

<報 文>

ダム湖における植物プランクトンの 種構成および増殖シミュレーション*

藤田和男**・鷹野 洋**・劔持堅志**

キーワード ①植物プランクトン ②ダム湖 ③クロロフィル a ④シミュレーション

要 旨

岡山県の三大河川の一つである高梁川流域のダム湖である千水湖について、2007年度に湖の水質および植物プランクトンの調査を行った。CODは春期(5月)および夏期~秋期(7~10月)に高い値を示した。その要因は、5月は珪藻綱 *Fragilaria crotonensis*, 7~8月は渦鞭毛藻綱 *Peridinium tabulatum*, 9~10月は藍藻綱 *Microcystis aeruginosa* の増殖によるものと考えられた。調査結果を解析し、植物プランクトンの増殖を再現するシミュレーション計算を試みた。種間の競合がないと仮定し計算した場合、*Fragilaria crotonensis* の増加は再現できたが、その後の減少や消失を再現できなかった。一方、栄養塩について種間の競合を考慮し、4種類の植物プランクトンの最適増殖温度が異なるとして計算した場合には、4種類の優占種の変遷が再現された。

1. はじめに

近年、県下のダム湖においてアオコやカビ臭の発生など、富栄養化の影響による問題が生ずるおそれがあり、湖の水質変化の特性を把握することが重要であることから、ダム湖(千水湖)の植物プランクトンの種構成および増殖について検討した。

千水湖は千屋ダムによって形成された人造湖である。千屋ダムは一級河川である高梁川上流部に位置する、堤高97.5(m)、堤頂長259(m)、総貯水容量2,800万(m³)の重力式コンクリートダムで、洪水調節、流水の正常な機能の維持、上水道(新見市10,000m³/day)および工業用水(108,000 m³/day)の確保供給と併せて発電を行う多目的ダムである。1975年度から建設に着手し、1998年度に完成した。

植物プランクトンの発生はダム湖の水質汚濁の主な原因となっているが、その種構成および優占種の変遷に影響する要因を解明するため、2007年度に実施した千水湖の調査結果について計算モデルを作成し、変遷の主要因について検討しシミュレーション計算を行ったので報告する。

2. 材料および方法

2.1 調査地点および調査項目

千水湖の水質は千屋ダムの堰堤付近で、流入水質は上流の朝間橋で測定した(図1)。2007年4月~08年3月まで、年に12回採水を行い水質および植物プランクトン細胞数を調査した(植物プランクトン細胞数については、12月分のデータはサンプリングできていないため欠測である)。

分析項目のうち、COD、BOD、全窒素(以下 T-

*Species Composition and Growth Simulation of Phytoplankton in Reservoir

**Kazuo FUJITA, Hiroshi TAKANO, Katashi KENMOTSU (岡山県環境保健センター) Okayama Prefectural Institute for Environmental Science and Public Health

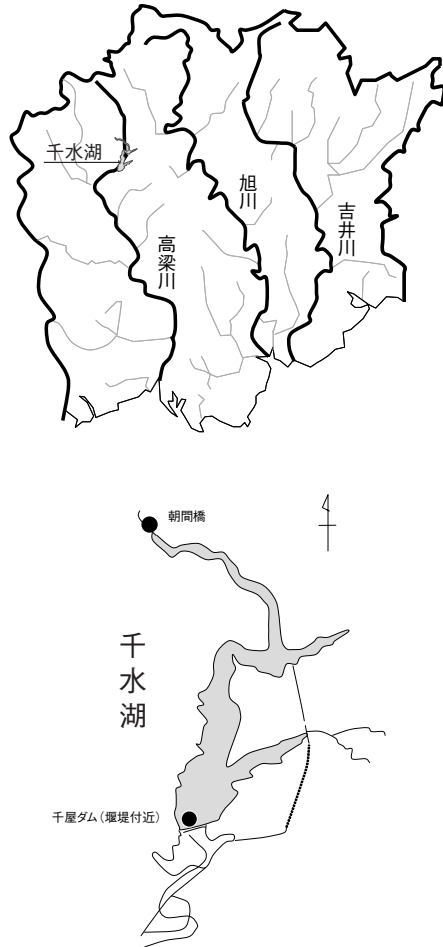


図1 採水地点

N), 全リン(以下 T-P), SS および全有機炭素(以下 TOC)は工場排水試験法 K0102¹⁾に準じて, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P はイオンクロマトグラフ装置(ダイオネクス製 DX-320)により測定, またクロロフィル a(以下 Chl.a)は吸光光度法²⁾により測定した。植物プランクトンはプランクトン計数板(松浪硝子工業製 MPC-200)にサンプルを 0.1mL 採取し, 顕微鏡(オリンパス製 BH-2)で検鏡・計数した。

