

流動制御によるダム湖水質保全対策におけるシミュレーション手法の検討

INVESTIGATION of METHOD to SIMULATE CURRENT CONTROL for RESTORING of RESERVOIR WATER QUALITY

丹羽 薫*, 久納 誠**, 古里 栄一***
Kaoru NIWA *, Makoto KUNOH **, Eiichi FURUSATO ***

ABSTRACT ; We suggested current control using dispersed aeration as one of the techniques for preserving water quality in reservoirs, which is able to restrict algal bloom by controlling the current artificially. We carried out field experiments on current control using dispersed aeration in some dam reservoirs and discussed the current control mechanism.

In this report, we suggest how to simulate water temperature, dissolved oxygen, total phosphorus, and chlorophyll-a and so on by using the current movement model previously obtained, and conducted field tests to verify this model. The model is derived from improvement of the One-dimension ecological model, which is widely used to simulate water quality in dam reservoirs.

The simulated and measured water temperature and other water qualities were good agreement, so the improved model proposed in this paper can be applied to evaluate effect of current control.

KEYWORDS ; water quality, current control, reservoir, aeration, simulation

1. はじめに

散気方式の曝気装置による流動制御は、ダム湖の水質環境を保全する一手法としてダム湖の流動を人為的に制御して藍藻類の異常増殖を抑制する方法である。著者らは、流動制御の現地実験をダム湖で行うと共に、流動制御のメカニズムについて公表してきた^{1, 2)}。本報では、それらを元にさらに流動モデルを発展させ、これを用いて水温、DO、TP、Chl-a等のシミュレーションを行う方法を提案し、その結果をダム湖の現地実験で得られた実測値により検証するものである。

シミュレーションは、ダム湖の水理水質解析に用いられることの多い鉛直一次元生態系モデルを改良して行った。その結果、水温および水質挙動については十分な精度で検証でき、本報で提案するモデルで流動制御の効果を表現できることが分かった。

2. 流動制御システムの概要

流動制御システムは、ダム湖に温水で水温分布が均一である循環混合層を、表層から水深概ね15~20mまで厚く形成させ、中小洪水時にもこの層を温存させることにより、表層に生息する藍藻類や鞭毛藻類への栄養塩類と光とを抑制し、それによって藍藻類等の異常増殖を抑制するシステムであり、図-1にこの模式図を示す。このシステムの基幹設備である循環流制御設備（散気方式の曝気装置）により期待される効果を表-1に示す。現地実験期間中は効果3の前提条件である中小洪水が発生しなかったために、平常時で検証可能な効果1と2について述べる。

-
- * 正会員 建設省土木研究所環境部環境計画研究室 室長
Public Works Research Institute, Ministry of Construction
- ** 正会員 水資源開発公団栗原川ダム調査所調査設計課長（前土木研究所環境計画研究室主任研究員）
Water Resources Development Public Corporation
- *** 正会員 （株）環境調査技術研究所技術部（前土木研究所環境計画研究室部外研究員）
Environmental Investigation Technology Institute Co., Ltd.

3. 現地実験の概要³⁾

3.1. 実験条件

現地実験は、大分県山国川水系山移川の多目的ダムである耶馬溪ダム（提高62m、総貯水容量2,330万 m^3 、湛水面積1.1Km²、流域面積89Km²）において1993年と1994年の夏期に実施し、本報では1994年7月5日から10月14日にかけての実験結果について述べる。なお、耶馬溪ダムでは、1985年に竣工以来藍藻類や鞭毛藻類が毎年のように多量に発生している。

循環流制御設備の現地実験条件として、設備の設置位置を図-2に、設備の吐出空気量を表-2に示す。なお、吐出空気量は大気圧条件下のものである。図-2に示すように、ダム堤体から水平距離約500m上流の湖底に実験用の循環流制御設備を設置した。実験における空気量は最大5,500 ℓ /min.であり、EL.141.2mに設置した噴出口は直径32mmの単一孔である。実験期間中の空気量は、表-2に示すように変化した。

3.2. 実験結果

水温鉛直分布の経時変化をシミュレーション結果と合わせて図-14に、流入河川の水温とダム湖貫入層を図-3、4に、表層藻類細胞数およびChl-aの経時変化を図-5に示す。図-14を見ると、流動制御設備が稼働して約3週間後の7月26日には曝気装置上部に強固な水温躍層を伴う循環混合層が形成され、9月後半までこの水温分布が維持されたことが分かる。図-3に流入河川水温の連続

表-1 循環流制御設備の効果

効果	湖水に与える流動作用	藻類増殖抑制に及ぼす効果
1	表層付近の水温が均一であり厚さ15~20mの循環混合層を形成し、密度流で循環	循環混合層による光制限及び表層における藍藻類の浮上阻止
2	栄養塩類（P ₀ -P等）を含んだ平常時の流入水を循環混合層の下層に導く	緑藻類や珪藻類がP ₀ -Pを吸収した後、沈降して底泥に固定
3	栄養塩類（P ₀ -P等）を含んだ中小洪水を水温躍層に導き、速やかにダム湖から放流	表層にいる藍藻類への栄養塩類の供給を制限

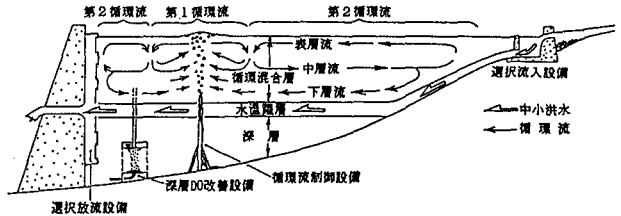


図-1 流動制御システムの模式図

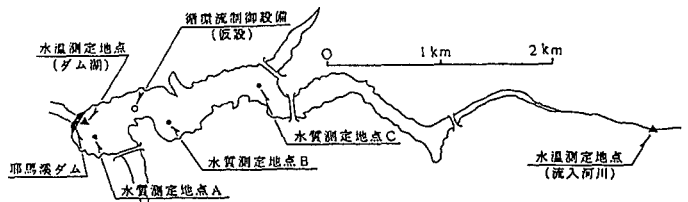


図-2 耶馬溪ダム現地実験位置

表-2 吐出空気量

期 間	空 気 量
7/5~7/19	5,000 ℓ /min
7/19~8/9	2,500 ℓ /min
8/9~8/17	1,500 ℓ /min
8/17~8/24	0 ℓ /min
8/24~10/14	2,500 ℓ /min

