は、両者の複合した影響を受けているといえるが、ダム貯水池の場合、水温、濁度の2項目については、物理学のプロセスのみを考慮した予測モデルでも、ほぼ満足できる結果が得られるようである。

しかし、透明度、栄養塩濃度、溶存酸素などの項目になると、生物化学のプロセスが、物理学のプロセスと同等か、あるいはそれ以上に重要となる場合が多くなってくる。

貯水池における生物化学のプロセスの基本的な構造は、図-1のようにあらわすことができる。すなわち、貯水池生態系の内部では、栄養塩→プランクトン→有機物→栄養塩というサイクルが繰返され、これに周囲の環境との相互作用、たとえば流域からの負荷、下流への流出などが加わっている。生物化学のプロセスの定式化とは、この系内部でのサイクルの速度を見積ることであるといえる。

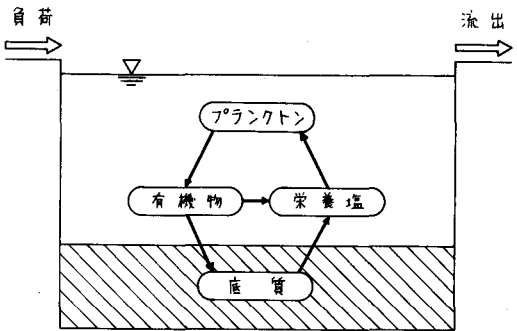


図-1 貯水池生態系の基本構造

Vollenweider (1975)に代表されるBlack-box modelの基本的な考え方は、この複雑な内部サイクルを出来るかぎり単純化し、年間の栄養塩流入負荷量や湖水の交換率など必要最小限の入力条件を用いて湖沼の栄養状態の予測を行おうというものである。¹⁾これに対し、Di Toro et al.(1971)に代表されるDynamic modelは、むしろ系内部でのサイクルの忠実な表現を目的としており、その結果、さまざまな関数関係や係数が導入されている。²⁾

著者らは、ダム貯水池の将来の水質を予測し、かつその保全対策の検討に供し得るようなモデルの確立を目指しており、すでにBlack-box modelによる全国のダム貯水池の栄養状態の検討を行っている。³⁾また、昭和50年度以降、3地点のモデル貯水池を対象に、毎月1回、池内数地点程度の規模の総合的な水質調査を継続して行っており、これらの資料をもとに、Dynamic modelに関する検討もすすめている。⁴⁾

実用的な立場からいえば、モデルに含まれる係数の数は少なく、また客観的に決めやすい方がよい。現在までに発表されているDynamic modelにほぼ共通しているものとしては、植物プランクトンに関する最大増殖率、最適日射量、栄養塩半飽和定数、呼吸率、組成比、動物プランクトンに関する戸水速度、最大同化率、植物量半飽和定数、呼吸率、組成比などが挙げられる。これらの数値については比較的統一されたものもあるが、たとえばプランクトン増殖項に含まれるMonod式の半飽和定数などはさまざまな報告例があり、^{5) 6)}式の妥当性を疑問視する議論もある。

本研究では、実貯水池における調査結果をもとに、従来のDynamic modelで用いられてきた半飽和定数を逆算し、他の報告例と比較するとともに、このようにして求めた係数値を用いて動植物プランクトンの数値シミュレーションを行い、モデルの現象再現能力を検討した。

2 Dynamic model の概要

Di Toro et al. の Dynamic model は、すでにいくつかの環境問題関係の雑誌、テキストなどに紹介されており、⁷⁾⁸⁾ ここでは動植物プランクトンの計算方法に着目してその概要を述べる。植物プランクトン濃度を Y 、動物プランクトン濃度を Z とすると、

$$\frac{dY}{dt} = (G_Y - R_Y - D_Y) Y + (\text{移流, 拡散項}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dZ}{dt} = (G_Z - R_Z - D_Z) Z + (\text{移流, 拡散項}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 t : 時間、 G : 増殖率、 R : 呼吸率、 D : 死滅率であり、添字 Y は植物プランクトン、 Z は動物プランクトンにそれぞれ対応する。