2.2 植物プランクトンの比増殖速度等の計算

植物プランクトン細胞の比増殖速度 μ (1/day) は, 文献^{3~5)}を参考に以下の式で計算した。

$\mu = \text{最大比増殖速度} \times (\text{窒素} \cdot \text{リン因子}) \times \text{温度因子}$

$$= \mu_{\max} \left\{ \text{Min} \left[\frac{N_d}{K_N + N_d}, \frac{P_d}{K_P + P_d} \right] \right\} K_t \quad (1)$$

ここで

$$= K_t \left[\left[\frac{T}{T_s} \cdot \exp \left(\frac{T_s - T}{T_s} \right) \right] \right]^3$$

ここで, μ_{\max} : 最大比増殖速度(1/day), N_d : 無機態窒素(mg/L), P_d : 無機態リン(mg/L), K_N : 窒素半飽和定数(mg/L), K_P : リン半飽和定数(mg/L), K_t : 温度に関する係数, T : 水温(°C), T_s : 増殖に最適な水温(°C)である。窒素・リンについては増殖を律速している因子のため, いずれかの最小値を用いた。半飽和定数は, 栄養塩と増殖速度の関係を決める定数である。

なお, N_d として硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素およびアンモニア態窒素の測定値の合計値を, P_d としてリン酸態リン(PO₄-P)に比較して定量下限が低い(0.001mg/L)全リン(T-P)の測定値を使用した。

水域からの流入水を考慮した植物プランクトン細胞数の変化は, 文献^{3~5)}を参考に下式で計算した。

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= (\text{流入}) + (\text{増殖}) - (\text{沈降}) - (\text{流出}) \\ &= \left[\frac{C_{in}}{\tau} \right] + (\mu \cdot C) - \left[\frac{K_s}{H} \cdot C \right] - \left[\frac{C}{\tau} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

ここで, C : 植物プランクトン細胞数(cells/mL), C_{in} : 流入水の植物プランクトン細胞数(cells/mL), K_s : 植物プランクトン沈降速度[0.03] (m/day), H : 水深(m), τ : 平均滞留時間(day) ([]内は定数値)。

平均滞留時間 τ (day)はダム貯水量をダム管理記録の1日平均流入量(m³/s)で除して計算した。希釈率 D (1/day)は τ の逆数(1/ τ)である。

植物プランクトン種間の栄養塩に関する競合を検討する場合には, 種ごとの栄養塩吸収速度を決める必要がある。 q (比基質吸収速度)は比増殖速度 μ に比例し, 以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} q &= \frac{\text{比増殖速度}}{\text{細胞中の栄養塩含有量}} \\ &= \frac{\mu}{Y_{X/N}} \\ Q &= X \cdot q \quad (3) \end{aligned}$$

ここで q : 比基質(栄養塩)吸収速度(mg 基質/mg 細胞/day), $Y_{X/N}$: 細胞中の栄養塩含有量(収

率) (mg/mg), Q 基質(栄養塩)吸収速度(mg/L/day), X: 植物プランクトン細胞量(mg/L)である。

水域には複数種の植物プランクトンが存在し, 種間で栄養塩に関し競合がある場合, 種ごとの栄養塩吸収量は, 各個体ごとの栄養塩吸収速度および個体数に比例する。しかし, 栄養塩の総量には限りがあるため, 種ごとの吸収量は種全体の栄養塩吸収速度に比例して分配される。種ごとの増加量は栄養塩吸収量により決定され, 種ごとに吸収速度が異なる場合, 種間の増加量に差が生ずることとなる。