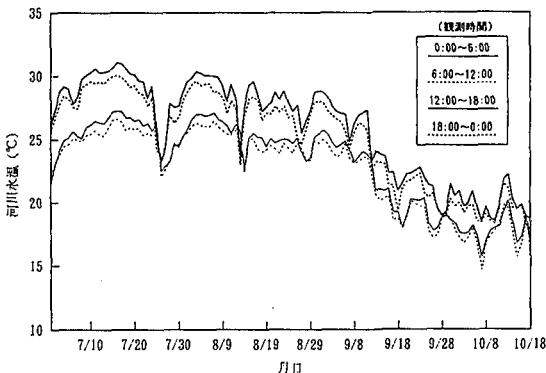


図-3 時間帯別流入河川水温の経時変化

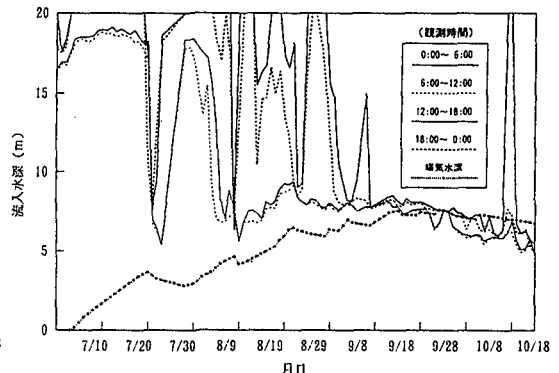


図-4 ダム湖への流入河川水貫入水深

観測結果を、図-4にこれに基づいた流入河川水温とダム湖内水温分布が等しい層を示す。流入河川水温が時刻変動することにより水温から想定されるダム湖への貫入層も数mの規模で時刻変動していることがわかる。なお、曝気敷高は標高141.2mに固定したが、貯水位変化により曝気水深は徐々に変化している。図-5の表層部の藻類細胞数経時変化をみると、曝気開始後8月前半に緑藻類が一時期増殖したのを除くと概ね珪藻類が優占しており、8月から9月にかけて主に *Melosira distans* を中心として珪藻類が徐々に増加しているが、優占種が珪藻類であったために、水質的な問題は発生しなかった。

4. シミュレーションによる検証

4.1. モデルの概要

本報で提案するシミュレーションモデルは、ダム湖の水理・水質解析に用いられることの多い、Huber-Ryan-Harleman によるいわゆる M.I.T. モデルと言われる鉛直一次元モデルと、生態系モデル⁴⁾とをメインモデルとし、これに流動制御設備で生じる流動現象と生態系モデル中の Chl-a を藻類網別の指標として分割した2つのサブモデルから成るものである。この概念図を図-6に示す。

表-3 鉛直一次元モデル基本式一覧

$$\frac{\partial(vA)}{\partial t} = (u_i - u_o) \cdot B \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{B}{A} (u_i T_i - u_o T) - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A \cdot T) + \frac{(\alpha + D)}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(A \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho \cdot C_w \cdot A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\phi A) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{B}{A} (u_i C_i - u_o C) - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A \cdot C) + \frac{(\alpha + D)}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(A \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (w_c \cdot A \cdot C) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = F(X) + V_o(X) + S(X) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$F(X) = \frac{B}{A} (u_i X_i - u_o X) - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A \cdot X) + \frac{(\alpha + D)}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(A \cdot \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$V_o(X) = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (w_x \cdot A \cdot X) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 v : 鉛直方向流速、 u_i : 流入水の水平方向流速、 u_o : 流出水の水平方向流速、 y : 標高、 A : 貯水池面積、 B : 貯水池平均幅、 T : 水温、 T_i : 流入水温、 ρ : 水の密度、 C_w : 水の比熱、 ϕ : 輻射熱、 C : 濁度、 C_i : 流入濁度、 w_c : 濁質の沈降速度、 X : 水質濃度、 X_i : 流入水質濃度、 w_x : 水質の沈降速度、 α : 分子拡散係数、 D : 渦動拡散係数、 t : 時間、 $F(X)$: 移流・拡散項、 $V_o(X)$: 沈降項、 $S(X)$: 生化学的生産・消費項である。

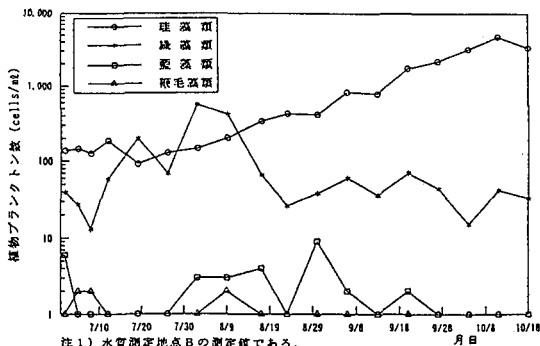


図-5 表層藻類細胞数の経時変化

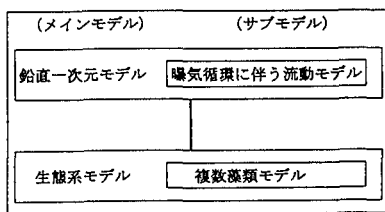
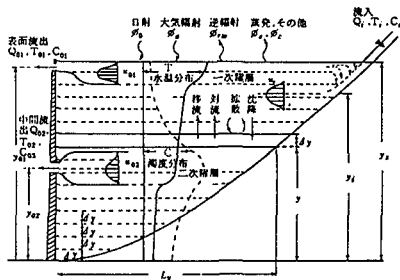


図-6 本報で提案するモデル概念図



- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| T_y : 標高 y の水温 | T'_i : 標高 y の流入水温 |
| C_y : 標高 y の濃度 | C'_i : 標高 y の流入濃度 |
| u_{iy} : 標高 y の流入水の水平方向流速 | A_y : 標高 y の貯水池平面積 |
| u_{oy} : 標高 y の流出水の水平方向流速 | B_y : 標高 y の貯水池平均幅 |
| v_y : 標高 y の鉛直方向流速 | ϕ_y : 標高 y に達する輻射熱 |
| w_c : 懸濁粒子の沈降速度 | α : 分子拡散係数 |
| Q_{wy} : 標高 y の鉛直方向の流量 | D : 渦動拡散係数 |
| q_{iy} : 標高 y の水平方向の流入量 | ρ : 水の密度 |
| q_{oy} : 標高 y の水平方向の流出量 | c : 水の比熱 |
| L_y : 標高 y における貯水池長 | t : 時間 |

図-7 鉛直一次元モデル概念

(1) メインモデル

1) 鉛直一次元モデル

鉛直一次元モデルの概念を図-7に示す。このモデルは、ダム湖の水温、水質分布は水平方向に一樣と考え水深方向に1~2 m程度の厚さでコントロールボリューム分割し、計算時間間隔毎に各層の移流、拡散量を計算し、その結果を用いて水温、濁度、各水質の計算を行うものであり、表-3に示すように連続式および熱量・質量保存式から成る。なお、移流・拡散量の計算においては、運動量保存則は適用せず流れの分布は Craya 等の選択取水公式等を用いて与える。水質の生化学的生産・消費項については、2) で生態系モデルとして述べる。

2) 生態系モデル

生態系モデルの概念図を図-8に、基本式を表-4¹⁾に、またパラメーターを表-5に示す。湖沼やダム湖の水質変化を植物プランクトンと動物プランクトンの挙動を中心に表現しており、これらの消長と窒素およびリン、DO、COD等の水質変化を関連づけて表現している。植物プランクトンの増殖は、水温、光、無機態栄養塩の関数としている。

