

## 兎島湖流域の内部生産 (6)

—植物プランクトンの増殖—

藤田和男 (水質第一科)

【調査研究】

## 児島湖流域の内部生産 (6)

—植物プランクトンの増殖—

### Internal Production in Lake Kojima (6)

—Growth of Phytoplankton—

藤田和男 (水質第一科)

Kazuo Fujita

#### 要 旨

児島湖流入河川下流域での植物プランクトン増殖の特性を解明するため、児島湖湖心および主な流入河川である笹ヶ瀬川および倉敷川において、1999年から2008年にかけて調査を行った。得られた結果から、児島湖での優占種である珪藻綱(*Cyclotella meneghiniana*および*Melosira italica*)の増殖を現す数学モデルを作成した。モデルから計算されたP-CODとクロロフィルaの関係は、実際の測定値を再現していた。測定値および計算値においてP-CODとクロロフィルaの関係は対数的な曲線で現されるが、この理由は、湖内でクロロフィルaが指数的、P-CODが直線的な増加を示すことに起因していた。得られた結果から、植物プランクトン増殖を再現するシミュレーション計算を行った。計算値は概ね実測値と一致した傾向を示しており、季節的な変化も再現されていた。

[キーワード：植物プランクトン、児島湖、珪藻綱]

[Key words : Phytoplankton, Lake Kojima, Bacillariophyceae]

#### 1 はじめに

近年、湖沼等の閉鎖性水域で、水中の懸濁物質による汚濁が問題となっている。これは湖水を濁らせ(透明度の低下)、CODを上昇させ、また沈降し底泥として堆積し、栄養塩が再溶出することにより植物プランクトンが増殖し、水域の汚濁が進行する。このように懸濁物質は水域の汚濁の主要な要因と位置づけられる。懸濁物質の最も大きな原因は水域で増殖した植物プランクトンと考えられる<sup>1)</sup>。

水域で増殖した植物プランクトンはCODを増加させることから、水質浄化対策を行う場合、植物プランクトンの発生特性を把握しておくことは重要である。

児島湖について、これまでの報告<sup>1)</sup>において、懸濁態COD(以下P-CODとする)のほとんどが植物プランクトンの増殖に由来するものであること、細胞の増殖によるクロロフィルa(以下「Chl.a」という)の増加に伴ってP-COD/Chl.a比が減少することが明らかになった<sup>2)</sup>。また水の濁りに関するSS、強熱減量(IL)、Chl.a、懸濁態COD(P-COD)、懸濁態TOC(POC)と、植物プランクト

ンに吸収された窒素・リンである懸濁態窒素(以下P-N)および懸濁態リン(以下P-P)がほぼ直線的な関係にあることがわかり<sup>3)</sup>、得られた結果を用いて湖内の水質シミュレーション計算を行い、湖内のCOD、T-N(全窒素)およびT-P(全リン)についての計算結果は概ね実測値と一致していた<sup>4)</sup>。

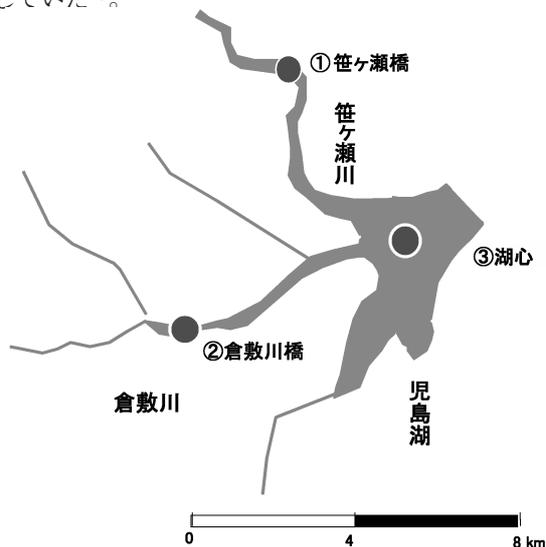


図1 調査地点

これまでに他機関等で行われてきたシミュレーション計算では、植物プランクトンを示す変数として、植物プランクトン細胞数ではなくChlaを用いている<sup>5)</sup>。ここでは、植物プランクトン細胞体積及び細胞数を目的変数とする数学モデルを構築し、湖内の要因(植物プランクトンの増殖、死滅および沈降、水温、日射、栄養塩、平均滞留時間)を含んだシミュレーション計算を行った。

