

木曽川及び長良川河口域における 冬期クロロフィルaの変動機構の解析

DYNAMICS OF WINTER CHLOROPHYLL A IN THE KISO AND NAGARA RIVER ESTUARIES

栗木秀治¹・中村由行²・山崎智弘³

Hideharu KURIKI, Yoshiyuki NAKAMURA and Tomohiro YAMASAKI

¹正会員 工学 東洋建設株式会社 技術本部 技術部 (〒101-8463 東京都千代田区神田錦町3-7-1)

²正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸生態研究室長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-3-1)

³正会員 工修 東洋建設株式会社 技術本部 技術部 (〒101-8463 東京都千代田区神田錦町3-7-1)

In some lakes and estuaries, yearly maximum chlorophyll a (Chl.a) concentration was observed in winter, however, the mechanism of such blooms are poorly understood. In this study, dynamics of Chl.a of the Kiso and Nagara River estuaries was investigated, by using long-term monitoring data set of water quality during 1995-1998. The chlorinity (Cl concentration) was found to be a primary component to govern the temporal variation of the Chl.a concentration in the surface layer of the two estuaries. A mathematical model was constructed to analyze the phytoplankton dynamics as a function of Cl, light intensity, nutrient (DIN), and water temperature. The model calculations satisfactorily reproduced not only year to year variations in the Kiso River estuary, but also spatial difference between the two observational sites located in the Nagara River estuary, in case that nutrient limitation was incorporated.

Key Words: chlorophyll a, estuary, winter phytoplankton bloom, chlorinity, tidal cycle, river flow rate

1. 目的

河口域は、潮汐の影響を受けて、水位や流速が干満に応じて周期的に変動する特性を示す。また、そこでは河川流量変動や、塩分により生じる淡塩密度差に起因した流れも生じるため、時空間的に複雑な物理特性を有している。さらに河口域は塩分の勾配など化学的にも特有の環境条件を有しており、これらの特性に適した独特の生態系が成立している^{1) 2)}。これらのことから、沿岸海域にとっては、陸域から河川を経由してもたらされる様々な負荷が、河口域の水質変換作用によって質的な変換や量的な変化を受けて、海域に流入することになる³⁾。よって河口域の水質現象を理解し、そこでの水質変動機構を解明することは、内湾や沿岸域における水質/生態系に係わる現象を解明する上でも非常に重要である。

近年、内湾に流入する河川河口域や汽水湖沼では、冬期において植物プランクトンのブルームが報告されている。例えば長良川河口部や島根県中海等では、年間を通

じてクロロフィルa濃度が冬期に最大となる場合も生じており、水質管理上新たな問題として注目されている⁴⁾。しかしながらその要因や変動機構については未知な部分が多く、実態は解明されていない。

一方で、長良川および木曽川河口域においては長良川河口堰の建設・運用に伴う水質・生態系への影響を評価するため、永年にわたって詳細な水質モニタリングデータが蓄積されている⁵⁾。その中にはクロロフィルaデータも含まれているが、クロロフィルaや植物プランクトンの変動特性に関しては、河口堰上流の淡水域における解析が中心であり⁶⁾、下流部については貧酸素水塊の形成要因の一つとしての報告があるほかは、解析例がほとんどない^{7) 8) 9)}。

本研究では、まず、河口堰などの大規模人工構造物がなく、自然河川での特性を理解しやすいと考えられる木曽川河口部でのモニタリングデータに着目し、クロロフィルaの変動特性を塩分、日射、水温等の環境条件の影響という面から把握すると同時に、これらの関数で表される簡易な濃度変動予測モデルを構築し、変動機構を

解析する。さらに、長良川河口堰下流部を対象に、栄養塩濃度の影響についても考察する。

2. 観測地点および解析方法

長良川及び木曽川河口周辺には、長良川河口堰の建設、運用に伴い、水質管理の指標となっている項目の経時変化を把握する為に水質自動監視装置が複数の観測点で設置されており、観測データ（水温・塩化物イオン濃度、溶存酸素濃度、クロロフィルa濃度など）は一般に公開されている⁵⁾。

