

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1066

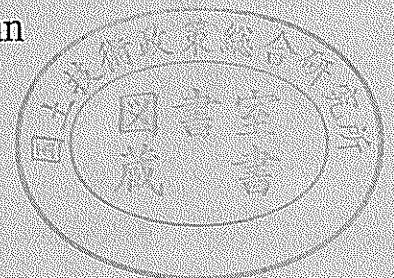
December 2003

木曾川及び長良川河口域における  
冬季の植物プランクトン変動機構の解析

中 村 由 行  
栗 木 秀 治

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 観測地点及び解析方法 .....	5
3. 時系列解析 .....	6
3.1 季節変動 .....	6
3.2 冬期における変動特性 .....	6
3.3 長良川観測点との比較 .....	7
4. モデルの構築及び解析 .....	8
4.1 モデルの構築 .....	8
4.2 木曾川河口域への適用 .....	10
4.3 長良川河口域への適用－栄養塩の影響について－ .....	12
4.4 伊勢湾湾奥部の水質との比較 .....	13
4.5 感度解析 .....	14
5. まとめ .....	15
謝辞 .....	15
参考文献 .....	15

# Dynamics of winter phytoplankton blooms in the Kiso and Nagara River estuaries

Yoshiyuki NAKAMURA\*  
Hideharu KURIKI\*\*

## Synopsis

In recent years, Japanese estuaries and brackish lagoons tend to experience phytoplankton blooms of dinoflagellate in winter. In some lakes and estuaries, yearly maximum chlorophyll a (Chl.a) concentration was observed in winter season, however, the mechanisms 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. In general, the winter phytoplankton bloom outbreaks in February until the middle of March, when river flow rates abruptly increase by the snowmelt runoff. The weather during the bloom season is relatively calm and the flow rates of the rivers are low and stable. 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. As Cl varied through the tidal motion, Chl.a concentration fluctuated not only with the semi-diurnal/diurnal tidal cycle but also with the spring-neap-spring tidal duration. Maximum Chl.a was observed at around 10,000 mg/l in Cl.

A simple phytoplankton growth model was constructed to investigate the mechanism of the winter bloom. The model includes phytoplankton growth as a function of Cl, light intensity, nutrient (DIN), and water temperature. Respiration and mortality terms are also incorporated as a function of temperature. The model was firstly applied to the Kiso River estuary. The model calibrated by using the 1996 data set collected at an observational station in the Kiso River estuary, then validated against 1997-1998 data sets of the same station. The model well reproduced not only the temporal variations from diurnal to spring-neap-spring cycles in 1996, but also year-to-year variations in 1997 and 1998. Relatively large and continuous outbreak of the bloom was observed in 1997, whereas the bloom was intermittent and the Chl.a concentration was low in 1998. The model analysis indicates that the difference of the bloom in the two years was caused by difference in Cl concentration. The low Chl.a in 1998 was due to low Cl caused by abnormally high discharge of the river. The model was also applied to the data sets in the Nagara River estuary in 1997 and 1998. The model calculations satisfactorily reproduced not only year-to-year variation (relatively high Chl.a in 1997 and low in 1998) but also spatial difference between the two observational sites located in the Nagara River estuary, in case that nutrient limitation was incorporated. However, the model poorly reproduced the spring-neap-spring variation in Chl.a, as the Nagara River estuary is physically more complex due to the presence of the rivermouth barrage and inflow of the Ibi River. The model analysis also indicates that grazing pressure by zooplankton is higher in the Nagara River than that in the Kiso River, which may be due to stagnant character of the water body, associated with the presence of the Nagara rivermouth barrage.