## 2 材料および方法

調査地点は、図1に示すように、児島湖への二大流入河川である笹ヶ瀬川(①笹ヶ瀬橋)および倉敷川(②倉敷川橋)そして児島湖(③湖心)の3地点である。

1999年4月～2001年3月までは年に12回、2001年4月～2002年3月までは年に4回、2002年4月～2003年3月までは年に2回、2003年4月～2008年3月までは年に12回採水を行った。

Chlaについては吸光光度法<sup>6)</sup>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0.1(mL)採取し、顕微鏡(オリンパス製BH-2)で検鏡・計数した。

植物プランクトン細胞の比増殖速度( $\mu$ )については、従来の文献でのシミュレーションモデル<sup>5)</sup>に準じ、以下の式で現した。

$$\mu = \mu_{\max} \times (\text{窒素因子}) \times (\text{リン因子}) \times (\text{光因子}) \times (\text{温度因子})$$

$$= \mu_{\max} \left( \frac{N_d}{K_N + N_d} \right) \cdot \left( \frac{P_d}{K_P + P_d} \right) \cdot \left( \frac{E}{K_E + E} \right) \cdot \left( \frac{T}{T_s} \cdot \exp \left( \frac{T_s - T}{T_s} \right) \right)^3 \quad (1)$$

ここで、 $\mu$  : 比増殖速度(1/day),  $\mu_{\max}$  : 最大比増殖速度[0.35] (1/day),  $N_d$  : 無機態窒素(mg/L),  $K_N$  : 窒素半飽和定数[0.3] (mg/L),  $P_d$  : 無機態リン(mg/L),  $K_P$  : リン半飽和定数[0.02] (mg/L),  $E$  : 日射量(cal/cm<sup>2</sup>/day),  $K_E$  : 日射量半飽和定数[100] (cal/cm<sup>2</sup>/day),  $T_s$  : 増殖に最適な水温[12] (°C) ([ ] 内は定数值)である。

また、湖内での増加は、

$$\frac{dC}{dt} = (\text{流入}) + (\text{増殖} - \text{死滅} - \text{沈降}) - (\text{流出})$$

$$= \left( \frac{C_{in}}{\tau} \right) + C \left( \mu - K_d - K_T - \frac{K_s}{H} \right) - \left( \frac{C}{\tau} \right) \quad (2)$$

$$K_T = \theta^{T-12}$$

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),  $K_d$  : 植物プランクトン死滅速度[0.03] (1/day),  $K_T$  : 水温に

関する影響因子(-),  $\theta$  : 水温に係る定数[1.04] (-),  $K_s$  : 植物プランクトン沈降速度[0.03] (m/day), H : 水深(m),  $\tau$  : 平均滞留時間(day) ([ ]内は定数值)<sup>5)</sup>である。

流入水の植物プランクトン細胞数( $C_{in}$ )については、2大流入河川である笹ヶ瀬川および倉敷川からの流入水量が児島湖全体の流入水量の84%(平成10年度から16年度の平均値)<sup>7)</sup>を占めることから、湖内へ流入する植物プランクトン細胞数を、次式により推算した。

$$C_{in} = \frac{C_m(S) \times L(S) + C_m(K) \times L(K)}{L(S) + L(K)} \quad (3)$$

ここで、 $C_{in}(S)$  : 笹ヶ瀬橋の植物プランクトン細胞数(mg/L),  $L(S)$  : 笹ヶ瀬川流量(m<sup>3</sup>/s),  $C_m(K)$  : 倉敷川橋の植物プランクトン細胞数(mg/L),  $L(K)$  : 倉敷川流量(m<sup>3</sup>/s)である。

流入水量(文献値)<sup>7)</sup>および植物プランクトン細胞数(実測値)は、月毎のデータを使用し、1ボックス1層モデル(図2)を想定したシミュレーション計算を月毎に行った。計算における時間ステップは24時間とした。