観測地点としては、木曽川については、河口から8.7km上流の地点にある自動監視点（通称Tomy）があり、長良川については河口から3.0km上流の地点（同Ina）及び同じく河口から0.5km伊勢湾寄りの地点（同Jyo）がある（図-1参照）。そこで、本研究においてはこれら3地点におけるモニタリングデータを解析対象とした。日射量は名古屋市内のデータ¹⁰⁾を、木曽川の流量については河川局の、愛知県犬山測候所で得られたデータ¹¹⁾を使用した。更に潮位については、名古屋港の予測値を使用した。

特に木曽川の観測点は、周辺に河口堰等の大規模な人工構造物等が存在せず、流れや混合形態の変動が比較的単純であり、河口域周辺の本質的な水質変動特性を理解しやすいと考えられるため、本研究における重点的な解析対象とした。

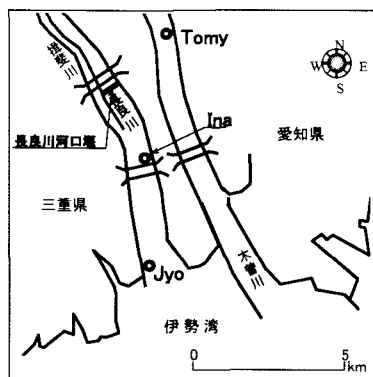


図-1 観測地点位置図

3. 時系列解析

(1) 季節変動

一例として、1995年及び1996年の木曽川観測点（Tomy）における、クロロフィルa及び表層塩化物イオン濃度の年間の時系列変化を、図-2に示す。

クロロフィルa濃度は冬期や夏期に最大約60 $\mu\text{g/l}$ 程度まで不規則に増減している。塩化物イオン濃度は、夏期には不規則で平均的な濃度が下がる傾向にある。これ

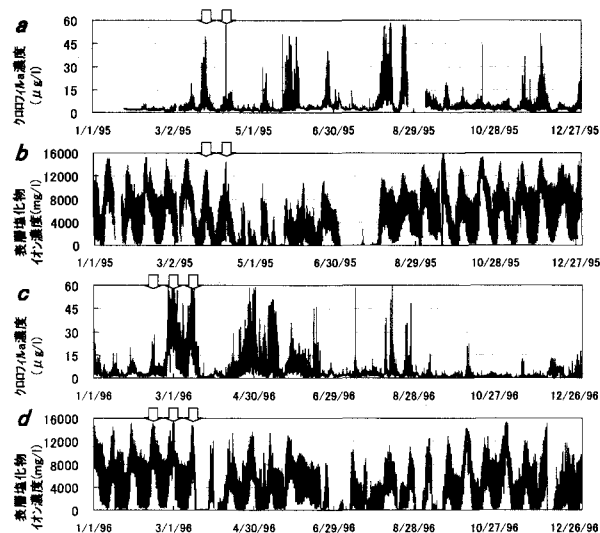


図-2 1995(a, b)年及び1996(c, d)年の木曽川観測点におけるクロロフィルa濃度及び表層塩化物イオン濃度の時系列変化

は、冬期には河川流量が少なく安定しているのに対して、夏期には梅雨などによって出水が繰り返され、平均的な流量も増加するためである。冬期における安定した周期的塩分環境のもとで、クロロフィルaの濃度極大と塩化物イオン濃度の極大をとる時期はほぼ一致している（図-2の矢印参照）。このことから、クロロフィルaの濃度を支配する要因として、塩分環境が重要であることが示唆される。

一般に、植物プランクトンは季節によって渦鞭毛藻や珪藻などの種の交替が見られ、同じクロロフィルa濃度に対しても炭素量をはじめとする元素の体成分比が異なるなど、年間を通じての解析は困難である。また冬期は植物プランクトン相も渦鞭毛藻類を中心とした単純な構成であると推定される。以上のことから、本研究における解析対象期間は1月から3月の冬期に限定した。

(2) 冬期における変動特性

1996年2月6日から1996年3月20日の期間における、木曽川に設置された水質自動監視装置から得られたクロロフィルa及び表層塩化物イオン濃度、名古屋港の潮位、全日日射量、及び木曽川河川流量の時系列変化を、図-3に示す。