G_Y は次式で計算する。

$$G_Y = G_{Y_{\max}} \cdot f_I \cdot f_N \cdot f_P \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$f_I = \frac{eS}{\eta H} \left[\exp \left\{ -\frac{I_0}{I_s} \exp(-\eta H) \right\} - \exp \left(-\frac{I_0}{I_s} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f_N = N / (K_N + N) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f_P = P / (K_P + P) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $G_{Y_{\max}}$: 最大増殖率、 f_I 、 f_N 、 f_P : 日射量、窒素、リンに関する増殖係数、 S : 日照率、 η : 水中光の減衰係数、 H : 水深、 I_0 : 水面日射量、 I_s : 最適日射量、 N : 無機窒素濃度、 P : 無機リン濃度、 K : 半飽和定数、である。

D_Y と G_Z は次式で計算する。

$$D_Y = C_s Z \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$G_Z = \alpha_{ZY} \cdot a \cdot K_Y f_Y \cdot C_s \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$f_Y = Y / (K_Y + Y) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 C_s : 動物プランクトン河水速度、 α_{ZY} : 植物量から動物量への換算係数、 a : 最大同化率、である。

以上の係数値について、Di Toro et al. による San Joaquin Delta, Lake Erie のシミュレーション²⁾⁹⁾ および池田らによる琵琶湖のシミュレーション¹⁰⁾ に用いられた例を表-1 に示す。Di Toro et al. は Y をクロロフィル a 量、 Z を炭素量で、また池田らは Y 、 Z を窒素量であらわしているが、比較が便利のように Di Toro et al. の単位系に統一してある。その際の換算係数は、植物プランクトンの窒素/クロロフィル a 比 10、動物プランクトンの炭素/窒素比 5 とした。また Di Toro et al. は $\alpha_{ZY} = 50 \text{ mgC/mg Chl}$ を与えている。なお、表-1 の T は水温 ($^{\circ}\text{C}$) である。

表-1 Dynamic model の係数値

著 者	Di Toro	Di Toro	池 田	著 者	Di Toro	Di Toro	池 田
地 点	San Joaquin	Lake Erie	琵琶湖	地 点	San Joaquin	Lake Erie	琵琶湖
文 献	(2)	(9)	(10)	文 献	(2)	(9)	(10)
$G_{Y_{\max}} (\text{day}^{-1})$	0.1T	0.1+0.06T	0.1T	$C_s (1/\text{mgC}/\text{day})$	0.13	$0.012 + 0.021T$	0.13*
$I_s (1y/\text{day})$	300	350	300	$a (\text{mgC}/\text{mgC})$	0.6	0.65	0.7
$K_N (\mu\text{gN}/1)$	25	25	50	$K_Y (\mu\text{gChl}/1)$	60	60	51**
$K_P (\mu\text{gP}/1)$	-	10	10	$R_Z (\text{day}^{-1})$	0	$0.007(T-5)^2$	0.005T
$R_Y (\text{day}^{-1})$	0.005T	0.004T	0.005T	$D_Z (\text{day}^{-1})$	0.075	0.015	0

* $0.65 \text{ l/mgN} \cdot \text{day}$ より換算 ** 0.51 mgN/l より換算

3. 対象貯水池と観測資料

調査対象貯水池の平面形状、観測点位置および諸元を図-2、表-2にそれぞれ示す。発電所は混合揚水式であり、下部池は池水の交換率が高く、池内がほぼ一様に混合するのに対し、上部池では夏期に水温成層の発達が見られる。ただし、取放水口が底層に位置しているため、いわゆる2次躍層は形成されにくく、底層水温が年間を通じて顕著に変動する。