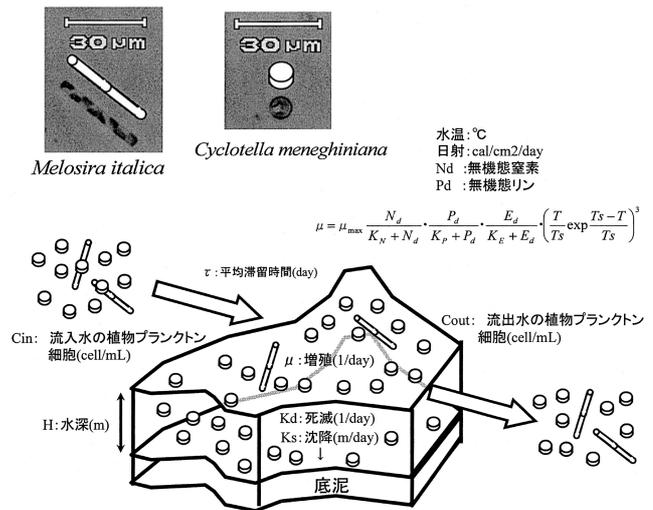


図2 概念図

## 3 結果および考察

### 3.1 シミュレーション計算

#### 3.1.1 増殖モデル

得られた結果を解析し、児島湖での植物プランクトン細胞の増殖を現す計算モデルの構築を試みた。

初期条件について、プランクトン細胞として、児島湖の主な優占種である珪藻 *Cyclotella meneghiniana* を選

定し、1細胞の体積( $V_{cell}$ )の初期値は $1.0 \times 10^{-6}$  ( $mm^3$ )とし、得られたデータから、初期値にあたる細胞(増殖期)では、植物プランクトン細胞数3,000 (cells/mL)でP-CODが1 (mg/L)、すなわち細胞3,000個がP-COD 1(mg)に相当するとした。なおこの比率については、後述するように植物プランクトン細胞数の増加が指数的、P-CODの増加が直線的であることから、1細胞あたりのP-CODは時間の経過とともに低下していくとした。また、初期値では植物プランクトン細胞数3,000 (cells/mL)がChl.a 10 ( $\mu g/L$ )に相当(300,000細胞が $1\mu g$ のChl.aを含有)するとし、この比率、すなわち1細胞に含まれるChl.aは、時間の経過に対して一定であり、植物プランクトン細胞の大きさが変化しても変わらない<sup>8)</sup>とした。

植物プランクトン細胞数について、細胞の分裂速度は $\mu = 0.12$  (1/day)すなわち6日でChl.aが倍増し、細胞が2分裂する、とした(温度: 18℃, I-N: 1.2 mg/L,  $PO_4-P$ : 0.07 mg/Lおよび日射:  $314 cal/cm^2/day$ の定常状態を設定、いずれも期間中の測定値の平均値から設定)。植物プランクトン細胞個数は以下の式で現されるとした。

$$C = \text{初期細胞数} \times \text{分裂回数} \\ = C_0 \times 2^{\frac{t}{a}}$$

ここで、 $C_0$ : 初期植物プランクトン細胞数(cells/mL),  $a$ : 植物プランクトン細胞が2分裂するのに要する時間[6.0] (day),  $t$ : 時間(day) ([ ]内は定数值)である。

Chl.aについて、*Cyclotella meneghiniana*の1細胞あたりに含まれるChl.a含有量は、室内実験では細胞の大小によらず一定であることが報告されており<sup>10)</sup>、ここで植物プランクトン細胞数(cells/mL)とChl.a(mg/L)の比が一定とし、1細胞あたりのChl.a含有量を $3.3 \times 10^{-6}$  ( $\mu g/cell$ )とした。

細胞体積について、植物プランクトンの存在する水系では、単位面積あたりに入射する光の量が一定であることから、光合成による総細胞体積増加速度 $G_{V_{cell}}$ を一定値( $0.5 mm^3/L/day$ )とした。

$$G_{V_{cell}} = \frac{\text{総細胞体積の増加量}}{\text{時間}} = \frac{\Delta \Sigma V_{cell}}{\Delta t}$$

