

兎島湖におけるクロロフィルaおよびCODと
栄養塩(窒素・リン)の関係

藤田和男, 鷹野 洋, 坂本祐基, 板谷 勉, 宮崎 清 (水質第一科)

【調査研究】

児島湖におけるクロロフィルaおよびCODと 栄養塩(窒素・リン)の関係

Relation between Chlorophyll a, COD and Nutrients (Nitrogen and Phosphorous) in Lake Kojima

藤田和男, 鷹野 洋, 坂本祐基, 板谷 勉, 宮崎 清 (水質第一科)

Kazuo Fujita, Hiroshi Takano, Yuuki Sakamoto, Tsutomu Itadani, Kiyoshi Miyazaki

要 旨

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、クロロフィルaおよびCODと窒素・リンの関係について、2006年4月から2008年3月にかけて追跡調査を行った。水質調査結果をモデル式に当てはめ、2006年度の現況再現計算を行った。COD, SSおよび全リンについては、計算結果は実測値と概ね一致していた。しかしクロロフィルaは春期および冬期での高い値が、無機態窒素は冬期の高い値が再現されなかった。

[キーワード：クロロフィルa, COD, 窒素, リン, 児島湖]

[Key words : Chlorophyll a, COD, Nitrogen, Phosphorus, Lake Kojima]

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CODを上昇させるだけでなく、湖水を濁らせる(透明度の低下)。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ている。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ており¹⁾、水質浄化対策を行う場合、SS, COD, 植物プランクトン, クロロフィルa, 栄養塩(窒素・リン)の関係を把握し、汚濁の発生特性を知ることが重要である。

これまでの報告¹⁾において、児島湖への二大流入河川である笹ヶ瀬川, 倉敷川の下流域において著しい内部生産が発生していることを指摘するとともに、懸濁態COD(以下P-CODとする)のほとんどが内部生産そのものであること、細胞の増殖によるクロロフィルa(以下Chl.aとする)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²⁾。また水の濁りに関する測定項目である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³⁾、こ

こで得られた結果及び、湖内の要因(平均滞留時間, 水温, 日射, 植物プランクトンの増殖, 懸濁態物質の沈降等)を併せて検討し現況再現のためのシミュレーション計算を行った⁴⁾。

本報では最近の3年分のデータを追加し、児島湖のChl.aおよびCODと、栄養塩(窒素・リン)の関係について検討し、最新のデータを用いたシミュレーション計算を行った。

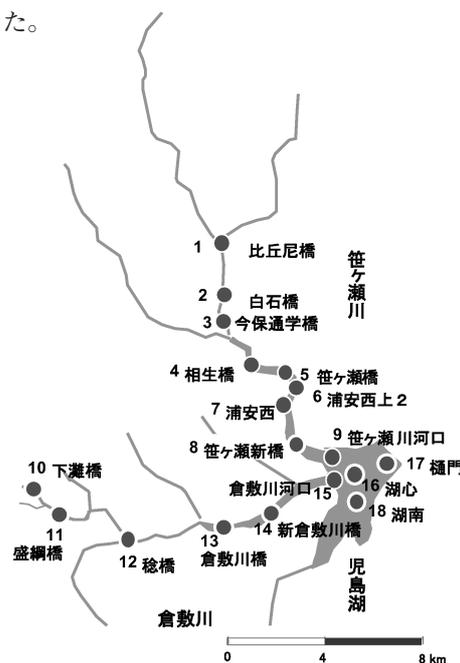


図1 調査地点

2 材料および方法

2.1 調査地点

調査地点は、図1に示すように、笹ヶ瀬川については、①比丘尼橋、②白石橋、③今保通学橋、④相生橋、⑤笹ヶ瀬橋、⑥浦安西上2、⑦浦安西、⑧笹ヶ瀬新橋、⑨笹ヶ瀬川河口の9地点、倉敷川については、⑩下灘橋、⑪盛綱橋、⑫稔橋、⑬倉敷川橋、⑭新倉敷川橋、⑮倉敷川河口の6地点、児島湖については、⑯湖心、⑰樋門、⑱湖南の3地点である。