水域に n 種類の植物プランクトンが存在し(i=1, 2...n), i 番目の種の総量を X_i (mg/L), 窒素およびリンのうち増殖を制限する因子となる栄養塩を Nu (制限栄養塩)とすると, i 番目の種の制限栄養塩の吸収量は下式で示される。

$$\begin{aligned}
 Nu_i &= (\text{制限栄養塩の総量}) \times (\text{i 番目の種が制限栄養塩を吸収する割合}) \\
 &= (\text{制限栄養塩の総量}) \times \left(\frac{\text{i 番目の種の制限栄養塩吸収速度}}{\text{存在種の制限栄養塩吸収速度の総和}} \right) \\
 &= Nu \times \frac{q_i \cdot X_i}{\sum_{j=1}^n q_j \cdot X_j} \\
 &= Nu \times \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^n Q_j} \tag{4}
 \end{aligned}$$

ここで, Nu_i : i 番目の種が吸収した制限栄養塩量(mg/L), Nu : 制限栄養塩の総量(mg/L), x_i : i 番目の種の量(mg/L), Q_i : i 番目の種の制限栄養塩吸収速度(mg/L/day)である。

3. 結果および考察

3.1 水質および植物プランクトン

図2に水質測定結果を示す。pHは春期から秋期(5~9月)に9~10と高く, 植物プランクトンの炭酸同化作用による溶存 HCO_3 吸収によるものと考えられた。また Chl.a は5月および7~10月に高く, CODも春期から秋期に高い傾向が見られた。