電力中央研究所では、昭和53年度以降、本貯水池を対象に月1回の定期水質調査を行っているが、昭和54年度はさらに5月、10月の2回、各観測点において約10日間(1日おき)の水質、生物連続調査を行った。採水は、水質項目(pH、DO、濁度、栄養塩、CODなど)については水面のみ、生物項目(クロロフィルa、植物プランクトン細胞数)については水面と水深5mの2点で行った(動物プランクトンは水深0~5mをネット鉛直引き)。なお、各項目の分析方法については文献3)を参照されたい。

上部池内の5月、10月の調査結果の一部を図-3、4にそれぞれ示す。いずれも各観測点における測定値を代表体積で加重平均してプロットしたものである。

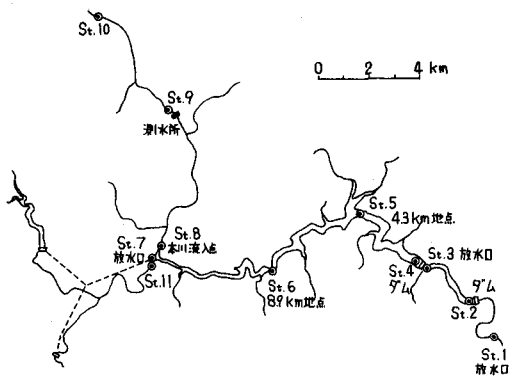


図-2 貯水池平面形状と観測点位置

表-2 貯水池諸元

項 目	上 部 池	下 部 池
ダ ム 高 (m)	103.0	41.0
総 容 量 (×10 ⁶ m ³)	127.5	7.6
有 効 容 量 (")	80.5	5.7
湛 水 面 積 (km ²)	3.6	0.4
貯 水 池 長 (km)	15.6	3.1
平均池水交換率 (year ⁻¹)	6.8	114
最大使用水量 (m ³ /sec)	424.0	60.0
流 域 面 積 (km ²)	625.2	631.4

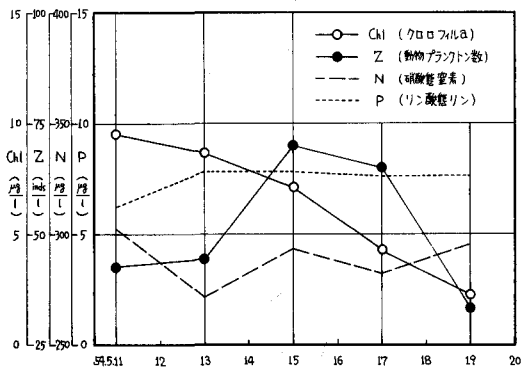


図-3 調査結果(5月)

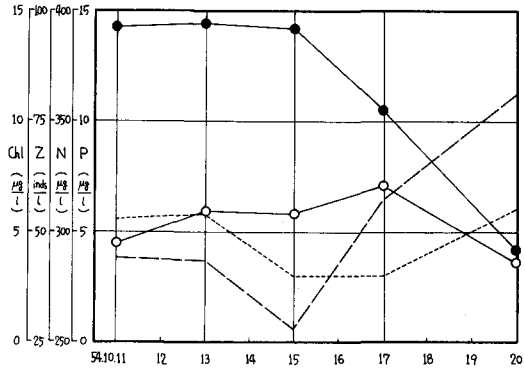


図-4 調査結果(10月)

4. 解 析

4.1 データの整合性

坂本(1966)は、昭和33～35年の関東、中部地方の主要な湖沼における水質データの解析結果より、平衡状態にあるクロロフィルと栄養塩濃度の間にべき乗関係が成立することを示している¹¹⁾さらにCarlson(1977)は、アメリカの湖沼のデータを用いて、透明度、クロロフィル、全リンの間にべき乗関係を見出している¹²⁾表-3は、本解析で使用したデータとこれらのべき乗則による推定値との関係を比較したものである。これによれば、本水域での制限栄養塩はリンであり、10月の透明度の実測値と、クロロフィルaによる推定値との差がやや大きい点を除けば、各水質データ間の整合性はほぼ妥当なものといえる。