採水回数については、1997年4月～1999年3月までは地点②～⑤および⑧～⑱で年に12回、1999年4月～2001年3月までは地点①～②、④～⑤および⑧～⑱で年に12回、2001年4月～2002年3月までは地点④～⑤、⑦～⑨、⑫および⑭～⑱で年に4回、2002年4月～2003年3月までは地点④～⑨で年に4回、2003年4月～2005年3月までは地点④～⑧および⑱で年に4回採水を行った⁴⁾。

本報で新たに、2006年4月～2009年3月の3年間で、地点⑨および⑮～⑱で年に12回採水・測定を行い、これまでの結果と併せて解析を行った。

2.2 測定方法

測定項目のうち、COD、全窒素(T-N)、全リン(T-P)、SS、IL、TOC、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-Pは工場排水試験法K0102⁵⁾に準じて、またChl.aについては吸光度法⁶⁾により測定した。なお、サンプルを濾紙(Whatman, GF/C)により濾過し、濾液のCODを溶存態COD(D-COD)とし、CODからD-CODを差し引いた値を懸濁態COD(P-COD)とした。懸濁態有機炭素(POC)、懸濁態窒素(P-N)および懸濁態リン(P-P)についてもP-CODと同様に濾液との差から懸濁態の値を求めた。

2.3 水質予測モデル

水質モデルについて、概念図を図2に示す。水質モデルおよび式は児島湖水質保全計画⁷⁾等で用いられているものである。植物プランクトンの増殖はChl.aで表すこととし、以下の式⁷⁾により計算した。

$$\begin{aligned} \frac{dChl.a}{dt} &= (\text{流入}) + (\text{増殖}) - (\text{死滅}) - (\text{沈降}) - (\text{流出}) \\ &= \left(\frac{Chl.a_{in}}{\tau} \right) + (\mu \cdot Chl.a) - (k_d \cdot K_T \cdot Chl.a) - \left(\frac{k_{sPL}}{H} \cdot Chl.a \right) - \left(\frac{Chl.a}{\tau} \right) \end{aligned}$$

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

ここで、Chl.a：クロロフィルa(mg/L)、Chl.a_{in}：流

入水のクロロフィルa(mg/L)、 μ ：比増殖速度(1/day)、 k_d ：死滅速度(1/day)、 K_T ：水温に関する影響因子(-)、 θ ：水温に係る定数1.04(-)、 T ：水温(°C)、 k_{sPL} ：植物プランクトン沈降速度(m/day)、 H ：水深(m)、 τ ：平均滞留時間(day)である。また植物プランクトンの死滅により生ずる有機物の沈降速度は、 k_s ：有機物沈降速度(m/day)であらわされる。

式中の μ (比増殖速度)は以下の式⁷⁾で示される。

$$\begin{aligned} \mu &= \text{最大比増殖速度} \times (\text{窒素因子}) \times (\text{リン因子}) \times (\text{光因子}) \times (\text{温度因子}) \\ &= \mu_{\max} \left(\frac{N_d}{K_N + N_d} \right) \cdot \left(\frac{P_d}{K_P + P_d} \right) \cdot \left(\frac{E}{K_E + E} \right) \cdot \left(\frac{T}{T_S} \cdot \exp \left(\frac{T_S - T}{T_S} \right) \right)^3 \end{aligned}$$

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)、 E ：日射量(cal/cm²/day)、 K_E ：日射量半飽和定数(cal/cm²/day)、 T_S ：増殖に最適な水温(°C)である。

窒素については、以下の式⁷⁾で示される。

$$(\text{全窒素}) = (\text{懸濁態窒素}) + (\text{溶存態窒素})$$

$$= (\text{植物プランクトン態窒素}) + (\text{有機態窒素}) + (\text{無機態窒素})$$

$$\frac{d(T-N)}{dt} = \frac{d(A-N)}{dt} + \frac{d(O-N)}{dt} + \frac{d(D-N)}{dt}$$

$$(\text{植物プランクトン態窒素}) = (\text{クロロフィルa}) \times (\text{換算係数})$$

$$\frac{d(A-N)}{dt} = \xi_N \cdot \frac{d(Chl.a)}{dt}$$

$$(\text{有機態窒素}) = (\text{流入}) + (\text{植物プランクトンの死滅}) - (\text{沈降}) - (\text{流出})$$