観測点の地形的な条件から、小潮時においては塩水の遡上により表層の塩化物イオン濃度が高くなる。一方、大潮時には下流側で鉛直方向に混合されるため、表層水の塩化物イオン濃度は低下する。クロロフィルaは、小潮～大潮のサイクルにおける塩化物イオン濃度の増減と一致した周期で濃度変動する。1日の濃度変動という点では、塩化物イオン濃度が高くなるとクロロフィルa濃度が高くなっている。このことからクロロフィルa濃度も、塩化物イオン濃度と同様に潮汐の短期的及び長期的な影響を受けて変動しており、冬期においては海産性もしく

は汽水性植物プランクトンによるクロロフィルaが卓越していることが示唆される。

全天日射量の時系列変化に注目してみると、時間経過につれて1日の最大値が徐々に高くなっていることが分かる。クロロフィルa濃度の時系列変化を見ると、例えば同じ大潮期においても後半ほど濃度が上昇しており、日射量の増加によって、次第にクロロフィルa濃度が増加したことが示唆される。

3月17日以降、塩化物イオン濃度及びクロロフィルa濃度が極端に低くなっているが、これは木曽川流量が急激に増大し、その結果として塩化物イオン濃度が低下するとともに、植物プランクトンが伊勢湾側にフラッシュされたものと推定される。このような3月末頃の河川流量の増加は、ほぼ例年生じる現象であり、冬期の植物プランクトンブルームを終息させるきっかけを与えている。

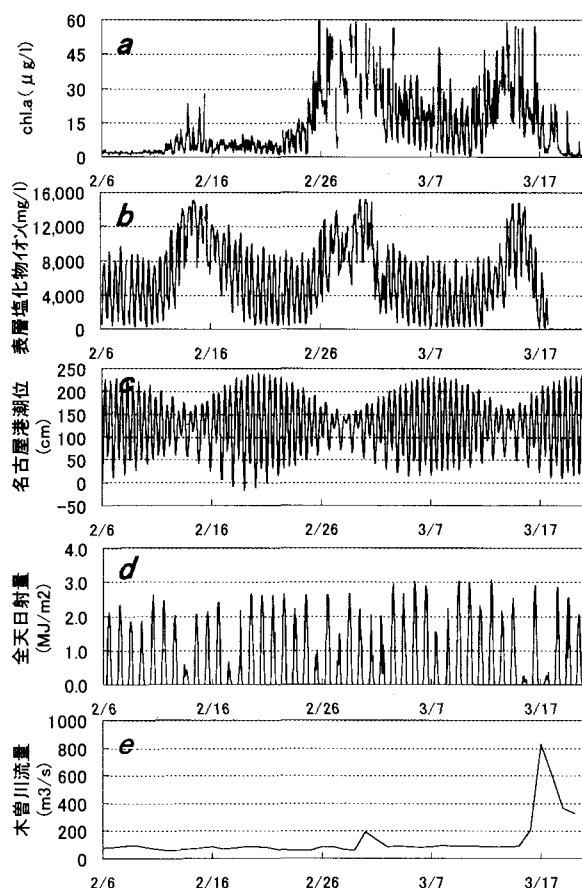


図-3 1996年冬期における木曽川観測点(Tomy)でのクロロフィルa濃度(a)、表層塩化物イオン濃度(b)、名古屋港潮位(c)、全天日射量(d)、木曽川流量(e)の時系列変化

4. モデルの構築および解析

(1) モデルの構築

クロロフィルa濃度を塩化物イオン濃度、水温、日射

量、栄養塩濃度の関数で表されるモデルを構築して実測値との比較を行い、濃度変動機構を解析する。

植物プランクトン量ないしクロロフィルa濃度は、その生産を支える環境因子の影響のほか、動物プランクトンや貝類など一次捕食者による捕食の影響を受ける。しかしながらこれら一次捕食者のデータがないため、本解析においては直接これらの捕食者をモデル変数として扱うことはせず、植物プランクトンの枯死速度に捕食の影響を含めることとした。