表-3 水質データとべき乗則による推定値

項目 月	実 測 値					推 定 値		
	T-N	T-P	N/P	SD*	Chl	Chl(T-P)**	SD(T-P)**	SD(Chl)***
5	765	24	32	3.4	7.4	10	2.0	2.0
10	671	13	52	4.8	5.4	4	3.7	2.4

*透明度 **T-Pによる推定値 ***Chlによる推定値

4.2 半飽和定数値の計算

Dynamic modelの基礎式と水質観測資料を用いて、モデルに含まれる半飽和定数値を逆算してみる。水面から5mの層をコントロール・ボリュームとして、

$$\frac{dY}{dt} = (G_Y - R_Y - D_Y)Y + \frac{1}{V} (Q_u Y_u - Q_d Y - Q_r Y - \frac{dV}{dt} Y - W_o A Y) \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{dZ}{dt} = (G_Z - R_Z - D_Z)Z + \frac{1}{V} (Q_u Z_u - Q_d Z - Q_r Z - \frac{dV}{dt} Z) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、V：コントロール・ボリューム体積、A：同底面積、W_o：植物プランクトン沈降速度、Q_u：コントロール・ボリューム底面からの流入量、Q_d：同流出量、Q_r：河川流入水による連行にともなう流出量(=r・Q、Q：河川流入量)、Y_u、Z_u：Q_uとともに流入する植物プランクトン濃度および動物プランクトン濃度、である。流量の収支は図-5のようになり、

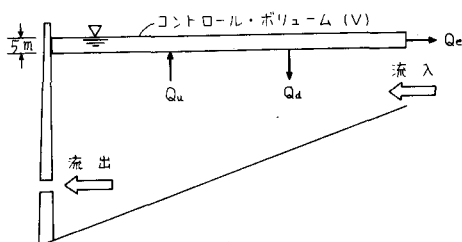


図-5 流量の収支

i) $\frac{dV}{dt} > -Q_r$ のとき、

$$Q_u = 0, Q_d = dV/dt + Q_r \dots\dots\dots (12)$$

ii) $\frac{dV}{dt} < -Q_r$ のとき、

$$Q_u = 0, Q_d = -(dV/dt + Q_r) \dots\dots\dots (13)$$

となる。

またY_uについては、補償深度を透明度の2倍とし、植物プランクトン濃度の鉛直分布が図-6のように混合層下端から補償深度にかけて直線的に減少するものと仮定して計算する。混合層厚は、5月、10月ともに5mとした。Z_uについては、動物プランクトンが移動可能であることを考慮し、Z_u=Zとする。

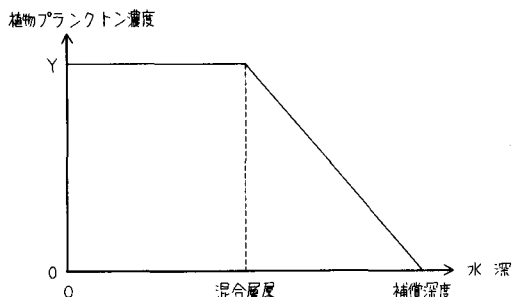


図-6 植物プランクトン鉛直分布の仮定

(10)～(13)式より,

$$G_Y = \frac{1}{Y} \frac{dY}{dt} + R_Y + D_Y + S_Y + \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dt} + Q_e \right) \left(1 - \frac{Y_c}{Y} \right) \dots\dots\dots (14)$$

$$G_Z = \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dt} + R_Z + D_Z \dots\dots\dots (15)$$

ただし, $S_Y = W_o A / V$, また, Y_c は $dV/dt > -Q_e$ のとき Y_o , $dV/dt < -Q_e$ のとき Y をとる。