植物プランクトンの計数結果を表1に示す。COD源となる有機物の量は, 細胞の総体積=湖内で内部生産された植物プランクトンの細胞数に

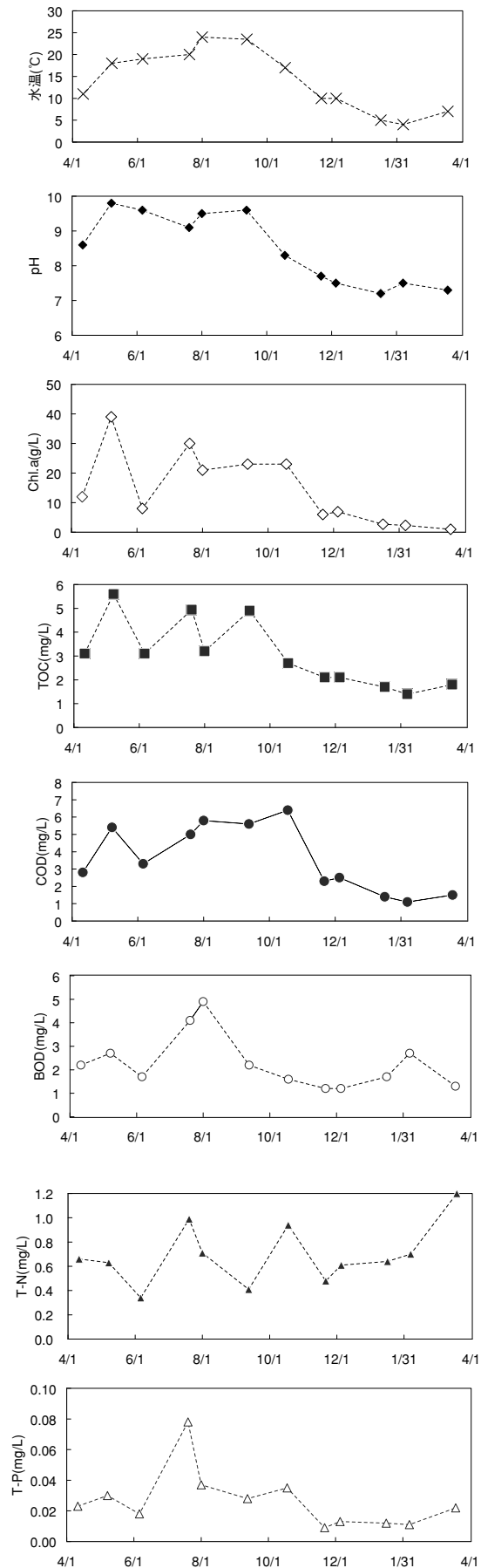


図2 水質調査結果

表 植物プランクトン計数結果

			細胞数 (cells/mL)										
			4月11日	5月8日	6月6日	7月20日	8月1日	9月12日	10月18日	11月21日	1月16日	2月6日	3月19日
<i>Asterionella formosa</i>	アステリオネラフォルモサ	珪藻綱	770	260	160	-	-	-	-	5,100	160	360	-
<i>Attheya zachariasii</i>	アッテヤツアカリアシ	珪藻綱	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-
<i>Cocconeis sp.</i>	コッコネイス	珪藻綱	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-
<i>Cyclotella sp.</i>	シクロテア	珪藻綱	10	-	-	-	-	640	70	-	-	-	20
<i>Synedra acus</i>	シネドラアクス	珪藻綱	10	-	-	-	-	-	-	-	40	160	20
<i>Nitzschia acicularis</i>	ニツシアアシクラリス	珪藻綱	20	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-
<i>Fragilaria crotonensis</i>	フラギラリアクロトネンシス	珪藻綱	90	9,200	8,400	140	640	2,800	-	-	20	320	-
<i>Chlamydomonas sp.</i>	クラミドモナス	緑藻綱	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-
<i>Staurastrum sp.</i>	スタウラストルム	緑藻綱	-	-	240	-	-	160	-	-	-	80	-
<i>Scenedesmus ecomis</i>	セネデスムスエコムニス	緑藻綱	20	-	-	-	-	320	320	-	-	-	-
<i>Eudorina elegans</i>	ユードリナエレガンス	緑藻綱	-	-	-	160	-	-	-	-	-	-	-
<i>Microcystis incerta</i>	ミクロキスティスインケルタ	藍藻綱	-	-	-	-	-	7,000	-	-	-	-	-
<i>Microcystis aeruginosa</i>	ミクロキスティスエルギノサ	藍藻綱	-	-	-	-	-	150,000	100,000	15,000	-	-	-
<i>Cryptomonas sp.</i>	クリプトモナス	褐色鞭毛藻綱	10	-	120	-	-	-	-	600	-	-	-
<i>Peridinium tabulatum</i>	ペリディニウムタブラツム	渦鞭毛藻綱	60	60	360	400	440	-	-	-	-	-	-

細胞の体積を乗じたものに比例すると仮定して、優占種4種類について、細胞数および顕微鏡写真(図3c)をもとに求めた細胞体積を図3bに示す。この場合、1細胞当たりの体積を、*Fragilaria crotonensis* は620(μm^3)、*Peridinium tabulatum* は20,000(μm^3)、*Asterionella formosa* は540(μm^3)とした。*Microcystis aeruginosa* については、細胞周辺に細胞体積の数倍から10倍以上の寒天質状物質が存在する⁶⁾ことが指摘されており、群体を包む寒天質の体積を加算するため細胞体積の5倍の値とした。その他の細胞は500(μm^3)とした。種毎の細胞体積の変遷(図3b)から、春期(5月)には珪藻綱 *Fragilaria crotonensis* が優占し、夏期(7~8月)には *Peridinium tabulatum*、秋期(9~10月)にかけては藍藻綱 *Microcystis aeruginosa* がCODの値に影響を与えるものと考えられたが、6月の測定値は予想に反して低い値を示した。なお、*Fragilaria crotonensis* は *Microcystis aeruginosa* が優占した秋期および3月以外では、ほぼ年間をとおして観察されたが、細胞の体積から見ると春期(5~6月)以外の期間ではCODに影響を与えるレベルではなかった。

T-N/T-P比>13の場合は植物プランクトンの増殖にリン制限的、T-N/T-P比<13では窒素制限的⁷⁾と推定されるが、窒素・リンについて、T-N/T-P比は年間を通してほぼ13以上であった(図

4)。今回の測定結果では年間を通してリン制限的と考えられた。すなわち、6月にCODが低い値であった理由として、6月のT-Pが0.018(mg/L)であり、他の時期(5~10月:0.028~0.078mg/L)と比較して4割以上低く、植物プランクトン細胞の炭酸同化作用がリンにより制限を受け、細胞に含有される有機炭素量が低かったと推察された。

なお、TOCはCODと同様に春期から秋期にかけて概ね高い傾向がみられ、CODと同様に植物プランクトンの影響と考えられるが、TOCは6月だけでなく8月に低い値を示しており、この原因は不明である。

TOCはT-Pの増加に伴い増加する傾向が認められた(図4)。これはリンが植物プランクトンに吸収されてTOCが増加するためであるが、ばらつきの原因は細胞の炭素/リン比が種ごとおよび季節ごとに異なることによると考えられる。