同じ塩化物イオン濃度をとる層とともに移動する座標系を考え、ある座標上でのクロロフィルaの変動を表現する基礎式を以下に示す。

$$\frac{dchl.a}{dt} = Pchl.a(t) - Rchl.a(t) - mchl.a^2(t) \quad (1)$$

ここで、chl.a(t)、P、R、mはそれぞれクロロフィルa濃度、一次生産速度、呼吸速度、枯死速度であり、一次生産速度Pは塩化物イオン濃度Cl (mg/l) と水温T (°C)、日射量I (MJ/m²)、溶存無機態窒素濃度DIN (mg/l) の関数で、呼吸速度Rおよび死亡速度mは水温の関数で、それぞれ以下のように表した。

$$P = K_1 f_1(Cl) f_2(T, I) f_3(DIN) \quad (2)$$

$$f_1(Cl) = \exp \left(-0.5 \left(\frac{\ln \left(\frac{Cl}{c} \right)}{b} \right)^2 \right) \quad (3)$$

$$f_2(T, I) = \exp(\alpha T) \left(\frac{I}{I_{opt}} \right) \exp \left(1 - \frac{I}{I_{opt}} \right) \quad (4)$$

$$f_3(DIN) = \frac{DIN}{K_m + DIN} \quad (5)$$

$$R = f_4(T) = K_2 \exp(\beta T) \quad (6)$$

$$m = f_5(T) = m_0 \exp(\gamma T) \quad (7)$$

光合成速度の塩化物イオン濃度依存性を示す項 $f_1(Cl)$ については、汽水域の大型藻類の成長に対して、Montagnaら¹²⁾が示した対数正規分布モデルを用いた。式中のcは成長に最適な塩化物イオン濃度、bは分布の幅(分散)を示すパラメータである。本研究では、図-4に示す長良川観測点におけるクロロフィルaの分布を参考に、試行錯誤的にそれらの値を求めた。水温及び光量に依存した項 $f_2(T, I)$ 、栄養塩の制限を示す項 $f_3(DIN)$ については、それぞれ生態系モデルで通常使われる式形であり¹³⁾、水温依存性についてはEppley¹⁴⁾が与えた指数関数式、光量についてはSteele¹⁵⁾の式、栄養塩についてはMichaelis-Menten型の式である。ここで、 α は温度係数、 I_{opt} は最適光量、 K_m は半飽和定数である。

植物プランクトンの増殖を考える際には、水中の光量を推定する必要がある。水中光量は、Lambert-Beerの式

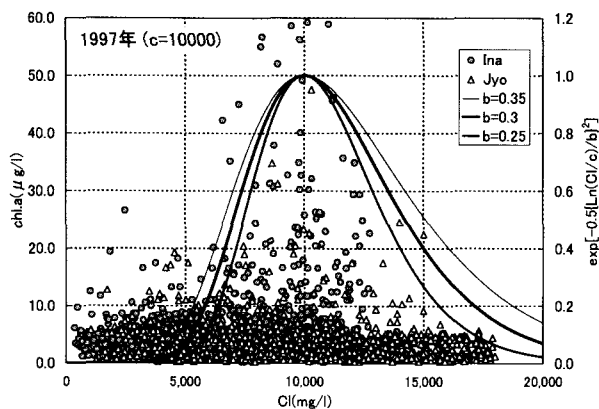


図-4 塩化物イオン濃度とクロロフィル a 濃度の関係

に従って、水中で指数関数的に減少するものとした。

$$I = I_s(t) \exp(-k_s z) \quad (8)$$

$$k_s = k_0 + A_1 \text{chl.a} + A_2 \text{chl.a}^{2/3} \quad (9)$$

ここで、 I_s 及び k_s は水面直上の光量、及び消散係数であるが、消散自体が水域の物理化学的特性およびクロロフィル a 濃度に依存するとして Riley¹⁶⁾ の式を用いた。係数値は、宍道湖・中海水系で用いられた値¹⁷⁾、¹⁸⁾ を用いた。水深 z については、水質測定位置を考慮して 1 m とした。