(3), (8), (14), (15)式より栄養塩による増殖係数 $f_N \cdot f_P$ および半飽和定数 K_Y を計算することができる, 計算に必要な係数は, 表-1 の値にもとづいて以下のように与えた。すなわち, $G_{Y_{max}} = 0.1 \text{ T day}^{-1}$, $I_s = 300 \text{ ly/day}$, $R_Y = 0.005 \text{ T day}^{-1}$, $\alpha_{ZY} \cdot C_s = 0.5 + T \text{ l/mgChl/day}$, $a = 0.6$, $R_Z = 0.005 \text{ T day}^{-1}$, $D_Z = 0.02 \text{ day}^{-1}$, $S_Y = 0.02 \text{ day}^{-1}$, $r_e = 0.2$ としている。また, 動物プランクトン個体数と炭素量の関係は, $1 \text{ inds/l} = 3 \text{ } \mu\text{gC/l}$ とおいた。¹³⁾

計算結果を表-4 に示す。横線を記入した箇所は, 値が負になって計算不能であることを意味する。また K_P の値は, リンを制限栄養塩と考え, $f_N = 1$ として求めたものである。これによれば, K_Y はほとんど計算不能となり, また K_P も, 植物プランクトン濃度の減少率が比較的大きい5月15日以降および10月17日以降は計算不能か, あるいは異常に大きな値となっている。実測値にもある程度の誤差が含まれているとはいえ, K_Y の計算がほとんど不可能ということは, 表-1 に示されている程度の係数値を用いた場合, 動物プランクトン濃度の実測値をDynamic model によって説明することが困難であるということを示している。 K_P については, 5月11日～15日の平均が $40.1 \text{ } \mu\text{gP/l}$, 10月11日～17日の平均が $8.1 \text{ } \mu\text{gP/l}$, となり, 他に報告されている2～50の範囲内に入るが, 相対的にリン濃度の高い5月の値が高く, 逆にリン濃度の低い10月の値は低くなり, 一定の傾向を示している。半飽和定数の値は, 植物プランクトンの種類によっても異なるといわれているが, 5月と10月の優先種をみると, 総細胞数中に占める割合は, 5月が珪藻82%, 緑藻8%に対し, 10月は珪藻27%, 緑藻62%となっており, この優先種の違いが, 半飽和定数値の差の一因ではないかと思われる。

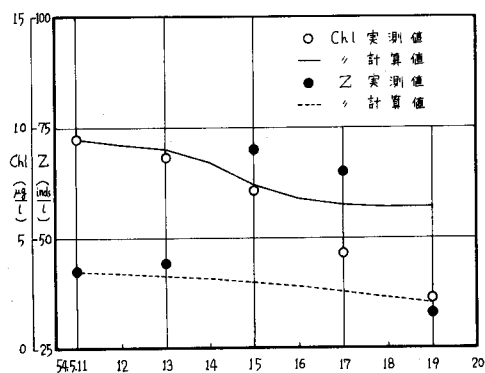
表-4 半飽和定数の計算値

5月(日)	$f_N \cdot f_P$	$K_Y (\mu\text{gP/l})$	$K_Y (\mu\text{gChl/l})$	10月(日)	$f_N \cdot f_P$	$K_Y (\mu\text{gP/l})$	$K_Y (\mu\text{gChl/l})$
11～13	0.140	43.0	—	11～13	0.433	7.5	—
13～15	0.173	37.2	—	13～15	0.271	11.8	—
15～17	—	—	—	15～17	0.378	4.9	2.0
17～19	—	—	—	17～20	0.024	183.0	—