(2) サブモデル

1) 曝気循環に伴う流動モデル

曝気による流動の基礎式を現地観測及び鉛直一次元モデルを用いて定式化した。

① 曝気によって生じるダム湖の流動現象の概要

釜房ダムで行った現地実験の観測結果を図-10に示す。これを模式的に示すと図-11の様に表せる。曝気による流動は、曝気装置より半径30m程度の範囲内に生じる流速の大きな局所流（図-1の「第1循環流」）と、この外側に生じる、ダム湖全域の流速の小さな密度流（図-1の「第2循環流」）とから成る。さらに、第2循環流は曝気装置直上の上昇流直接に引き寄せられる下層流（同Q_d）および、これらが混合し等密度層に密度流として貫入してゆく遠心的な流動である中層流（同Q_m）とからなる。

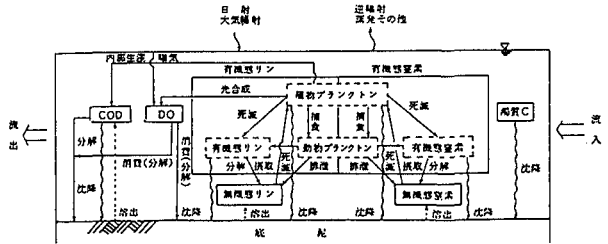


図-8 生態系モデルによるダム湖水質変化概念図

表-4 生態系モデル基本式

$S(P) = (G_p - D_p - G_s) \cdot PP$ (7)	
$G_p = \beta S \cdot K \cdot T_s \cdot \exp\left(-\frac{T_s}{T_0}\right) \cdot \exp\left(1 - \frac{I_s}{I_0}\right) \cdot \frac{IN}{K_{IN} + IN} \cdot \frac{IP}{K_{IP} + IP}$ (8)	
$D_p = R_p \cdot \theta_p \cdot T^{-10}$ (9)	
$G_s = R_s \cdot \frac{K_{pp}}{K_{pp} + PP} \cdot ZP$ (10)	
$S(ZP) = \alpha \cdot a_s \cdot B_s \cdot PP - R_s \cdot \theta_s \cdot T^{-10} \cdot ZP$ (11)	
$S(DO) = \underbrace{K_1(DO - DO_0)}_{\text{再曝気 (換気のみ)}} + \underbrace{K_2 \cdot \theta_2 \cdot T^{-10} \cdot PP}_{\text{光合成による DO 生産}} - \underbrace{K_3 \cdot COD}_{\text{COD 物質による DO 消費}} - \underbrace{r_4 \cdot \frac{A_s}{V}}_{\text{底泥による DO 消費}}$ (12)	
$S(COD) = \underbrace{K_4 \cdot G_p \cdot PP}_{\text{内部生産}} - \underbrace{R_c \cdot \theta_c \cdot T^{-10} \cdot COD}_{\text{分解}} + \underbrace{R_{vc} \cdot \theta_{vc} \cdot T^{-10} \cdot \frac{A_s}{V}}_{\text{底泥からの溶出}}$ (13)	
$S(IP) = \left\{ \underbrace{(-\beta_p \cdot G_p + \beta_p(1 - a_s) \cdot G_s)}_{\text{植物プランクトンの摂取}} \cdot PP + \underbrace{R_p \cdot \theta_p \cdot T^{-10} \cdot (OP - \beta_p \cdot PP - r_p \cdot ZP)}_{\text{動物プランクトンの排泄}} \right\} + \underbrace{R_{vp} \cdot \theta_{vp} \cdot T^{-10} \cdot \frac{A_s}{V}}_{\text{有機態から無機態への分解}}$ (14)	
$S(OP) = \left\{ \underbrace{(\beta_p \cdot G_p - \beta_p(1 - a_s) \cdot G_s)}_{\text{植物プランクトンの摂取}} \cdot PP - \underbrace{R_p \cdot \theta_p \cdot T^{-10} \cdot (OP - \beta_p \cdot PP - r_p \cdot ZP)}_{\text{動物プランクトンの排泄}} \right\} + \underbrace{R_{vp} \cdot \theta_{vp} \cdot T^{-10} \cdot \frac{A_s}{V}}_{\text{有機態から無機態への分解}}$ (15)	
$S(IN) = \left\{ \underbrace{(-\beta_m \cdot G_p + \beta_m(1 - a_s) \cdot G_s)}_{\text{植物プランクトンの摂取}} \cdot PP + \underbrace{R_m \cdot \theta_m \cdot T^{-10} \cdot (ON - \beta_m \cdot PP - \gamma_m \cdot ZP)}_{\text{動物プランクトンの排泄}} \right\} + \underbrace{R_{vm} \cdot \theta_{vm} \cdot T^{-10} \cdot \frac{A_s}{V}}_{\text{有機態から無機態への分解}}$ (16)	
$S(QN) = \left\{ \underbrace{(\beta_m \cdot G_p - \beta_m(1 - a_s) \cdot G_s)}_{\text{植物プランクトンの摂取}} \cdot PP - \underbrace{R_m \cdot \theta_m \cdot T^{-10} \cdot (ON - \beta_m \cdot PP - \gamma_m \cdot ZP)}_{\text{動物プランクトンの排泄}} \right\} + \underbrace{R_{vm} \cdot \theta_{vm} \cdot T^{-10} \cdot \frac{A_s}{V}}_{\text{有機態から無機態への分解}}$ (17)	

ここに

PP : クロロフィルa濃度	IP : 無機態リン濃度
ZP : 炭素濃度	IN : 無機態窒素濃度
DO : 飽和溶解酸素濃度	OP : 有機態リン濃度
DO : 溶解酸素濃度	ON : 有機態窒素濃度
COD : COD濃度	ON : 底泥面積
I _s : 水深 y における日射量 I ₀ = I ₀ exp[-η(y _s - y)]	A _s : 貯留量
I ₀ : 水面の日射量	V : 日射量減衰定数
y _s : 水面深さ	η : η = 0.5 + 0.001 · PP