$$\frac{d(O-N)}{dt} = \left(\frac{O-N_{in}}{\tau} \right) + (\xi_N \cdot k_d \cdot K_{TW} \cdot Chl.a) - \left(\xi_N \cdot \frac{k_L}{H} \cdot Chl.a \right) - \left(\xi_N \cdot \frac{O-N}{\tau} \right)$$

$$(\text{無機態窒素}) = (\text{流入}) - (\text{植物プランクトンによる吸収}) + (\text{溶出}) - (\text{流出})$$

$$\frac{d(D-N)}{dt} = \left(\frac{I-N_{in}}{\tau} \right) - (\xi_N \cdot G_F \cdot Chl.a) + \left(\frac{D_N}{H} \right) - \left(\frac{I-N}{\tau} \right)$$

ここで、T-N：全窒素(mg/L)、D-N：溶存態窒素(mg/L)、A-N：植物プランクトン態窒素(mg/L)、O-N：有機態窒素(植物プランクトンの死滅によって生ずる)(mg/L)、I-N：無機態窒素(NO₃-N + NO₂-N + NH₄-N)(mg/L)

/L), I-N_{in} : 流入水の無機態窒素 (mg/L), ξ_N : 植物プランクトンと窒素の換算係数(-), k_{SN} : 有機態窒素沈降速度 (m/day), f_N : 有機態窒素分解速度 (1/day), D_N : 湖底からのI-N溶出速度 (g/m²/day)である。なお, P-N (懸濁態窒素)は, A-NとO-Nの合計値である。

また, リンについては窒素と同様に,

$$\frac{d(T-P)}{dt} = \frac{d(A-P)}{dt} + \frac{d(O-P)}{dt} + \frac{d(D-P)}{dt}$$

$$\frac{d(A-P)}{dt} = \xi_P \cdot \frac{d(Chl.a)}{dt}$$

$$\frac{d(O-P)}{dt} = \frac{O-P_m}{\tau} + \xi_P \cdot k_d \cdot K_{TW} \cdot Chl.a - \xi_P \cdot \frac{k_L}{H} \cdot Chl.a - \xi_P \cdot \frac{O-P}{\tau}$$

$$\frac{d(D-P)}{dt} = \frac{I-P_m}{\tau} - \xi_P \cdot G_P \cdot Chl.a + f_P \cdot K_{TW} \cdot (O-P) + \frac{D_P}{H} - \frac{I-P}{\tau}$$

ここで, T-P : 全リン (mg/L), P-P : 懸濁態リン (mg/L), D-P : 溶存態リン (mg/L), A-P : 植物プランクトン態リン (mg/L), O-P : 有機態リン (植物プランクトンの死滅によって生ずる) (mg/L), I-P : 無機態リン (PO₄-P) (mg/L), I-P_{in} : 流入水の無機態リン (mg/L), ξ_P : 植物プランクトンとリンの換算係数(-), k_{SP} : 有機態リン沈降速度 (m/day), f_P : 有機態リン分解速度 (1/day), D_P : 湖底からのI-P溶出速度 (g/m²/day)である。P-P (懸濁態リン)は, A-PとO-Pの合計値である。

モデル式中の各項目 (P-N, P-P, Chl.a および P-COD) 間の関係式について, 実測値 (1997~2004年) から得られた関係式³⁾を用いた (図2)。D-CODについては実測値 (1997~2004年) から得られた次の関係式で求めた。

$$D-COD(mg/L) = 11 \times Chl.a(mg/L) + 4.64$$

また, 透明度, SS (懸濁物質) および IL (強熱減量) は下記の関係式で求めた。

$$Tr = \frac{49}{Chl.a + 38}$$

$$SS = 0.25 \times Chl.a + 11$$

$$IL = 0.082 \times Chl.a + 4.1$$

ここで, Tr : 透明度 (m), SS : 懸濁物質 (mg/L), IL :

強熱減量 (mg/L) である。

シミュレーション計算において, 計算式中の定数値はおもに報告値⁷⁾等に従っており, これらを図2中に示す。その他, 湖の平均滞留時間⁸⁾, 窒素・リンの負荷量の計算には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⁸⁾, 日射量 (日本気象協会) を用いた。