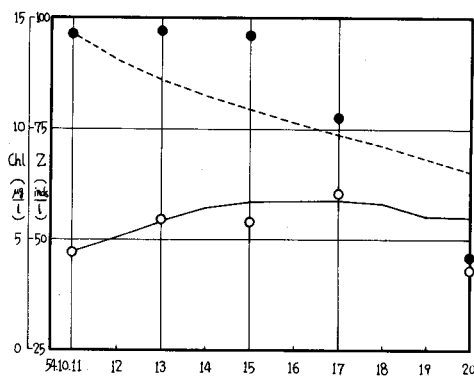
4.3 Dynamic model によるシミュレーション

Dynamic model の現象再現能力を検討するため, 前節で求めた係数値を用いて, (10), (11)式による動植物プランクトンの数値シミュレーションを行った。係数値は表-4 より, $K_P = 40.1 \text{ } \mu\text{gP/l}$ (5月), $8.1 \text{ } \mu\text{gP/l}$ (10月)とし, 逆算不可能であった K_Y については, 表-1 にしたがって $60 \text{ } \mu\text{gChl/l}$ を与えた。差分計算には4次の Runge - Kutta - Gill 法を用い, $\Delta t = 1 \text{ day}$ とした。

計算結果を図-7, 8 に示す。これによれば, 予想されたように動物プランクトンのシミュレーション精度は悪く, 計算値は実測値に比べてやや小さい。原因は(11)式の増殖項が呼吸, 死滅項に比べて常に小さくなるため, 表-1 に示された係数値がそのままでは適用できないことを示している。一方, 植物プランクトンのシミュレーション結果はほぼ良好であった。



図一七 計算結果(5月)



図一八 計算結果(10月)

このように、Dynamic modelによる動物プランクトンのシミュレーションが比較的むずかしいことについては、Di Toro et al. も指摘しており⁹⁾、実測値の信頼性の問題(動物プランクトンが移動可能であること)、モデルの問題(魚による捕食、Detritus 摂取による増殖などの考慮が不十分なこと)などを考えると、単に係数を調整して計算値を実測値に一致させることは、あまり意味のないことのように思われる。

5. 結 語

ダム貯水池における約10日間の水質およびプランクトンの動態調査結果によれば、制限栄養塩はリンであり(N/P比30~50)、動植物プランクトンの相互作用(Predator-prey interaction)によると思われる変化がみとめられた。この変化をDi Toro et al. のDynamic model によって説明する場合の半飽和定数を求めたところ、植物プランクトンの増殖に関するリンの半飽和定数 K_p は、他の報告値の範囲内であったが季節差がみとめられた。動物プランクトンに関する半飽和定数 K_v は計算不可能となった。

なお、数値計算については千葉工業大学4年、井出明君の協力を得た。ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Vollenweider, R.A.: Schweiz. Z. Hydrol., Vol. 37, No 1, p.p. 53-84, 1975.
- 2) Di Toro, D.M. et al.: Advan. Chem. Series, No 106, p.p. 131-180, 1971.
- 3) 安芸ほか: 電力土木, No 159, p.p. 3-19, 1979.
- 4) 宮永: 第24回水講論文集, p.p. 237-243, 1980.
- 5) Brian, W. Mar: Proc. ASCE, Vol. 102, No EE 5, p.p. 1114-1117, 1976.
- 6) 日野: 土木学会論文集, No 286, p.p. 65-75, 1979.
- 7) 溝呂木: 公害と対策, Vol. 15, No 10, p.p. 67-73, 1979.
- 8) 村上: 第15回水工夏期研修講義集, A-7, 1979.
- 9) Di Toro, D.M. et al.: Sys. Anal. Sim. Ecol., Vol. 3, Acad. Press, p.p. 423-474, 1975.
- 10) Ikeda, S. & Adachi, N.: Ecol. Modelling, Vol. 4, p.p. 151-172, 1978.
- 11) Sakamoto, M.: Arch. Hydrobiol., Vol. 62, p.p. 1-28, 1966.
- 12) Carlson, R. E.: Limnol. Oceanogr., Vol. 22, No 2, p.p. 361-369, 1977.
- 13) Jørgensen, S. E.: Environ. Sci. Appl., Vol. 6, Pergamon Press, 1979.