表-5 生態系モデルパラメーター

区分	記号	パラメーター	単位
流動条件	γ	運行係数	-
	F_r	内部フルード数	-
	α	分子拡散係数	m^2/s
	DK	渦動拡散係数	m^2/s
日射による 輻射	α_F	水面反射率	-
	q_1	減衰係数	-
	η_1	$(\eta = \eta_1 + PP \cdot \eta_2)$	-
	β	水面吸収率	-
DO生産	K_1	水面における好曝気係数	1/day
	θK_1	K_1 に対する水温係数	-
	$K_2(K_2)$	20℃における光合成によるDO生産速度	1/day
	θDO	K_2 に対する水温係数	-
DO消費	$K_3(K_3)$	COO物質によるDO消費速度	1/day
	γ	底泥によるDO消費速度	$g/m^2/day$
	$\theta \gamma$	γ に対する水温係数	-
	$R_C(R_C)$	20℃におけるCOO分解速度	1/day
分解	θC	R_C に対する水温係数	-
	$R_P(RP)$	20℃における有機物1から無機物1への分解速度	1/day
	$\theta P(RP)$	R_P に対する水温係数	-
	$R_N(RN)$	20℃における有機物窒素から無機態窒素への分解速度	1/day
溶出	$\theta N(RN)$	R_N に対する水温係数	-
	R_{WC}	COOの底泥からの溶出速度	$g/m^2/day$
	θR_{WC}	R_{WC} に対する水温係数	-
	R_{WP}	底泥中の有機物量	$P-mg/g$
交換率	I_D	溶存酸素の存在による1%の溶出量減少を表す補正係数	-
	θR_{WP}	無機態1%の底泥からの溶出率に対する水温係数	-
	R_{WN}	無機態窒素の底泥からの溶出速度	$g/m^2/day$
	θR_{WN}	R_{WN} に対する水温係数	-
交換率	$\alpha(a\alpha)$	植物アジリ中の炭素量と $Chl a$ 量との比	$mg-C/\mu g-Chl a$
	$KP(KP)$	植物アジリ中のCOO物質量と $Chl a$ 量との比	$mg-COO/\mu g-Chl a$
	$\beta P(\beta P)$	植物アジリ中の窒素量と $Chl a$ 量との比	$mg-N/\mu g-Chl a$
	$\beta N(\beta N)$	植物アジリ中の炭素量と $Chl a$ 量との比	$mg-C/\mu g-Chl a$
交換率	$\gamma P(\gamma P)$	植物アジリ中の窒素と炭素量の比	$mg-N/mg-C$
	$\gamma N(\gamma N)$	植物アジリ中の炭素量と炭素量の比	$mg-N/mg-C$

②モデル化による鉛直一次元モデルへの組み込み

流動制御システムが水質保全の対象とする流動範囲は、曝気装置近傍の局所的な流動ではなくダム湖全域の流動であるので、第2循環流を鉛直一次元モデルに組み込んだ。図-12にモデル化した水平流速の鉛直分布を示す。第1循環流へ引き寄せられ、中層流として再びダム湖全域へ広がってゆく表層および下層流は流出成分とし、中層流は貫入層への流入成分として考えた。図-12では左向きを流出、右向きを流入として表現している。

これらを水温および濁質、水質収支式である表-3の式(2)~(4)の右辺第2項である水平移流項に組み込んだ。なお、鉛直混合は熱量及び質量収支式中の鉛直移流項により表現され、この鉛直流速は、連続式により補完される層毎の水平移流差分に相当する。

③流動式の誘導

流動式は、表-6に示す表層流(Q_u)、中層流(Q_m)、下層流(Q_d)の3式から成る。現地実験で定量的かつ正確に観測できるのは流速の大きな表層流だけであり、中層および下層流については微流速計を用いても測定結果の精度に不安があったので、式(18)は現地観測結果の解析により、式(19)、(20)は水温鉛直分布の経時変化の観測値をシミュレーションで再現することにより同定した。

観測結果から表層流量と、曝気水深、吐出空気量および下層流と表層流との密度差との関係を見ると図-13に示す様になった。この関係を用いて表-6の式(18)を定式化した。中層流量は表層流量と下層流量との和である。下層流量は表層流量と同じ関数形とし、現地実験を行った1992年夏期の釜房ダムと、1994年夏期の耶馬溪ダムの水温観測値を鉛直一次元モデルにより再現計算を行い、図-12の下層流の水深方向の流速鉛直分布も合わせて、表-6の式(19)、(20)を同定した。なお、耶馬溪ダムにおける水温鉛直分布のシミュレーション結果は、図-14に示す。

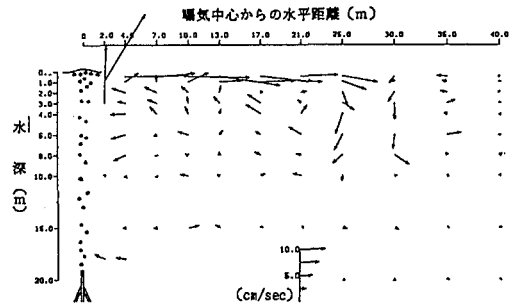


図-10 曝気装置による流動測定結果

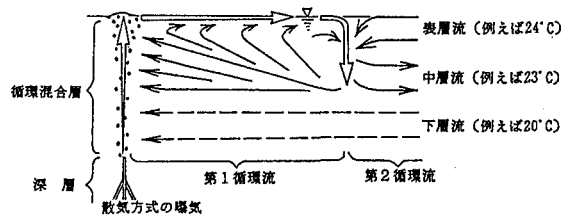


図-11 曝気により生じる流動模式図

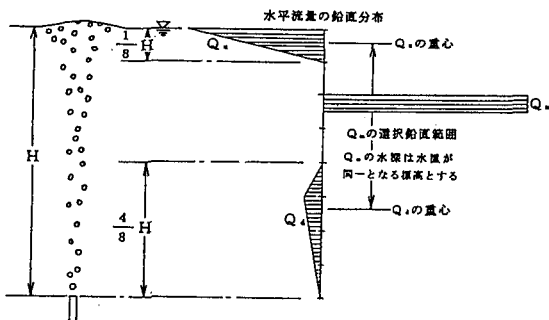


図-12 流動モデル流速鉛直分布

表-6 流動モデル基本式

$$Q_1 = k_1 \times H \times \Sigma (\Delta \rho)^{1/2} \times \Delta \rho^{1/2} \quad (18)$$

$$Q_2 = Q_1 + Q_3 \quad (19)$$

$$Q_3 = d_1 \times H \times \Sigma (\Delta \rho)^{1/2} \times \Delta \rho^{1/2} \quad (20)$$

Q_1 : 第2循環流の表層流量 (m^3/sec)

Q_2 : 第2循環流の中層流量 (m^3/sec)

Q_3 : 第2循環流の下層流量 (m^3/sec)

k_1 : 表層流量の係数 ($=0.36$)

d_1 : 下層流量の係数 ($=0.18$)

H : 曝気水深 (m)

$\Delta \rho$: 吐出空気量 (l/min)

$\Delta \rho$: 表層流と下層流との密度差 (g/cm^3)

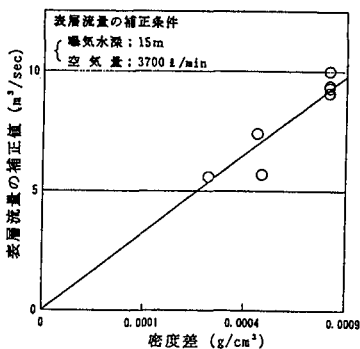
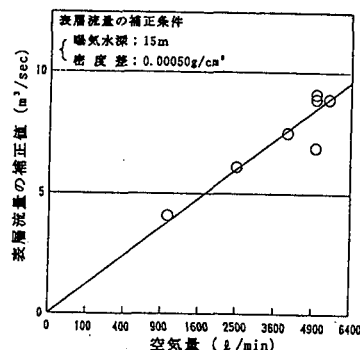
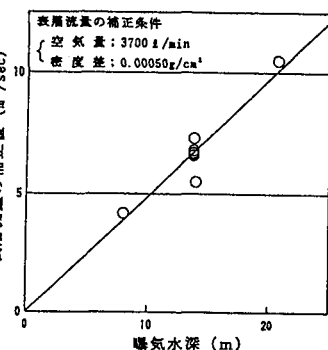