P-CODについて、総細胞体積 $\Sigma V_{cell}$  ( $mm^3$ )とP-COD(mg/L)の比は一定とし、植物プランクトン細胞3 ( $mm^3$ )でP-CODが1(mg)とした。

図3に、上記モデルに基づく細胞分裂の概念図を示す。細胞の分裂に伴い、細胞個数(cells/mL)は指数的( $2^n$ )に増加するため、植物プランクトン細胞数(cells/mL)は指数的に増加する(図中では個数で示される)。またChl.aは1細胞あたりの含有量が一定<sup>8)</sup>であるため、指数的に増加する(図中では個数で示される)。

一方全体の体積 $\Sigma V_{cell}$ (図中では植物プランクトン細胞体積の総和で示される)は直線的に増加するため、P-CODは細胞体積に比例して直線的に増加する。

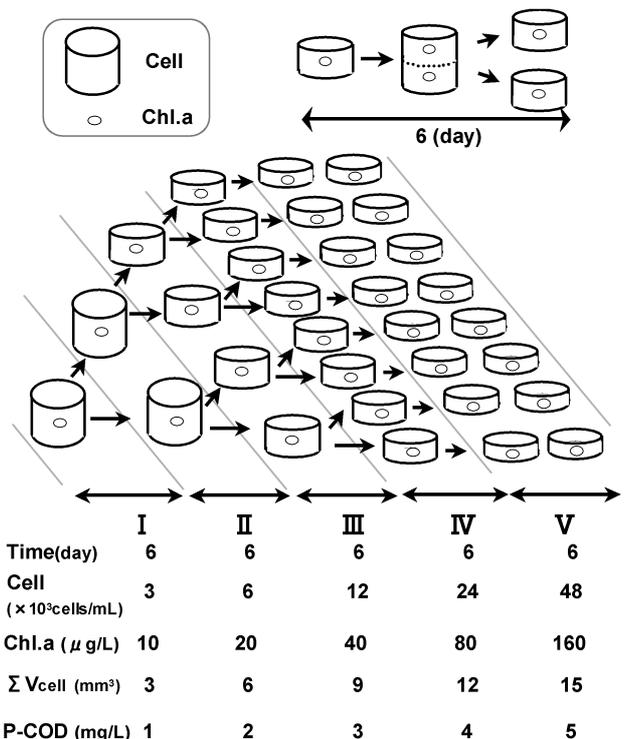


図3 植物プランクトン細胞増殖モデル  
 $\Sigma V_{cell}$  ( $mm^3$ ): 細胞体積の総和

シミュレーション計算結果を図4(a)に示す。計算上、栄養塩等は上述の定常状態を設定しており、P-CODは直線的に増加し、植物プランクトン細胞数およびChl.aは6日で倍増すなわち指数的に増加した。

図4(b)にChl.aとP-CODの関係を示す。横軸をChl.a、縦軸をP-CODとしたとき、Chl.aの増加に対し、P-CODの増加は対数的な曲線となっている。

この計算結果に、実際の測定値(笹ヶ瀬川の2地点で22日間連続測定)<sup>2)</sup>を重ねてプロットしたものを示す(図4(c))。計算値と測定値は高い相関を示した。