3.2 シミュレーション計算

調査結果を解析し、植物プランクトンの増殖を再現するシミュレーション計算を試みた。

千水湖では季節ごとに優占種が変化した。ここではまず、年間を通して比較的多く存在した単一種の増殖について計算を行った。次に複数の種を対象に、それぞれの種について増殖に最適な水温Tsを付与し、種間の競合を考慮した計算を行っ

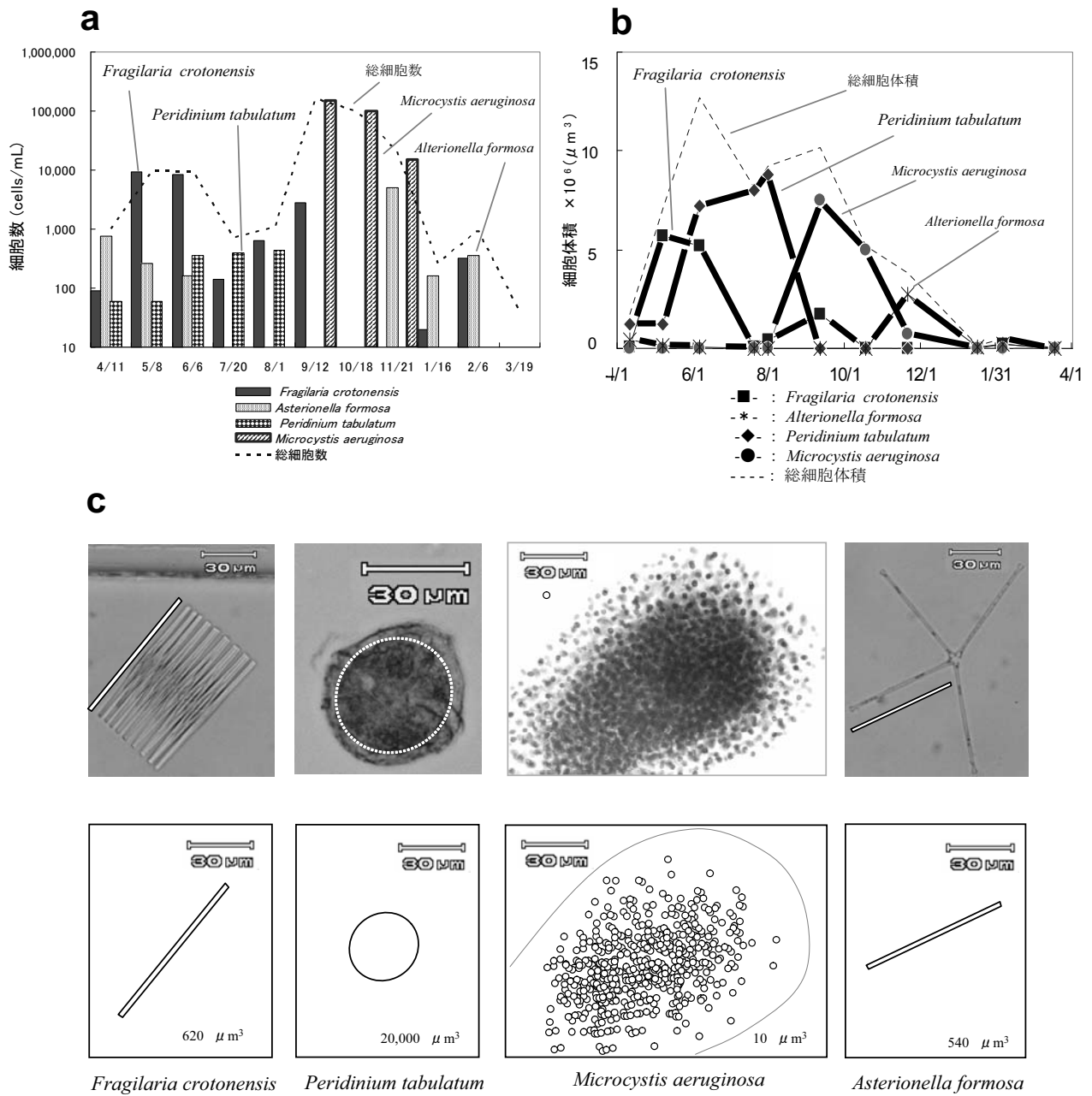


図3 植物プランクトン調査結果

下記優占種(4種)について、

a : 月毎の細胞数

b : 細胞体積の積算値に換算。

ただし *Microcystis aeruginosa* については、寒天質を考慮⁶⁾し細胞体積の5倍の値とした。

c (上段) : 写真

(下段) : 個体の大きさおよび形状を模擬的に表示

優占種(4種)