図-13 表層流量と曝気水深、空気量、密度差との関係

2) 複数藻類モデル

流動制御の効果の内、表-1の効果1をシミュレーションで表現するためには、藻類群集の質的な取扱いが必要になる。このため生態系モデル中のChl-aを全藻類の現存量とせず、異なった生育特性を持った藍藻類、緑藻類、珪藻類それぞれの指標ごとに定義し、表-7に示す様に3分割して扱った。

生態系モデルの中で、Chl-a以外のDOやCOD、O-N、O-P等水質項目の関数としてChl-aが用いられている部分については、表-7の式(21)のChl-aの合計量を用いた。また、それぞれの藻類に相当するChl-a算出式である式(22)~(26)は変更前のモデルとほぼ同じ式を用い、最適水温や沈降速度、消滅速度等のパラメーターを各藻類毎に設定した。なお、沈降速度については、モデル中では表-3の式(4)の右辺第2項で扱っている。変更前のモデルと異なるのはパラメーター設定のみでは各藻類の特性を表現できない部分である。式24のスペース効果係数は、自己飽和を表す $\beta S1$ 、 $\beta S2$ と、広い意味での他感作用および全藻類の密度効果を表す $\beta S3$ とからなるとした。また、式(23)右辺下線部の日射量補正関数は、ベースとしたモデルでは強光阻害型が用いられていたが、水質問題を引き起こす藍藻類は強光阻害を受けない^{5,6)}という知見に基づき、藍藻類についてのみ強光飽和型の関数形を用いた。

4.2. 計算条件

これまでに述べたモデルを用い、耶馬溪ダムにおける1994年夏季の流動制御実験の現地調査結果を再現した。この計算条件を表-8に示す。流動制御時の水理水質特性や流動制御の効果と関わる条件について以下に述べる。

(1) 流入河川水温

流動制御による河川水のダム湖への貫入水深の制御を表現するためには、流入河川水温の時刻変動を取り扱う必要がある。

鉛直一次元モデルにおいて、一般的に流入河川水温は他の項目

に合わせて現地観測結果から得られた気温と流入河川水温との回帰式を用いて日平均水温を与えることが多い。一方、図-3および図-4で示した様に、流入河川水温の時刻変動により流動制御時はその水温躍層の特性からダム湖への河川水貫入層の時刻変動も10m以上の幅を持つことがある。従って、流入河川水温は図-3の傾向を参考に、現地測定値の0時~12時の平均水温と、12時~24時の平均水温とをそれぞれ昼間水温と夜間水温とし、この時間の比率で水量および負荷量を分割し、流入河川水温の時刻変動に伴う河川水貫入層の時刻変化を表現した。

(2) パラメーター

生態系モデル及び今回改変した複数藻類モデルのパラメーターは、過去に耶馬溪ダムでの再現計算で同定された値をベースにして観測値と比較、調整し、同定したものである。

1) 水理・水質挙動に関するパラメーター

モデルを改変した複数藻類サブモデル以外のパラメーターの内、①拡散係数(αおよびDK)、②光合成によるDO生産速度(K2)、③底泥からの栄養塩の溶出の3点は、今回用いたモデルを適用する上で流動制御時の水理水質挙動特性に由来する以下の点に注意する必要がある。

① 拡散係数

このモデルでは式(2)、(3)に示すように拡散係数は定数として与えている。再現計算では、流動制御時の強い水温躍層を維持するために一般値より小さい値に相当する $\alpha + DK = 10^{-6} (m^2/day)$ が同定された。流動制御をしない場合は、拡散係数は鉛直方向の熱量および物質の混合量を意味する。これに対して、流動制御時は曝気数高より上部の循環混合層内の乱れは流れモデルの流動により表現される。従って、拡散係数は流動制御によって形成される水温躍層の強度と対応しメインモデル適用上の一般値の範囲より小さな値になる。

② 光合成によるDO生産速度

表-4の式(12)に示すように、メインモデルでは光合成によるDO生産は、Chl-aおよび水温との関数としている。一方、図-14に示す様に、流動制御時は通常藻類の存在しにくい無光層に流動によって押し込

表-7 複数藻類モデル基本式

$$\begin{aligned}
 S(PPT) &= \sum_{i=1}^n S(PPi) \quad \dots\dots\dots (21) \\
 &\quad i=1: \text{藍藻類}, 2: \text{緑藻類}, 3: \text{珪藻類} \\
 &\quad \text{注) } n \text{ は、計算藻類数設定} \\
 S(PPi) &= (G_{Pi} - D_{Pi} - G_{zi}) \cdot P_{Pi} \quad \dots\dots\dots (22) \\
 G_{Pi} &= \beta Si \cdot \mu_{\max} \cdot \left\{ \frac{T}{T_s} \exp\left(1 - \frac{T}{T_s}\right) \right\}^{**} \\
 &\quad \cdot \frac{I}{K_{Is} + I} \cdot \frac{IN}{K_{IN} + IN} \cdot \frac{IP}{K_{IP} + IP} \quad \dots\dots (23) \\
 \beta Si &= \exp(-\beta S3 \cdot \sum_{i=1}^n PPi) \cdot \exp(-\beta S2 \cdot P_{Pi} + \beta S1) \quad \dots\dots (24) \\
 D_{Pi} &= R_{Pi} \cdot \theta_{PPi}^{T-T_{20}} \quad \dots\dots\dots (25) \\
 G_{zi} &= R_{zi} \cdot \frac{K_{Ppi}}{K_{Ppi} + P_{Pi}} \cdot ZP \quad \dots\dots\dots (26)
 \end{aligned}$$

ここで

S (PP)	: 藻類濃度変化量 ($\mu g/l/day$)
PPT	: 全藻類に相当する藻類濃度 ($\mu g/l$)
PPi	: 各藻類に相当する藻類濃度 ($\mu g/l$)
Pi	: 計算藻類数 (-)
n	: 計算藻類数 (-)
ZP	: 動物プランクトン濃度 (mg/l)
G _{pi}	: 各藻類に相当する藻類濃度の増殖率 (1/日)
D _p	: 各藻類に相当する藻類濃度の減少率 (呼吸率) (1/日)
G _z	: 各藻類に相当する藻類濃度の捕食率 (1/日)
βSi	: 各藻類の自己飽和によるスペース効果係数 (-)
$\beta S1$	: 各藻類の自己飽和によるスペース効果係数 (-)
$\beta S2$	: 全藻類の密度によるスペース効果係数 (-)
$\beta S3$	: 全藻類の密度によるスペース効果係数 (-)
$\mu_{\max}$	: 最大増殖速度 (1/日) 注: 補正項の式型による
T _s	: 水温 (°C)
T	: 水温 (°C)
nt	: 増殖速度の水温変化に対する感度 (とがり度) (-)
I _s	: 最大増殖速度を与える最適日射量 ($cal/cm^2/day$)
I	: 日射量 ($cal/cm^2/day$)
K _{Is}	: 日射量に関する半飽和定数 ($cal/cm^2/day$)
K _{IN}	: 無機態窒素に関する半飽和定数 (mg/l)
K _{IP}	: 無機態リンに関する半飽和定数 (mg/l)
IN	: 無機態窒素濃度 (mg/l)
IP	: 無機態リン濃度 (mg/l)
R _{pp}	: 藻類濃度の消費速度 (呼吸率とも言われる) (1/日)
θ_{PP}	: R _{pp} に対する温度係数 (-)
R _{zi}	: 動物プランクトン過剰 (捕食速度) ($m^3/g \cdot day$)
K _{Ppi}	: 藻類濃度に関する半飽和定数 ($\mu g/l$)
※: i=2,3 (緑藻類、珪藻類) では、日射量補正項は下の強光阻害型とする	