木曽川観測点については栄養塩のデータが全く存在せず、また、長良川についても堰直下の Ina において全窒素 (TN) の測定値があるにすぎない。従って、本研究においては栄養塩濃度の影響解析は限定されたものにならない。特に木曽川については推定するデータが全くないため、以下の木曽川を対象とした解析では、栄養塩の制限を考慮していない。長良川については、全窒素 (TN) から無機態窒素濃度を推定し、モデル計算に用いた。

呼吸速度 R については、やはり通常用いられる水温の指数関数表現式を用いており、 K_d は 0°C における呼吸速度係数、 β は呼吸に関する温度係数をそれぞれ示す。

枯死速度 m については、通常クロロフィル a 濃度の一次式で表される場合が多いが、中田¹³⁾ は、植物プランクトン及び動物プランクトンを変数とした低次生態系モデルの中で、高次の動物による捕食効果を含むものとして、クロロフィル a 濃度の二次の関数表示形を提唱している。本研究ではモデルに動物プランクトン量を含まない構造としているため、中田の考え方を拡張し、動物プランクトンを含む捕食効果をあわせた式として、同様な二次の関数形で与えた。

塩化物イオン濃度は水質自動監視装置から得られた 1 時間毎のデータを、日射については 1 日の総量を時間あたりに換算した値を、水温については 1 日の平均値を採用した。 I_{opt} については、日射量が強くなる計算期間中の 3 月の平均値とした。

表-1 パラメータの値 (単位) と出典

$b = 0.3$	本研究
$c = 10,000$ (mg/l)	本研究
$k_0 = 0.464$ (m^{-1})	中田 ¹⁷⁾
$A_1 = -0.026$ ($(\mu\text{g/l})^{-1} \text{m}^{-1}$)	中田 ¹⁷⁾
$A_2 = 0.211$ ($(\mu\text{g/l})^{-2/3} \text{m}^{-1}$)	中田 ¹⁷⁾
$K_1 = 0.0085$ (h^{-1})	本研究
$K_2 = 8.9 \times 10^{-4}$ (h^{-1})	本研究
$\alpha = 6.33 \times 10^{-2}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	中田 ¹⁷⁾ , Nakata et al. ¹⁸⁾
$\beta = 5.24 \times 10^{-2}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	中田 ¹⁷⁾ , Nakata et al. ¹⁸⁾
$\gamma = 6.93 \times 10^{-2}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	中田 ¹⁷⁾ , Nakata et al. ¹⁸⁾
$K_m = 0.0042$ (mg/l)	中田 ¹⁷⁾
$m_0 = 2.0 \times 10^{-5}$ ($(\mu\text{g/l})^{-1} \text{h}^{-1}$) (木曽川)	
$m_0 = 2.0 \times 10^{-4}$ ($(\mu\text{g/l})^{-1} \text{h}^{-1}$) (長良)	本研究

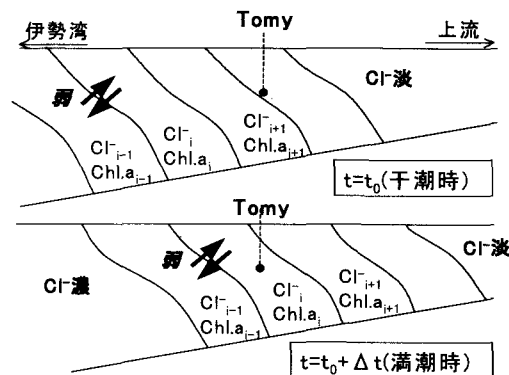


図-5 冬の感潮部における混合の様子およびモデル概念図

係数の値と出典を表-1 に示す。

本研究では塩化物イオン濃度層の分割幅 ΔCl を 1000mg/l 毎とし、計 17 層に分割した。冬期の木曽川においては弱混合から緩混合の混合形態をとり、比較的混合が弱い。また渦鞭毛藻は運動性があり、適応した塩化物イオン濃度や好適な環境条件を求めて遊泳することから、本研究では、簡単のために混合などによる各層間の植物プランクトンの輸送は無視した。各層 ($i=1 \sim 17$) をそれぞれ独立として $\text{chl.a}_i(t)$ を求め、その上で観測値の塩化物イオン濃度に対応する層のクロロフィル a 濃度をその時刻の計算値とした。図-5 に、モデルの概念図を示す。