春期 : *Fragilaria crotonensis*

夏期 : *Peridinium tabulatum*

秋期 : *Microcystis aeruginosa*

冬期 : *Asterionella formosa*

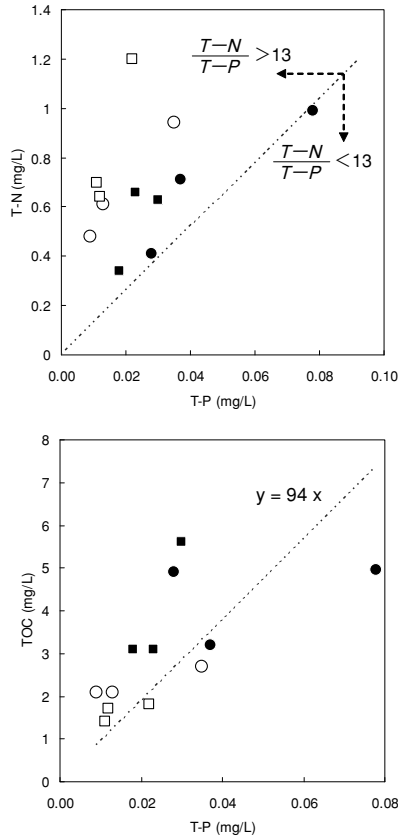


図4 T-PとT-NおよびTOCの関係

春期(4~6月): ■
 夏期(7~9月): ●
 秋期(10~12月): ○
 冬期(1~3月): □

た。

3.2.1 種間の競合が無い場合

春期から秋期に優占し、また年間を通して比較的多く存在した *Fragilaria crotonensis* について、各パラメータを検討し、増殖シミュレーションを試みた。

図5に、水温と比増殖速度の関係、およびこれらの値を用いたシミュレーションによる *Fragilaria crotonensis* の計算結果を示す。

水温について、文献値³⁾では珪藻綱の最適水温 T_s として6~12(°C)の値が設定されており、ここでは T_s (°C)を12°Cとした。このとき、理論式(1)から計算される温度係数曲線 $K_t(-)$ は、比増殖速度 μ (実測値)と類似した(図5)。

植物プランクトンの増殖を計算するためには、(1)式で最大比増殖速度 μ_{max} および栄養塩(窒素・リン)の半飽和定数等の定数(パラメータ)値を設定する必要がある。ここで μ_{max} の値は、文献

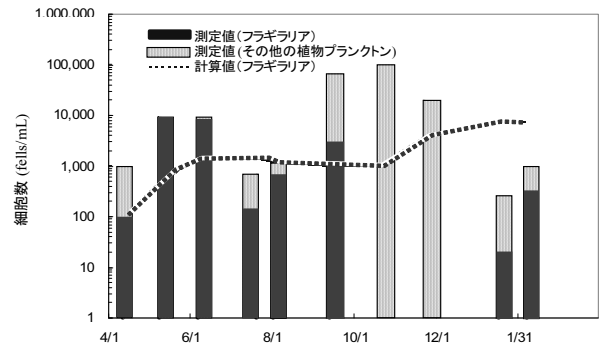
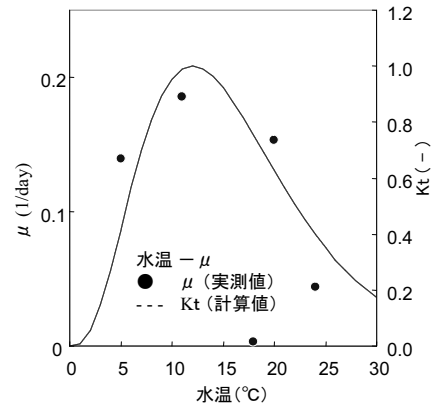


図5 *Fragilaria crotonensis* の水温と比増殖速度の関係および細胞数のシミュレーション計算結果(種間の競合がない場合)