シミュレーション計算において, 計算開始時 (2006年4月1日) は, 初期値として湖内および流入水の各項目 (Chl.a, T-N, I-N (NO₃-N + NO₂-N + NH₄-N), T-P, PO₄-P) を実測値から, 流入水量を文献値⁸⁾から設定したが, その後は月毎に流入水の各項目 (Chl.a, T-N, I-N (NO₃-N + NO₂-N + NH₄-N), T-P, PO₄-P) および流入水量のみを実測値から設定した。

流入水中の無機態窒素・リンおよびChl.aは月毎に (その月の1日から次の月まで) 一定とした。

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⁸⁾) とその殆どを占めることから, 以下の式で計算された値を流入水の水質とし, 月毎に計算した。

$$x_{in} = \frac{x_{in}(S) \times L(S) + x_{in}(K) \times L(K)}{L(S) + L(K)}$$

ここで, x_{in} : 各項目 (Chl.a, COD, T-N, I-N, T-P, PO₄-P) の流入濃度 (mg/L), x_{in}(S) : 笹ヶ瀬川からのxの流入濃度 (mg/L), x_{in}(K) : 倉敷川からのxの流入濃度 (mg/L), L(S) : 笹ヶ瀬川の流量 (m³/sec), L(K) : 倉敷川の流量 (m³/sec) である。

モデル中の植物プランクトン種 (綱) として珪藻綱を設定し, 最適水温を10℃とした。

3 結果および考察

3.1 懸濁物質と栄養塩の関係

水の濁り・汚濁を示す懸濁態の項目 (透明度, SS, IL, Chl.a, P-COD および POC), および溶存態COD (P-COD) と, 懸濁態栄養塩 (P-N および P-P) との関係を図3に示す。データの各プロットは, 各測定地点の年平均値である。今回 (2006年4月~2009年3月) の追跡調査結果は○で示し, 前回 (1997年4月~2005年3月) までの調査結果は●で示す。2006~2009年の調査結果は全ての項目において原点に近づいており水質改善の効果が認められる。

透明度は水中の懸濁態粒子と光の透過度についてのべ

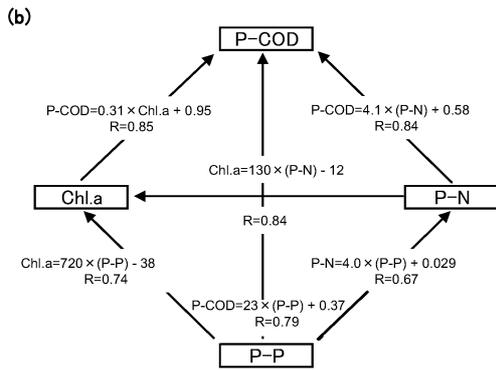
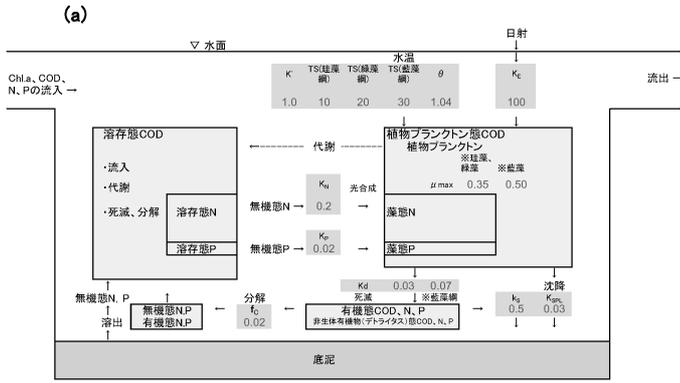


図2 モデル図

(a) : 概念図, (b) : Chl.a, P-COD および P-N, P-P の関係

ールの法則の式 $d = (A / \epsilon) \cdot x^{-1}$ (d : 透明度, A : 吸光度, ϵ : 吸光係数, X : 粒子濃度) の関係により近似された。

懸濁物質を示す項目 (SS, IL, Chl.a, P-COD および POC) と懸濁態栄養塩 (P-N および P-P) の関係については、全て原点近くを通る直線で近似され高い相関があった。また懸濁態栄養塩 (P-N および P-P) は Chl.a と原点近くをとる直線的な関係があった。このことから、懸濁態の項目 (SS 等) は水中の栄養塩 (窒素及びリン) を植物プランクトンが吸収すること、すなわち内部生産の過程により生ずるといえる。