同様にして、横軸にChl.a、縦軸をChl.a/P-COD比とし、実測値を重ねてプロットしたものを示す(図4(d))。

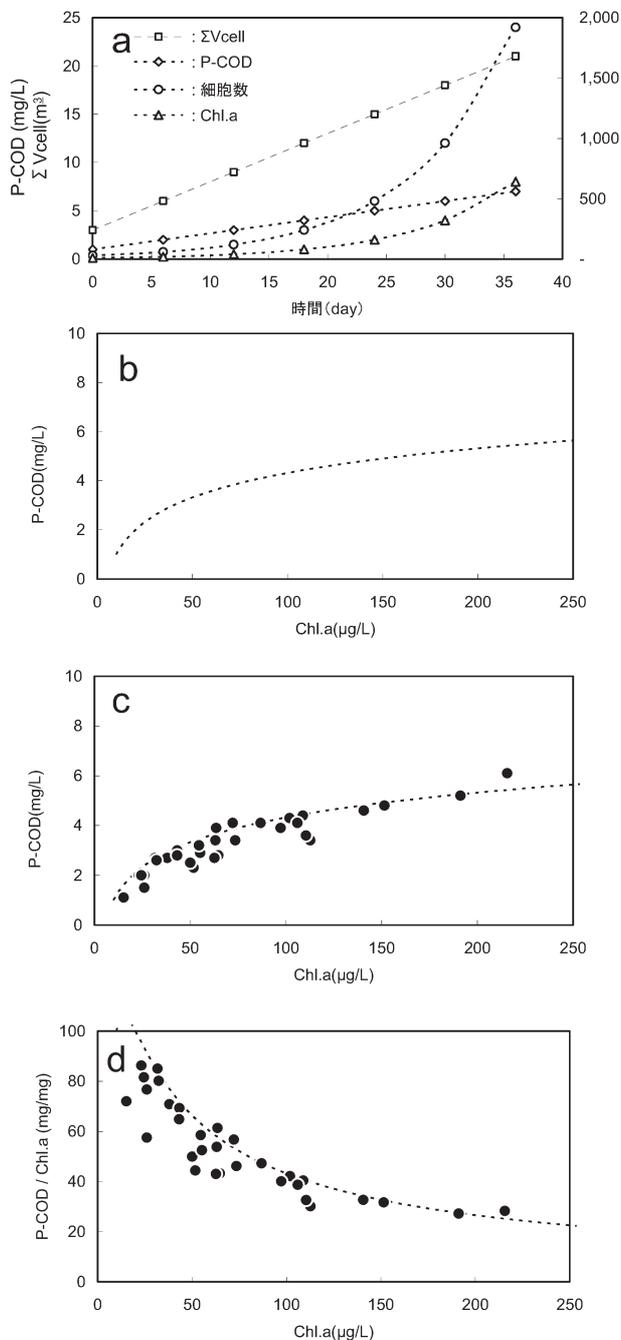


図4 モデル計算結果および実測値との比較

- a 計算値  
 -□- :  $\Sigma V_{cell}$  (細胞体積の総和),  
 -◇- : P-COD, -○- : 細胞数, -△- : Chl.a
- b 計算値 (P-COD)
- c 計算値と実測値の比較 (P-COD)  
 --- : 計算値  
 ● : 実測値
- d 計算値と実測値の比較 (P-COD/Chl.a)  
 --- : 計算値  
 ● : 実測値

Chl.aの増加に対して、Chl.a/P-COD比は指数的に減少してゆく。

これらの結果から、ここで設定したモデルは植物プランクトン細胞のP-CODとChl.aの関係を再現していた。このことから、実際の測定データでP-CODがChl.aに対して対数的な曲線で現される理由は、Chl.aが細胞個数と同様に指数的に増加する一方、細胞体積の総和は直線的に増加し、細胞体積と一定の比率にあるP-CODが直線的に増加するためであることが分かった。

### 3.1.2 現況再現計算

児島湖の植物プランクトン増殖の再現シミュレーション計算を行った。想定した期間は、現時点で流入河川および湖心の3地点の植物プランクトン細胞数および平均滞留時間のデータが全て既知または入手可能である1999年～2001年とした。

植物プランクトン細胞の増殖を示す最大比増殖速度( $\mu_{max}$ )の値について、これまでに他機関等で行われてきたシミュレーション計算<sup>6)</sup>では、いずれも植物プランクトンを示す値として、植物プランクトン細胞数ではなくChl.aを用いており、最大比増殖速度( $\mu_{max}$ )として0.35(1/day)を用いている。今回のシミュレーションでも*Cyclotella meneghiniana*および*Melosira italica*について、いずれの種についても、 $\mu_{max}$ を0.35(1/day)として計算した。

実測値および(2)式から得られた計算値を図5に示す。また、平均滞留時間 $\tau$ (day)(実測値)<sup>7)</sup>をあわせて示す。

冬期間(10月～1月)に、水温が低いにも関わらず、実測値および計算値は高い値を示しているが、この主な要因は、計算上は平均滞留時間が長いことによる。2月には実測値および計算値とも低下するが、これは低温による影響を表しており、特に*Cyclotella meneghiniana*と比較して*Melosira italica*の減少が著しかった。