(2) 木曽川河口域への適用

本モデルを、まず木曽川河口域観測点 (Tomy) に適応した。解析開始時期及び終了時期は、クロロフィル a 濃度が低くかつ安定している大潮時とした。モデルのパラメータの大部分は、広範な塩化物イオン濃度範囲でのモデル解析が行われている値¹⁶⁾ ¹⁷⁾ を用い、一部については 1996 年の観測値を再現するように値を調整した (表-1 参照)。その上で、クロロフィル a の濃度レベルや変動特性に顕著な違いが見られた 1997 年および 1998 年を対象とし、同一のパラメータ値を用いてモデルの一般性を検証した。

まず 1996 年 2 月 6 日から 1996 年 3 月 20 日までの、モデルの計算結果を図-6 に示す。

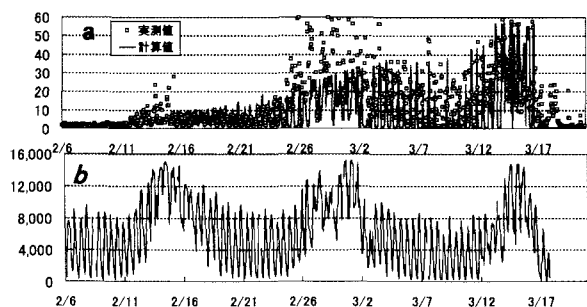


図-6 クロロフィルaの計算結果及び実測値の比較(a, ($\mu\text{g/l}$)と塩化物イオン濃度(b, (mg/l))の時系列変化 (1996年, 木曽川観測点Tomy)

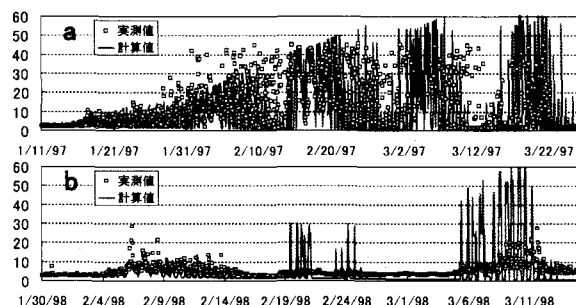


図-7 1997年(a)及び1998年(b)の計算結果及び実測値の時系列変化の比較($\mu\text{g/l}$) (木曽川観測点Tomy)

計算期間中、小潮は3回現れており、クロロフィルa濃度の実測値がそれに応じて極大値を3回とっている。1回目および2回目の塩化物イオン濃度の極大に対応したクロロフィルa計算値は、実測値をやや過小評価しており、3回目については逆にやや過大評価となる傾向が見られる。しかしながら、それ以外の期間については、大潮・小潮周期及び半日周期の塩分変動に伴う観測値の変動特性を十分に再現していると言える。後半の期間において計算値がやや過大傾向にあるのは、栄養塩の影響がこのモデルには反映されていない可能性がある。

本モデルの一般性を検証するため、冬期に長期間にわたってクロロフィルaの高濃度現象が見られた1997年、及びクロロフィルaの極大が極めて短期間しか生じなかった1998年についても同様に計算を行った(図-7)。計算値はそれぞれの年における実測値の特徴をほぼ忠実に再現している。但し、計算期間の後半にはやはり計算結果は過大評価となる傾向が見られる。

(3) 長良川河口域への適用 -栄養塩の影響-

長良川流域の観測点Inaでは総窒素(TN)のデータが取得されている。栄養塩濃度がクロロフィルaの濃度変動に与える影響は無視出来ないと考えられるので、Inaで得られたTNデータを利用し、クロロフィルaとTNの相関関係からDINを推定した。