植物プランクトン細胞は河川を流下するのに伴い増殖し、P-N および P-P や Chl.a, P-COD 等の値が増加していくことから、図3の透明度以外のプロットについては、より原点に近い点は兎島湖流入河川上流部の値を示し、原点から離れて P-N および P-P の値が大きい点ほど下流域や湖心の値を示している。

3.2 現況再現シミュレーション

水域のモデル化については、一般に地形が単純で、湖内水質が水平方向に均一である場合は1ボックスモデル、水平方向の水質分布が問題となる場合は数ボックスモデ

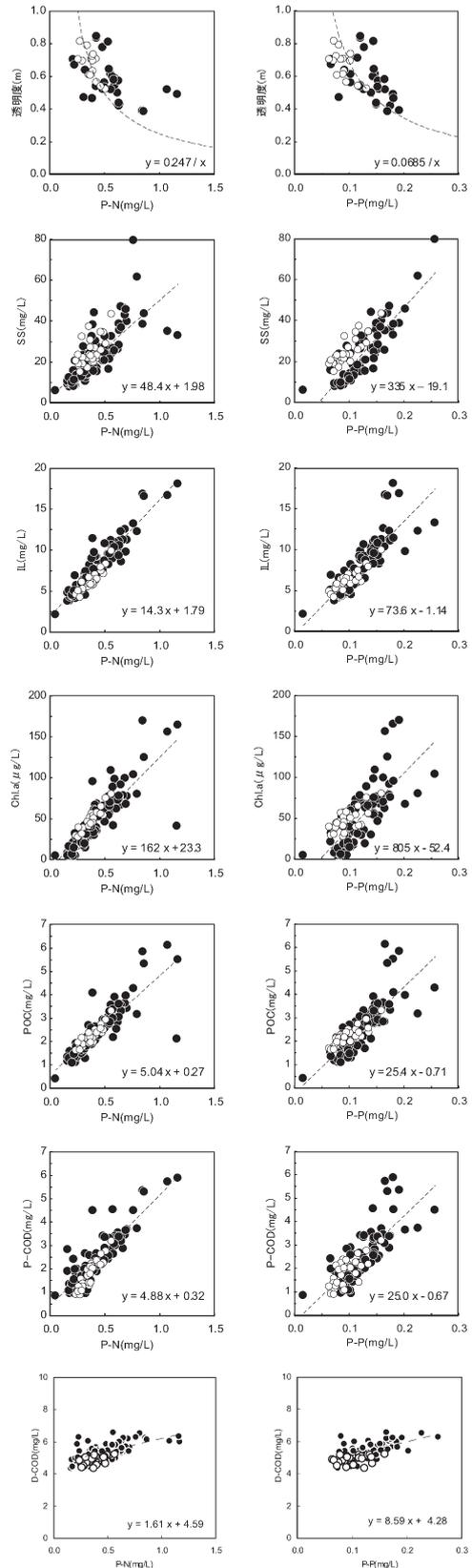


図3 P-N(懸濁態窒素) および P-P(懸濁態リン) と透明度, SS, IL, Chl.a, POC(懸濁態有機炭素), P-COD(懸濁態 COD) および D-COD(溶存態 COD) の関係