$$\frac{1}{IS} \exp\left(1 - \frac{I}{IS}\right)$$

表-8 再現計算条件一覧

条 件	内 容
対象水域	耶馬溪ダム湖
計算期間	1994年7月5日~9月31日
使用モデル	鉛直一次元生態系モデル流動制御版
計算時間間隔	1日 [※]
層分割	2mピッチ

注1: 1日はデータの入力及び出力時間間隔であり、演算のΔTは鉛直流速や拡散係数等から拘束される安定条件を元に逐次決定されている。今回は概ね数時間のΔTであった。

まれた藻類が存在している。この無光層の藻類によるDO生産を見込むと図-14に示すDO分布は表現できなかった。藻類の光合成によるDO生産速度である $K_2 = 0.0(1/\text{day})$ とした。従って、計算上は流動制御時の水中へのDO供給は、水面における再曝気のみで十分であった。しかしながら、これはシミュレーション適用上の取り扱いであり、実現象として水中のDO収支に光合成が寄与しないことを示すわけではない。

③底泥からの栄養塩の溶出

図-14に示す様に、1994年の実験では底層部が強く嫌気化したにも関わらず、底泥からの溶出を示すような底層部のT-Pの高濃度化が見られなかった。耶馬溪ダムの底泥は、部分的にリン含有量が高いことが従来の調査で分かっているが、式14のRWPにこの値を用いると溶出負荷量を過大になった。一方、実験期間中の底部の水温が低いことと関連すると考え、水温補正係数は $\theta_{WP} = 1.2(-)$ とやや大きくし、低水温により抑制を強くして観測値に追従させた。

2) 複数藻類モデルパラメーター

表-9にChl-aのパラメーターの内、藻類間で異なるものを示す。藍藻類は、沈降速度⁷⁾や耐暗性^{8)・9)}は小さく最適水温は高いこと、藍藻類の最大増殖速度は緑藻類や珪藻類に比べて大きくないこと^{5)・6)}、珪藻類はダム湖によっては夏期でも優占種であること¹⁰⁾等の特性をパラメーターで表現するために、各藻類間のパラメーター値の大小関係を維持させながら、参照した文献値の範囲内で同定したものである。従って、本報の藍藻類とは、浮遊性が強く表層で集積することにより水質障害を引き起こす*Microcystis*属や*Anabaena*属を想定しており、冬季や水深数mに出現する*Oscillatoria*属や*Phormidium*属¹⁰⁾には対応しない。

表-9 複数藻類モデルパラメーター

環境要素	記号	藍藻類	緑藻類	珪藻類	文献No.
最大比増殖速度	$\mu_{\max}$	1.3	1.8	2.0	5,6
最適水温	T_s	30℃	20℃	10℃	10
水温とがり度	nt	10	3	0.5	10
呼吸枯死速度 ¹⁾	R_{PP}	0.096(明)0.2(暗)	0.140	0.096	8,9
捕食速度 ²⁾	R_g	0.25	0.1	0.1	-
沈降速度	ω_P	0.0m/day	0.2m/day	0.4m/day	7

注1：耐暗性も表す。注2：ろ過速度でもある。

注3：最大増殖速度、枯死速度、捕食速度の単位は1/dayである。

※以下のパラメーターは各藻類共通値を用いた。

$\beta S_2 : 0.0285$ 、 $\beta S_3 : 0.01$ 、 $KIN : 5 \mu g/l$ 、 $KIP : 0.4 \mu g/l$ 、

$IS : 360 \text{ cal/cm}^2/\text{day}$ (緑藻類、珪藻類)、 $KIS : 50 \text{ cal/cm}^2/\text{day}$ (藍藻類のみ)

4.3. シミュレーション結果

(1) 水温および水質

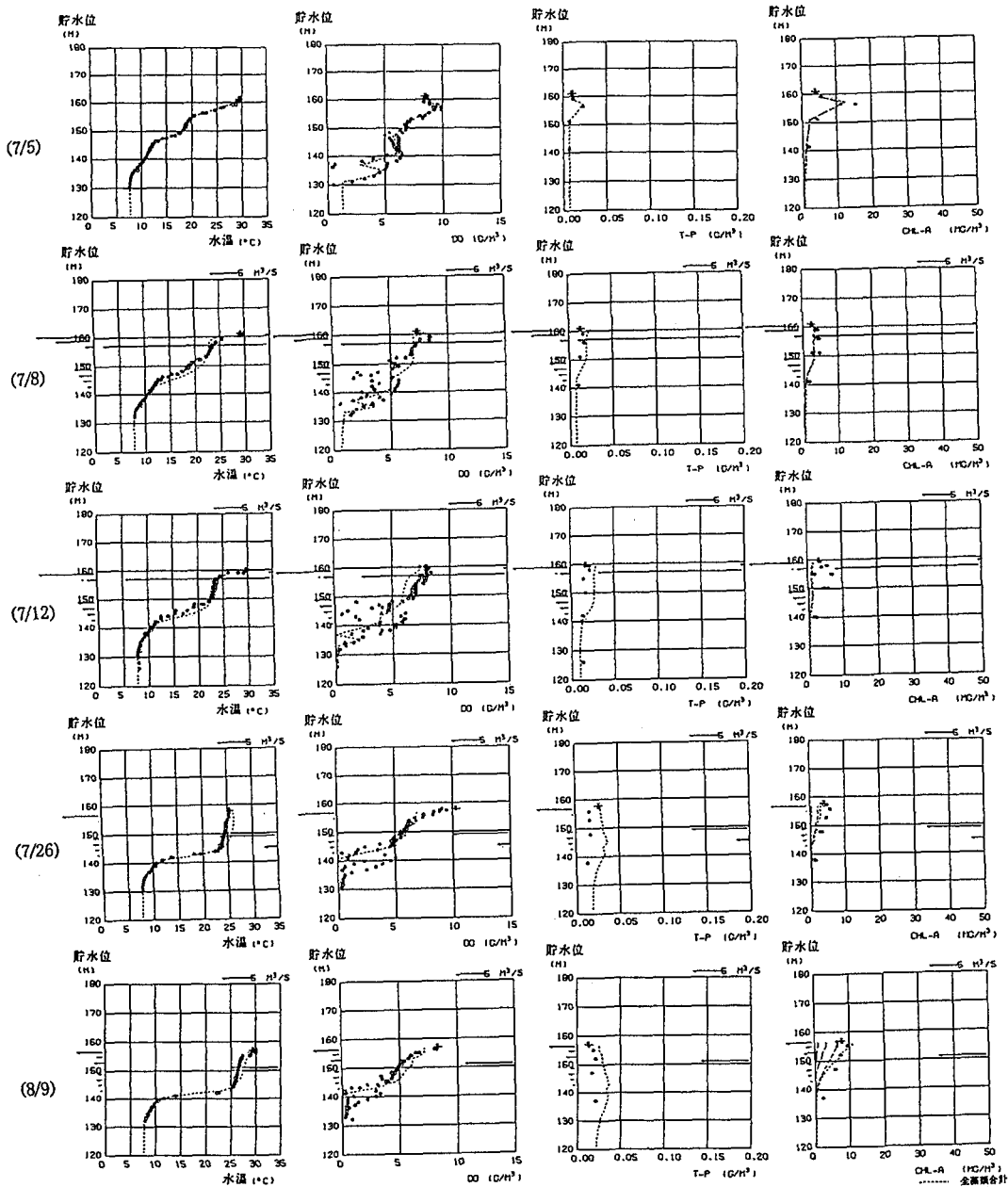
図-14に耶馬溪ダムで流動制御実験を行った1994年7月5日から9月27日までの水温および水質のシミュレーション結果を測定値と共に示す。プロットが測定値、点線が計算値である。