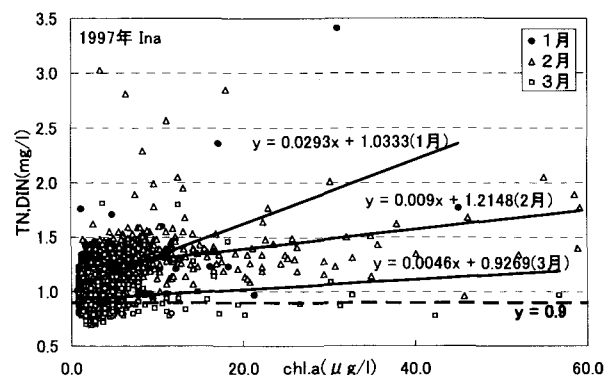


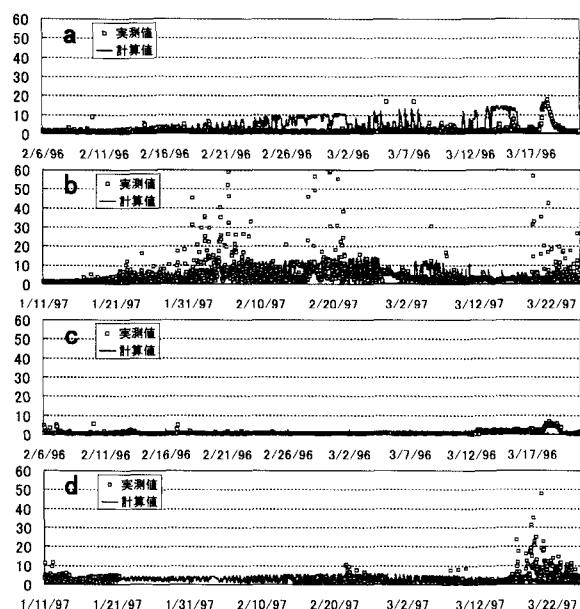
図-8 長良川観測点(Ina)におけるクロロフィルa濃度とTNの比較

TNは、DIN、溶存有機態窒素DON、デトリタス態N、さらに植物プランクトンを構成するN(植物プランクトン態N)の和で表される。これらのうち、植物プランクトン態Nはクロロフィルaと相関性があることが期待される。図-8は、1997年の1月から3月まで、各月ごとにクロロフィルaとTNの相関関係を調べたものである。図をみると、データ数の多い2月および3月は傾きがほぼ同じで、二つの平行な直線で近似できることがわかる。また、2月から3月にかけてTN濃度が全体的に下がっており、その下限は概ね0.9mg/lとなっていることが分かる。DONおよびデトリタス態Nは反応性に乏しいため、冬期におけるこれらの濃度の和は平均的にみて0.9mg/lであると考えられる。一方、各月の近似直線のy切片値は、植物プランクトン態N以外の成分、すなわちDIN、DONおよびデトリタス態Nの和に相当する。すなわち、各月のy切片から0.9mg/lを除いた値がその月の平均的なDINであると考えられる。図-8において2月から3月にかけてy切片の値が減少するのは、この期間において河川流量が少なく陸域からの窒素供給が少ない中で、DINが徐々に涸渇していることを示しているものと解釈出来る。

以上のような考え方に基づき、各月毎に描いた近似直線のy切片と、数式 $y=0.9$ との差をその月を代表するDIN濃度とし、その濃度をそれぞれの月の中間日の濃度と仮定し、他の日については線形補間する事により各日のDINを推定した。半飽和定数 K_0 は、中田¹⁷⁾に基づき0.042mg/lとした。

Ina及びJyoにおける1996年及び1997年のモデル計算値と実測値の時系列変化を図-9に示す。Ina及びJyoともに1996年の方がクロロフィルa濃度の値がやや低いこと、Inaにおける方がJyoよりも値が全体的に高めである事など、年における差や観測地点間の特性の違いはほぼ再現されていると考えられる。また、モデルにDINの項を組み込んだことにより、3月における計算値の過大化はうまく抑制されている。しかしながら、例えば1997年についてはクロロフィルa濃度が間欠的に極大値をとる現象が計算によってあまり再現されて

いないなど、定量的な再現性はあまり良くない。長良川河口堰下流部においては、揖斐川の合流があること、また河口堰という人工構造物の存在とそこでの操作の影響によって流れが複雑である事などが影響している可能性がある。これらの効果を評価するためには、流体力学的モデルを組み込む必要があり、本モデルの解析範囲を超えていると考えられる。



図－9 長良川観測点（Ina：a, b, Jyo：c, d）におけるモデルによる計算結果及び実測値の時系列変化の比較（ $\mu\text{g/l}$ ）（a, c：1996年，b, d：1997年）