○ : 2006年4月～2009年3月
● : 1997年4月～2005年3月

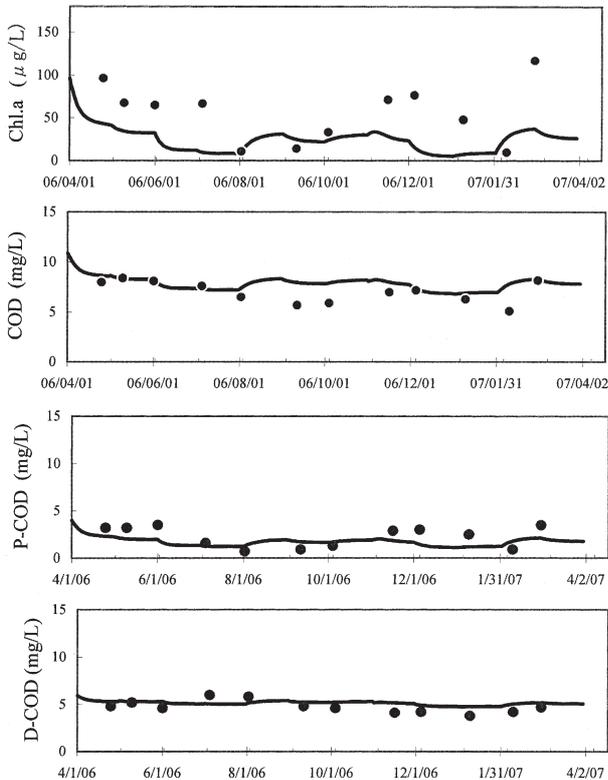


図4 Chl.aおよびCODの実測値および計算結果
●：実測値，—：計算値

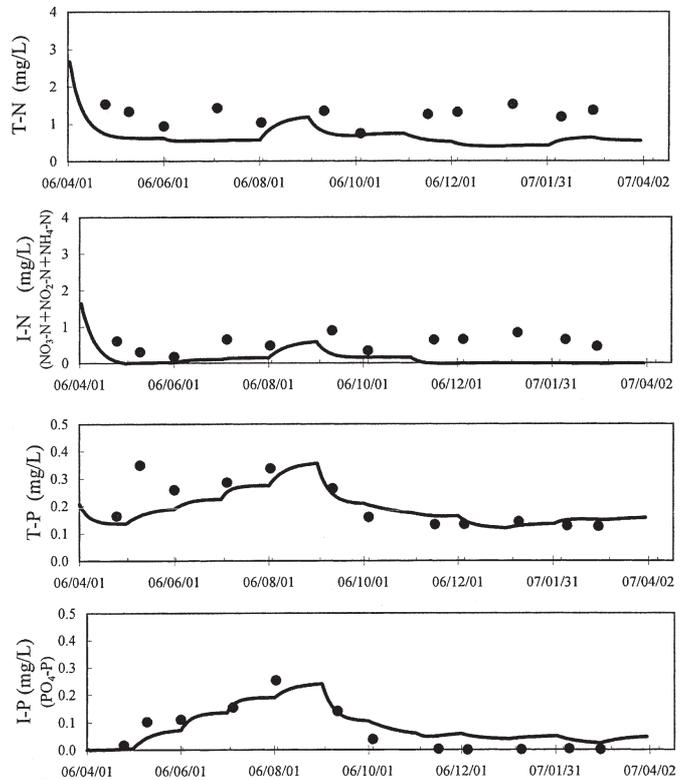


図5 T-N、I-NおよびT-P、I-Pの実測値および計算結果
●：実測値，—：計算値

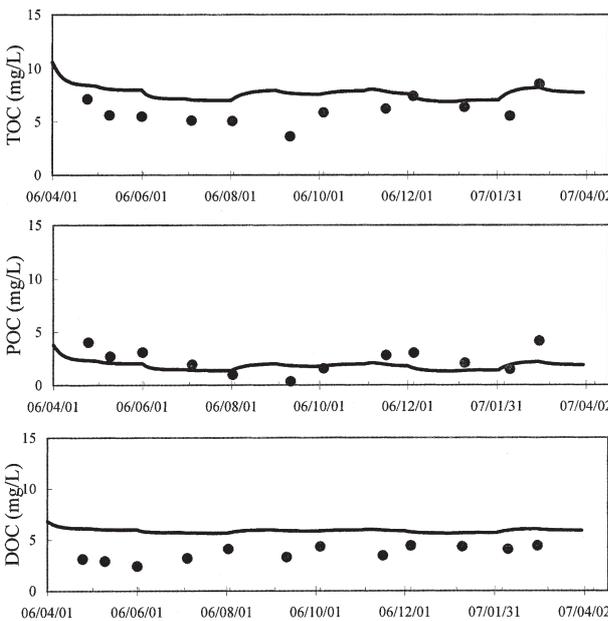


図6 TOC、POCおよびDOCの実測値および計算結果
●：実測値，—：計算値

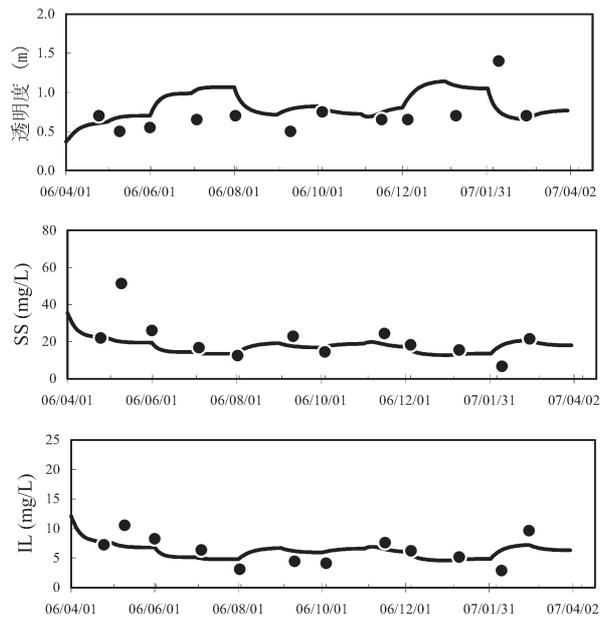


図7 透明度、SSおよびILの計算結果
●：実測値，—：計算値

ルが用いられる。また比較的水深が浅く水質が鉛直方向で均一な湖沼では1層モデル、ダム湖など水深が深く水質を考える上で垂直方向の水質分布が問題となる場合は多層モデルを適用することが多い⁶⁾とされており、児島湖は水深が浅く、ここでは水平方向の分布について検討

しないことから、1ボックス1層モデルを設定した。

湖内の植物プランクトンの増殖については、1日の増殖割合は比増殖速度 μ (1/day)であらわされ、これは湖内の無機態窒素($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$)、無機態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)、水温(実測値)および日射(文献値)から計算

される。

図4に2006年～2007年の湖心でのChl.a, COD, P-CODおよびD-CODの実測値および現況再現計算結果を示す。Chl.aについては、春期および冬期での実測値の高い値が再現できなかった。この時期の高いChl.aについては、PCODやPOCでは実測値との乖離が小さいことから、プランクトン種の変化、植物プランクトン細胞中のChl.a含有量の違いなどを検討する必要があると考えられる。

CODについては、計算結果は実測値と概ね一致していた。