計算値について、*Melosira italica*では実測値と概ね似たような傾向を示していたが、*Cyclotella meneghiniana*では計算値は実測値と比較して、冬期には高く、夏期には低い値であった。この理由として、(2)式では表現されていない因子や要因の可能性が考えられる。

### 3.2 優占種および季節変化

植物プランクトンの優占種は珪藻綱(*Cyclotella meneghiniana*および*Melosira italica*)であり、各月ともこの2種で、全植物プランクトン細胞数の9割以上を占めていた。

この2種類について、各年度(1999～'03年および'05

～'08年)の計数値を月毎に平均し、年度の推移を示したものを図6(a)に示す。3～5月を春期、6～8月を夏期、9～11月を秋期、12～2月を冬期とすると、植物プランクトン細胞数は、夏期に減少してゆき、秋期に増加し、冬期～春期の間は一定の高い値で推移する傾向があった。湖水の平均滞留時間 $\tau$ (図6(b))と比較すると、夏期では平均滞留時間が小さく(希釈率が高く)植物プランクトン細胞数が減少してゆくことから、主に流入水による希釈の影響、秋期では平均滞留時間および植物プランクトン細胞数が増加してゆくことから、植物プランクトン細胞の増殖、冬期に水温が低いにもかかわらず植物プランクトン細胞数が多いのは、増殖速度が遅くても平均滞留時間が長いため、植物プランクトンが蓄積されるためと考えられた。

#### 4 まとめ

- 1) 児島湖での優占種である *Cyclotella meneghiniana* および *Melosira italica* の増殖を現す数学モデルを作成した。モデルから計算されたChl.aとP-CODの関係は、実際の測定値を再現した。Chl.aとP-CODが対数的な曲線で現される理由は、細胞個数が指数的に増加し、これに伴い1細胞あたりの含有量が一定であるChl.aが指数的に増加し、一方、細胞体積の総和は直線的に増加し、細胞体積と一定の比率にあるP-CODが直線的に増加するためであることが分かった。
- 2) 植物プランクトン計数結果をモデル式に当てはめ、1999～2001年度における現況再現計算を行った。計算値は概ね実測値と一致した傾向を示していたが、*Cyclotella meneghiniana* は冬期間に計算値が実測値よりも低かった。冬期間(10月～1月)に、水