水温とDOについては流動制御時に特徴的な、水温差の大きい水温躍層やその上部の挙動をよく表している。特にDOについては、9月中旬の冷却による対流混合の開始と共に、混合の生じている曝気数高直上まで表層の再曝気で供給された高DO濃度水塊が到達しているのが分かる。T-Pについても底層の嫌気化にも関わらず底層部が低水温であったことにより溶出が発生せずに濃度勾配は鉛直方向に小さいことが表現されている。図-8のChl-aの実測値は全藻類の値であり、計算値にこれに対応させた総Chl-a濃度も示している。Chl-aについては、定性的には経時的な増加および鉛直分布傾向は表現されているが、9月後半は実測値とシミュレーション計算値との傾向が異なり珪藻類の実測値の方が大きくなっている。シミュレーション中ではChl-aとリンとの比率は一定値として一般値の $0.7(g^{-P}/g^{-Chl-a})$ としているが、観測値を見ると、9月以降はこの比率が変化している可能性が推察される。

濁度、COD、TOC(動物プランクトンの指標として)、I-P、O-P、T-N、I-N、O-Nについてもシミュレーションを行い、掲載は割愛するが概ね実測値の挙動を表現している。

(2) 藻類群集挙動

図-15に、藍藻類、緑藻類および珪藻類のそれぞれに相当する表層Chl-aの計算結果の経時変化を示す。



注：図中の矢印は、各層の流量を表す。各図の左軸に接する矢印は層への流出成分であり、右軸の内、左側の矢印は流入成分を、右側の矢印は河川水の流入に伴う表層部の進行による流出を示す。また、流入流出成分にはそれぞれ曝気流による水平流も含まれ、これらは矢印の基部が軸からやや離れたことにより区別される。なお、曝気水平流の鉛直分布は図-12と対応し、河川水流入層は図-4と対応する。

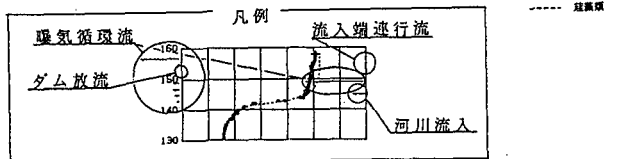


図-14 (1) 水温および水質シミュレーション結果 (その1)

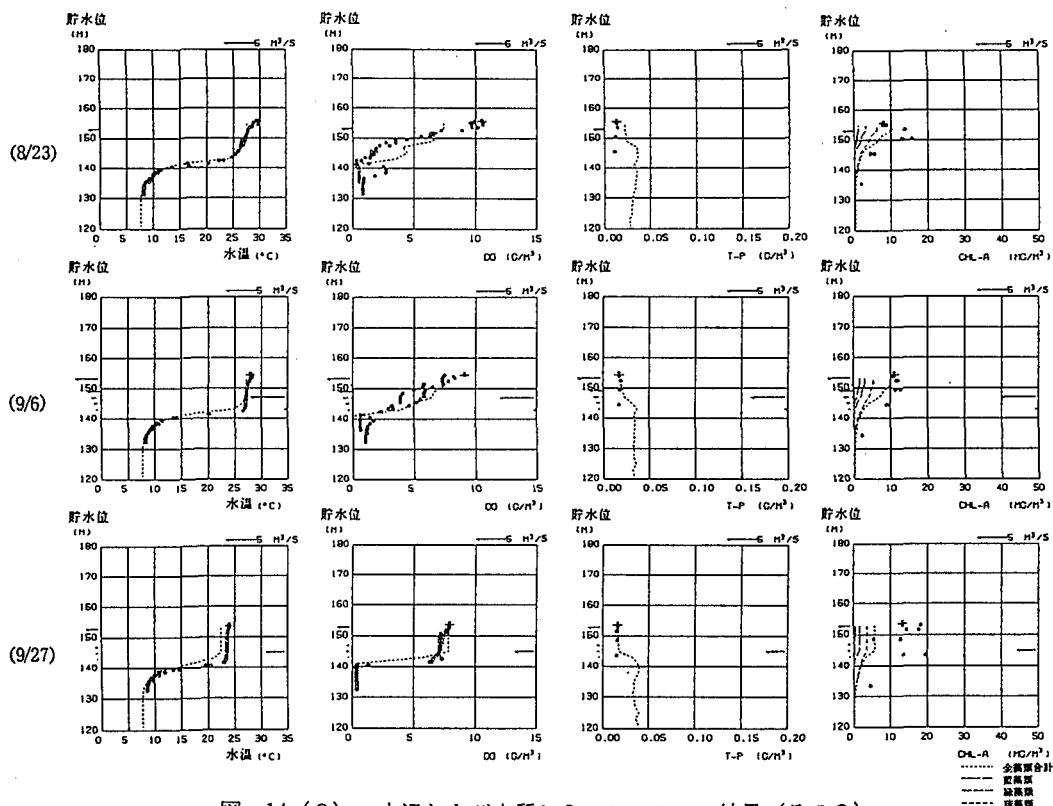


図-14 (2) 水温および水質シミュレーション結果 (その2)