窒素およびリンについて、図5にT-N, I-N, T-PおよびI-P(PO₄-P)の実測値および計算結果を示す。T-Pについては、計算結果は実測値と概ね一致しており、季節的な変化もほぼ再現されていたが、T-Nについては、12月～3月の湖心でのI-Nの増加が再現できなかった。この理由として、水域がこの時期に優占した珪藻(綱)増殖に対しリン制限的³⁾であり無機態窒素が吸収されずに残っていたと思われる。

図6にTOC, POCおよびDOCの実測値および計算結果、また濁りに関する項目として透明度, SSおよびILの実測値および計算結果を図7に示す。TOCおよびPOCの計算結果は実測値とほぼ一致していたが、DOCはやや高く計算されていた。また透明度, SSおよびILの計算結果は実測値と良い一致を示し、植物プランクトンの増殖はSSと比例していると考えられた。

前報⁴⁾と本報の結果を見ると、Chl.aが、99年以降低下する傾向があり、特に夏期のピークが小さくなる傾向があった。99年以前は夏期に藍藻綱(*Microcystis aeruginosa*)が優占し、また春期や秋期に緑藻綱が多くみられ⁹⁾、多種の植物プランクトンが混在していた。99年以降は年間をとおして珪藻綱(*Cyclotella meneghiniana*)が優占してきたが、このことが、前報でChl.aの実測値と計算値の差が大きい原因と考えられる。今後、植物プランクトン種のChl.a含有量を種別・季節別に検討する必要がある。

4 まとめ

水質測定結果をモデル式に当てはめ、2006年度における現況再現計算を行った。COD, TOC, T-P, SSおよびILについての計算結果は概ね実測値と一致しており、季節的な変化も再現され、水質モデルの有効性が確認された。Chl.aでは春期および冬期での高い値が、I-Nでは冬期の高い値が再現されなかった。

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) 平河喜美男編: 工場排水試験法 JIS-K0102, 42-44, 日本規格協会, 東京, 1998
- 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, (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
- 8) 岡山県: 児島湖ハンドブック, 7, 2006
- 9) 村上和仁, 鷹野 洋, 吉岡敏行, 荻野泰夫, 森 忠繁: 児島湖における植物プランクトンの種構成と季節的消長, 水環境学会誌, 22, 9, 770-775, 1999