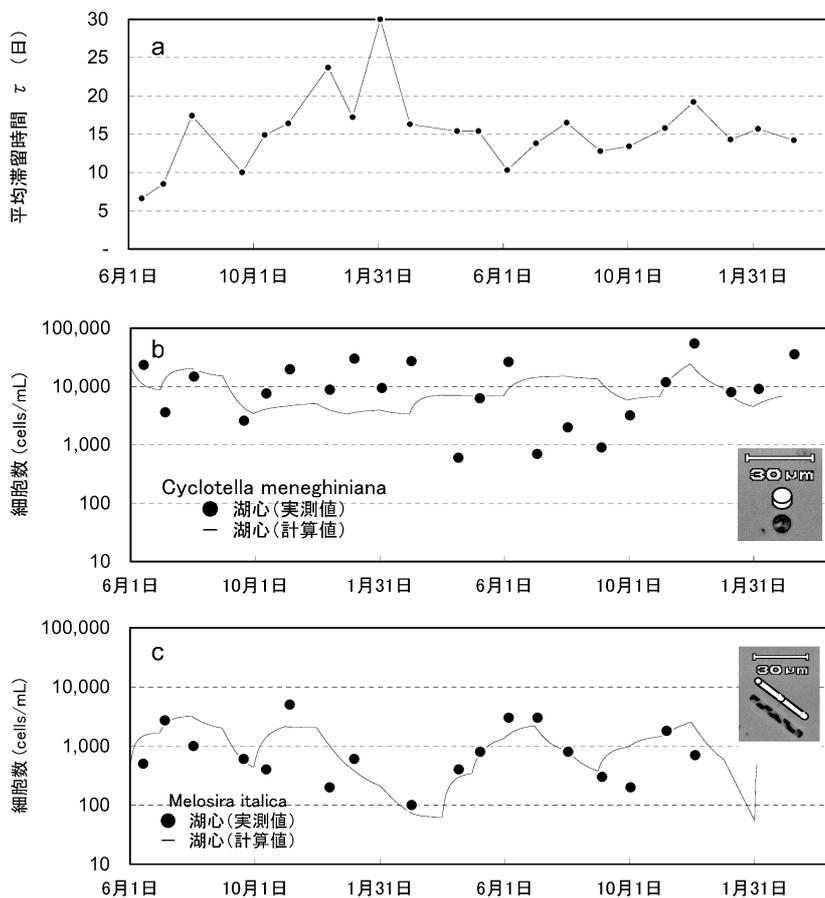


図5 現況再現シュミレーション計算  
 a 平均滞留時間(実測値)  
 b 実測値及び計算結果(*Cyclotella meneghiniana*)  
 c 実測値及び計算結果(*Melosira italica*)

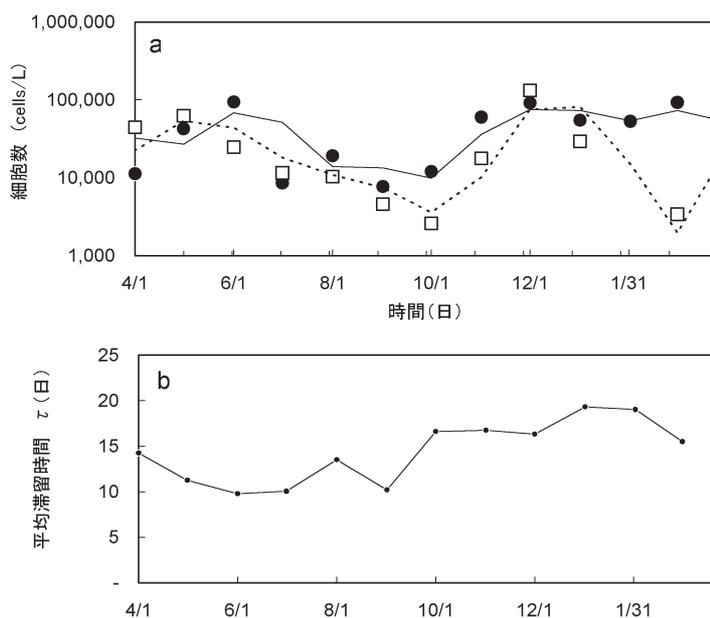


図6 植物プランクトン細胞数の季節変化  
 a 細胞数  
 ● *Cyclotella Meneghiniana*  
 □ *Melosira italica*  
 b 平均滞留時間

温が低いにも関わらず、植物プランクトン細胞数が高い値である主な要因は平均滞留時間が長いことであることが分かった。

## 文 献

- 1) 藤田和男, 鷹野洋, 吉岡敏行, 山本弘捷: 児島湖流域の内部生産, 岡山県環境保健センター年報, 25, 7-9, 2000
- 2) 藤田和男, 山本 淳, 伊東清実, 道広憲秀, 山本弘捷等: 児島湖下流域の内部生産(3)—植物プランクトンのP-COD/クロロフィルa比—, 岡山県環境保健センター年報, 27, 19~21, 2003
- 3) 藤田和男, 山本 淳, 小野 質, 北村雅美, 斎藤直己: 児島湖下流域の内部生産(4)—植物プランクトンのP-CODおよび窒素・リン—, 岡山県環境保健センター年報, 28, 13-16, 2004
- 4) 藤田和男, 北村雅美, 斎藤直己: 児島湖下流域の内部生産(5)—植物プランクトンのP-COD, クロロフィルaおよび窒素・リン—, 岡山県環境保健センター年報, 29, 27-31, 2005
- 5) 岡山県, (株)ウェスコ: 平成3年度児島湖水質保全計画基礎調査業務報告書, 83, 1992
- 6) 西澤一俊, 千原光雄編: 藻類研究法, 398, 共立出版, 東京, 1979
- 7) 岡山県: 児島湖ハンドブック, 7, 2006
- 8) Erik G. Jorgensen: Chlorophyll Content and Rate of Photosynthesis in Relation to Cell Size of the Diatom *Cyclotella meneghiniana*, *Physiologia Plantarum*, 17, 407-413, 1964