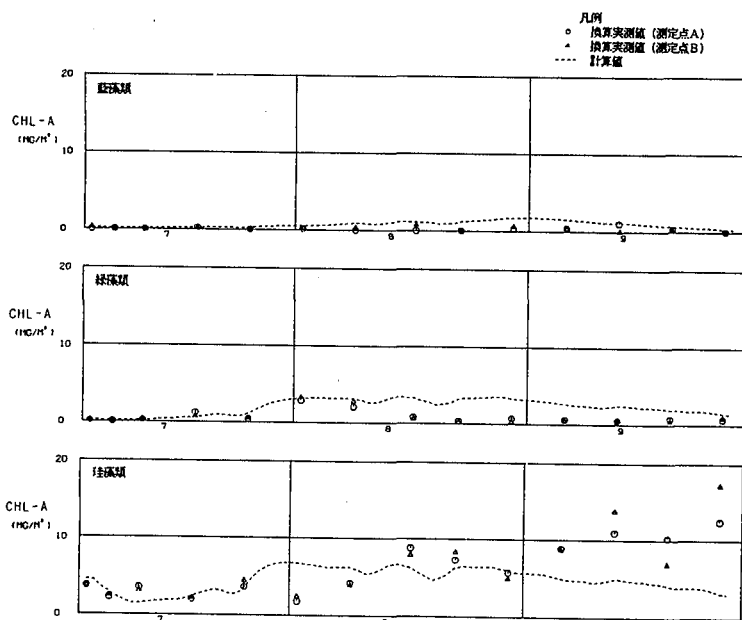


図-15 藻類別の Chl-a シミュレーション結果 (表層)

なお、図中の換算実測値として示したChl-aは、耶馬溪ダムでの過去の現地調査結果をもとに各藻類が強く優占したデータから藻類綱毎に細胞数とChl-aとの回帰式を作成し、これと実験期間中の藻類細胞数とから求めた、各藻類に相当する計算値のChl-a濃度である。

実験期間中の浮遊藻類の挙動は、珪藻類を主体とし8月前半に一時的に緑藻類が増殖したものであったが、シミュレーションでは緑藻類の一時的な増殖および珪藻類の経時的な増殖傾向については十分表現できなかった。実現象における出現藻類の変化は数週間単位で起こったものであるが、このような比較的短期的な藻類群集の質的変化の表現には至らなかった。しかしながら、実験期間が夏期にも関わらず流動制御による対策前の耶馬溪ダムで多く発生していた藍藻類は少なく、珪藻類を主体とした群集構成であったことは表現できた。

5. 考察

流動制御は曝気によって生じる密度流を利用したダム湖水質保全システムである。本報の流動モデルは水温鉛直分布、吐出空気量、曝気水深を任意に与えることができるので、様々なダム湖で適用可能である。この流動モデルの関数形は、従来の気泡噴流の研究における吐出空気量と揚水流量との関係¹¹⁾や、ベルヌーイの定理の変形¹²⁾によって得られる密度差と密度流との関係ともほぼ合致しており、鉛直一次元モデルにおける流動の表現というレベルでは概ね汎用的であると考えられる。

しかしながら、ダム湖への河川水貫入層を表現する上で、4.2.1(1)で述べたように、流入河川水温の時刻変動という境界条件の時間的な取扱いの問題が抽出された。ダム湖各層への河川水流入負荷を正確に見積もるためには、河川水温の時刻変化に伴い貫入層を時刻変動させる必要がある。しかし、鉛直一次元生態系モデルの計算時間間隔は一般に1日であり、この為だけに計算時間間隔を1時間にすることは好ましくない。本報では4.2.1)で述べた方法により、この問題を解決した。なお、本報では河川水温を12時間ごとに分割したが、分割方法は河川ごとに、或いは季節ごとに異なることも考えられ、この点については今後の課題としていきたい。

次にダム湖水質挙動に関してであるが、4.2.(2)で述べたように、流動制御時の水温躍層部の鉛直拡散量の小ささや、底層部の強い嫌気化にもかかわらず溶出が発生しないことなどは、パラメーターの調整だけでベースモデルで良好に表現できることが明らかとなった。なお、光合成によるD_O生産速度を見込まなかったことについては、本来ならばモデルの改良を行うべきである点であるが、本報はメインモデルの適用性を見ようとするものであるのでパラメーターの調整による対応方法として述べたのであり、実現象として光合成がダム湖のD_O収支に寄与しないとは考えていない。

藻類の複数化については、緑藻類の短期的な増殖が表現できず実現象の藻類群集の変化メカニズムを十分表現したとは言いがたい。しかし、本研究は汎用的かつ実用レベルでのモデルの適合性を主眼において、浮遊性および集積性の強い藻類に与える流動制御による水理環境の変化の影響を表現することを目的としており、短期的な藻類種の消長を表現しようとするものではない。従って、このような範囲内では藻類群集の変化については実現象は概ね再現できたと言える。さらに藻類群集の消長の的確に表現するためには、藻類と環境要因との関係についての詳細な検討が必要であると考えられる。

6. まとめ

- 1) ダム湖の水質保全対策である流動制御設備稼働時の水理・水質挙動は、曝気循環に伴う流動モデルを取り入れ、生態系モデルのChl-a部分を改変した鉛直一次元モデルで表現することができることが分かった。
- 2) 本モデルを適用して流動制御の評価を行うためには、流動制御に適した流入河川水温や、パラメーター等の諸条件を設定する必要がある。また、本モデルを広く適用する上で、これらの条件については、さらに検討が必要である。

3) 流動制御設備による効果の一つである藻類群集の質的制御については、検証が十分とは言えないため、今後さらに現地実験および観測や、流動制御と藻類の増殖特性に関わる室内実験等を行っていき、流動制御システムの効果を十分に評価できるシミュレーションモデルの構築を行っていく予定である。

<参考文献>

- 1) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩；貯水池流動制御による水質保全対策，土木学会水理委員会水工学論文集，第37巻，1993
- 2) 丹羽薫・久納誠・久保徳彦・古里栄一；ヒートポンプと流動制御を用いたダム湖水質保全システム，土木学会水理委員会水工学論文集，第38巻，1994
- 3) 丹羽薫・久納誠・久保徳彦・古永充；流動制御システムによるダム湖水質保全の現地実験，土木技術資料，第37巻第6号，1995
- 4) 森北佳昭・畑孝治・三浦進；貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル（その1），土木研究所資料第2443号，1987
- 5) 生嶋功；水の華の発生機構とその制御，東海大学出版会，1987
- 6) 合田健 他；陸水域の富栄養化防止に関する総合研究（V）霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化（昭和55～57年度特別研究報告）；国立公害研究所研究報告，第54号，1984
- 7) R. A. Pastorok, Mark W. Lorenzen, Thomas C. Ginn Environmental Aspects of Artificial Aeration and Oxygenation of Reservoirs: A Review of Theory, Techniques, and Experiences, NTIS Technical Report E-82-3, 1982
- 8) 土屋文・上田映子・柳淳一・中西昇；藻類の耐暗性に関する研究，第29回 日本水環境学会年会講演集，1995
- 9) 小島貞夫；富栄養化対策としての湖水強制循環法，産業公害，Vol. 18, No. 9, p68-p75, 1982
- 10) 丹羽薫・天野邦彦・大西実；富栄養化の観点から見た全国多目的ダム貯水池の水質特性に関する研究，土木研究所資料第3116号，1992
- 11) 浅枝隆・川北晃久・工藤勝弘・柴田正和；揚水筒の応用としての曝気循環による貯水池内植物プランクトン増殖に対する光制御効果の検討，平成2年度科学研究費補助金（試験研究（B））研究成果報告書，1991
- 12) 吉川秀夫；水理学，技報堂出版，1976