5. 結論

木曽川及び長良川河口域における冬期の植物プランクトン（クロロフィルa）の変動について、解析を行った。クロロフィルa濃度は、半日及び大潮～小潮といった短長期の潮汐変動に応じて変動する塩化物イオン濃度に強く支配され、小潮時に高く大潮時には低くなる事が確認された。これらの事から、塩化物イオン濃度・日射量・水温・栄養塩濃度の関数で表される、クロロフィルa濃度変動予測モデルを構築した。まず木曽川観測点における複数の年度で得られたデータを対象として計算を行い、実測との比較を行った。計算の後半（3月）部分では計算値が過大となる傾向が見られたものの、短期及び長期の変動特性をほぼ再現する事が出来た。後半部分の計算値の過大傾向は、栄養塩の影響が全く考慮できなかった事によるものと考えられた。そのため、TNを測定している長良川での観測値から無機溶存態窒素を推定し、モデル計算を行ったところ、後半部分で過大傾向にあった計算値が抑えられ、モデルの信頼性を高める事が出来た。

参考文献

- 1) 栗原康：河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー，東海大学出版会，1988.
- 2) 西條八束・奥田節夫：河川感潮域－その自然と変貌－，名古屋大学出版会，248p，1996.
- 3) 岡田知也・中山恵介：荒川河口域におけるChl. aの鉛直分布，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1021-1025，2002.
- 4) 大谷修司：宍道湖・中海水系の植物プランクトンの種類組成と経年変化，沿岸海洋研究，Vol. 35，pp. 35-47，1997.
- 5) 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社：長良川河口堰モニタリング年報CD-ROM版，建設省・水資源開発公団，2001.
- 6) 村上哲生：長良川河口堰建設後の浮遊藻類発生とその環境影響，応用生態工学，Vol. 5，pp. 41-51，2002.
- 7) 村上哲生・服部典子・藤森俊雄・西條八束：夏季の長良川河口堰下流部の貧酸素水塊の発達と解消，応用生態工学，Vol. 4，pp. 73-80，2001.
- 8) 中村由行・藤野智亮：長良川河口堰下流部の溶存酸素濃度の動態，応用生態工学，Vol. 5，pp. 73-84，2002.
- 9) 栗木秀治・中村由行：木曽川河口域における植物プランクトンの冬季変動予測モデル，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1026-1030，2003.
- 10) 気象庁編集：気象庁月報，地上気象観測資料CD-ROM版.
- 11) 建設省河川局：平成6年度～平成10年度流量年表，建設省河川局，1995-1999.
- 12) Montagna, P.A., Kalke, R.D. and Ritter, C.: Effect of restored freshwater inflow on macrofauna and meiofauna in upper Rincon Bayou, Texas, USA, *Estuaries*, Vol.25, pp.1436-1447, 2002.
- 13) 中田喜三郎：生態系モデルー定式化と未知のパラメータの推定法ー，海洋工学コンファレンス論文集，第8号（J. Advanced Marine Technology Conference, Vol.8），pp. 99-138，1993.
- 14) Eppley, R.W.: Temperature and phytoplankton growth in the sea, *Fisheries Bulletin*, Vol.70, pp.1063-1085, 1972.
- 15) Steele, J.H.: Environmental control of photosynthesis in the sea, *Limnology and Oceanography*, Vol.1, pp.61-70, 1962.
- 16) Riley, G.A.: Oceanography of Long Island Sound 1952-54. I. Physical Oceanography, *Bulletin Bingham Oceanography Coll.*, Vol.15, pp.15-46, 1956.
- 17) 中田喜三郎：アジアにおける水資源域の水質汚濁評価と有毒アオコ発生モニタリング手法の開発，平成13年度地球環境研究総合推進費報告書，環境省地球環境局編，2002.
- 18) Nakata, K., Horiguchi, F. and Yamamuro, M.: Model study of Lakes Shinji and Nakaumi – a coupled coastal lagoon system, *J. Marine Systems*, Vol.26, pp.145-169, 2000.

(2003. 9. 30受付)