設定条件

・水温, 希釈率D, 流入水中の PO_4-P : 実測値

・最適水温 T_s *Fragilaria crotonensis* : 12°C

値^{3,4)}を参考に0.3(1/day)に設定した。窒素の半飽和定数 K_N (mg/L)は文献値³⁾から0.3(mg/L), またリンの半飽和定数 K_P (mg/L)は文献値³⁾から0.02(mg/L)を設定した。水温および栄養塩(I-N, T-P)は月毎の実測値を設定し、1ヵ月間同じ値で推移するとした。

これらの値と(2)式を用いた *Fragilaria crotonensis* のシミュレーション計算結果を図5に示す。なお植物プランクトン細胞数(C)の初期値は、*Fragilaria crotonensis* が4月11日に90(cells/L)存在するとして計算した。

実測値では4~5月にかけて *Fragilaria crotonensis* の細胞数が増加した。計算上も、植物プランクトン細胞は増加したが、実測値と比較して低い値であった。夏期(7~9月)には *Fragilaria crotonensis* の細胞数が減少したが、シミュレーション計算ではこれを再現できなかった。秋期(9~11月)に、*Microcystis aeruginosa* (藍藻綱)が

優占し、この間、*Fragilaria crotonensis* (珪藻綱)の細胞数は減少し10～11月にはほとんど観察されなかったが、これも計算では優占種の交替をまったく再現できなかった。実測値では1～2月に*Fragilaria crotonensis*が再度出現したが、冬期の計算値は実測値よりも高い値であった。この原因は他の植物プランクトン種の影響をまったく考慮していないためと考えられ、複数の植物プランクトンを設定し、種間の競合を考慮する必要が認められた。

3.2.2 種間の競合がある場合

優占種の競合を検討するために、植物プランクトン種を4種類(*Fragilaria crotonensis*, *Peridinium tabulatum*, *Microcystis aeruginosa* および *Asterionella formosa*)とし、栄養塩に関して種間に競合が生ずるモデルを設定し、シミュレーション計算を試みた。

各種ごとのTs(増殖に最適な水温)は文献^{3,4)}および実測値(図2)を参考に*Fragilaria crotonensis*は12℃、*Peridinium tabulatum*は20℃、*Microcystis aeruginosa*は24℃、および*Asterionella formosa*は10℃とした。その他のパラメータについては、いずれの種も同じ値とし、文献^{3,4)}を参考に窒素の半飽和定数 K_N (mg/L)を0.3(mg/L)、リンの半飽和定数 K_P (mg/L)を0.02(mg/L)とした。

水温は実測値を適用し、希釈率 D (1/day)は年間を通して一定値(0.1/day)とした。また実測値から、制限栄養塩 Nu はリン酸態リン(PO_4 -P)とし、流入水中の濃度は実測値を参考に0.03(mg/L)で一定とした。各プランクトンが吸収する割合は、種毎の存在量に比例し(式(4))、増殖速度はリン濃度によって制限されるとした。

PO_4 -Pの吸収により種の異なる植物プランクトンの細胞数がどの程度増加するかは不明のため、 PO_4 -Pが一定の条件下での種間の競合をシミュレーション計算できない。このため PO_4 -Pとの関係(図4)が実測値から推定できるTOCを用いて植物プランクトンの増殖を検討した。植物プランクトン細胞の PO_4 -PとTOCの比は、測定結果(図4)をもとに100(mg C/mg P)と設定した(細胞に0.01(mg)の PO_4 -Pが吸収されると細胞のTOCが1(mg)増加する)。

初期条件として、1日目(4月1日)の植物プラ

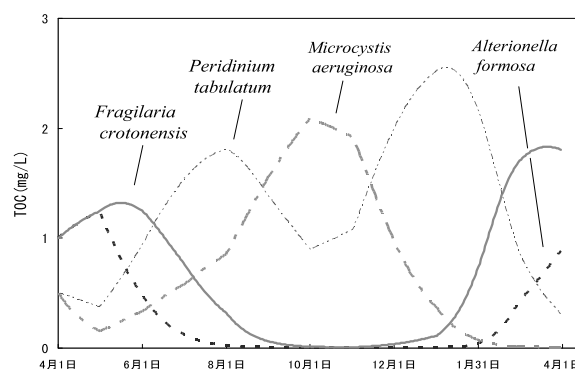


図6 シミュレーション計算結果(種間の競合がある場合)

設定条件

水温	: 実測値
希釈率 D	: 0.1(1/day)
流入水中の PO_4 -P	: 0.03(mg/L)
最適水温 T_s	
<i>Fragilaria crotonensis</i>	: 12℃
<i>Peridinium tabulatum</i>	: 20℃
<i>Microcystis aeruginosa</i>	: 24℃
<i>Asterionella formosa</i>	: 10℃

ンクトン細胞量(TOC換算)を*Fragilaria crotonensis*および*Asterionella formosa*は1(mg/L)、*Peridinium tabulatum*および*Microcystis aeruginosa*は0.5(mg/L)存在するとして、上述の条件で式(2)を用いて、単位ステップを1日として計算を行った。1日当たりの植物プランクトン増加量は、(3)および(4)式で決められる栄養塩吸収量により、種毎に異なる値となる。

計算結果(図6)では、図2に示す時間の経過に伴い水温を変化させると、これに応じて最適水温 T_s に近い種が増加し、また比増殖速度 μ (1/day)が希釈率 D (1/day)より小さい種は希釈により減少していくため、季節ごとに優占種のピークが生じた。計算では5月に*Fragilaria crotonensis*、7～8月に*Peridinium tabulatum*、9～11月に*Microcystis aeruginosa*が優占し、これは実測値から換算した植物プランクトン体積(図3c)と同様の推移を示していた。一方、計算では冬期(12～1月)に*Peridinium tabulatum*が優占するが、実測では観察されず、計算では考慮していない要因が影響していると思われる。

すなわち種間の競合を考慮した場合は、植物プランクトン種ごとの増加量は制限栄養塩(PO_4 -P)の吸収量により決定され、この栄養塩吸収速度の差を生ずる増殖最適温度の違いが優占種変遷の主要因と考えられた。この解析方法について、冬期

における計算結果と調査結果との不整合についてはなお検討を要するが、汚濁状況が問題となる春～秋期において、調査結果とシミュレーション計算の結果がよく整合したことから、他のダム湖当に適用可能と考えられる。

4. ま と め

千水湖について水質および植物プランクトンを調査した。CODは春期(5月)および夏期から秋期(7～10月)に高い値を示した。5月は*Fragilaria crotonensis*, 7～8月は*Peridinium tabulatum*, 9～10月は*Microcystis aeruginosa*の増殖によるものと考えられた。

種間の競合を考慮しない場合の計算では、9～11月の*Fragilaria crotonensis*の減少をまったく再現できず、複数の植物プランクトンを設定し、種間の競合を考慮する必要が認められた。

種間の競合を仮定した場合、計算結果は、5～6月に*Fragilaria crotonensis*, 7～8月に*Peridinium tabulatum*, 9～10月に*Microcystis aeruginosa*が優占し、実測値と同様の推移を示した。

植物プランクトン種ごとの増加量は吸収された制限栄養塩($PO_4\text{-P}$)により決まり、種ごとの増殖最適温度の違いが優占種変遷の主要因と考えられた。

—引用文献—

- 1) 平河喜美男編：工場排水試験法 JIS-K0102, p42-44, 日本規格協会, 東京, 1998
- 2) 西澤一俊, 千原光雄編：藻類研究法, p398, 共立出版, 東京, 1979
- 3) 環境省環境管理局水環境部：平成16年度環境省請負業務結果報告書 児島湖水循環回復計画策定調査, pp.112-121, 2005
- 4) 松梨史郎, 井野場誠治, 下垣 久, 宮永洋一：手賀沼における流動・水質・底質の時空間変動シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響, 土木学会論文集, **712(60)**, 161-173, 2002
- 5) 九州環境管理協会・有明研究会編：有明海環境の定量的評価の研究—漁業生産の回復に向けて—, 2007
- 6) 一瀬諭, 古田世子, 原良平：琵琶湖における植物プランクトンの長期変動と難分解性有機物を考慮した水質汚濁メカニズムの解明について, 第35回環境保全・公害防止研究発表会講演要旨集, p.51, 2008
- 7) 福島武彦, 天野耕二, 村岡浩彌：湖沼水質の簡易な予測モデル2. 湖水栄養塩濃度と内部生産 COD, クロロフィル a との関係, 水質汚濁研究, **9(12)**, 775-785, 1983