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

---

\* Head of Coastal Ecosystems Division, Marine Environment and Engineering Department, Port and Airport Research Institute,

\*\* Toyo Construction Co. Ltd

3-1-1 Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, JAPAN

Phone : +81-468-44-5047 Fax : +81-468-44-6243 e-mail : nakamura\_y@pari.go.jp

# 木曾川及び長良川河口域における 冬期の植物プランクトン変動機構の解析

中村 由行\*  
栗木 秀治\*\*

## 要 旨

内湾と河川の接点である河口部は海水と淡水が交わる場であり、潮汐や河川流量の影響を受け独特の流況や混合形態をとる事が知られている。また、塩分等の化学的な環境条件が急激に変化する場でもあり、これらの環境条件に適応した独特の生態系が形成されている。近年、我が国における河口域や汽水域では、冬期に渦鞭毛藻と見られる植物プランクトンのブルームがしばしば報告されるようになってきている。特に長良川河口域周辺では、年間のクロロフィル a の観測値が冬期に最大となる場合が生じており、水質管理上の問題となっている。生態系モデル等により植物プランクトンの増殖予測が行われているが、その要因やメカニズムについては未知の部分が多い。

一方、長良川及び木曾川河口部周辺では、長良川河口堰の建設、運用に伴い水質等の常時観測を行うために水質自動監視装置が設置され、モニタリングデータが長年にわたり蓄積されている。そのうち、木曾川には河道内に大規模な人工構造物がなく、河口域の本質的な植物プランクトンの変動機構を把握出来ると考えられる。従って、本研究でははじめに、木曾川河口部近くに設置された観測装置から得られたモニタリングデータを使用し、河川流量が比較的安定している冬期の河口域におけるクロロフィル a の変動機構の解明を行った。時系列解析を行った結果、クロロフィル a 濃度は主として塩化物イオン濃度に依存し、半日及び日周期の潮汐のほか、大潮・小潮周期の変動に応じて変動することが示された。さらに日射量にも依存する事が示唆された。

以上の結果を基に、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 予測モデルを構築し、ブルームの形成機構に関する解析を行った。モデル計算の結果は実測の日変動から大潮・小潮周期の変動特性をほぼ忠実に再現出来た。さらに、ブルームが中期にわたって継続した1997年、および間欠的なブルームしか生じなかった1998年の再現計算及び解析を行い、モデルがこれらの年による違いをよく再現するとともに、河川流量の差が原因でブルーム規模の大小が生じたことを示した。次に、長良川河口堰下流部についても同様の解析を行った。長良川下流域については、TN、TPに関するモニタリングデータがある事から、特に栄養塩の影響について解析を行った。TNとクロロフィル a の相関関係をもとに溶存無機態窒素 (DIN) 量を推定し、モデルに用いた。その結果、長良川においてもクロロフィル a 濃度の変動機構がほぼ再現された。さらに、栄養塩の効果を取り込む事により、ブルーム後半の相対的なクロロフィル a の低下現象を説明する事が出来、モデルの再現性がより高められる事が確認された。

キーワード：クロロフィル a, 河口域, 冬期の植物プランクトンブルーム, 塩化物イオン濃度, 潮汐, 河川流量

\* 海洋・水工部沿岸生態研究室長

\*\* 東洋建設株式会社

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5047 Fax：046-844-6243 e-mail: nakamura\_y@pari.go.jp

## 1. はじめに

近年、内湾の環境保全や自然再生を語る上で、「流域圏」や「川から海を考える」といった表現に代表されるように、河川と沿岸海域の一体とした管理が求められている（例えば、宇野木, 1996）。両者の接点である河口域は物理的、化学的、生物学的に特有の環境条件を有しており、この特性に適した独特の水質の分布や変動特性を有している（栗原, 1988）。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、河口域における水質変換作用によって質的な変換や量的な変化を受けた後に、海域に流入することになる。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、内湾や沿岸域の水質現象を解明する上でも非常に重要である。

河口域の物理的特性として、まず、潮汐の影響を受けるため、水位や流速が干満に応じて周期的に変動することがあげられる。このような河川下流水域は、潮位変動を感じる水域であることから「感潮河川」とも呼ばれ、流動場は河川流量や潮汐の影響を受けると同時に、淡水及び海水に含まれる塩分の差により生じる密度差も関係して、複雑な流況と混合の様子を呈している。

河口域の塩分の空間的分布については、大きく分けて弱混合型、強混合型、緩混合型の3種類に分類される事が多い（例えば、西條・奥田, 1996）。弱混合型は、塩分を多く含む海水と河川水（淡水）の密度差による安定効果が潮汐による混合力よりも大きい場合に、高密度の塩水が下層を侵入し、その上を淡水が滑るように流れる形態である。わが国においては潮位変動が少ない日本海側の河口域に多くみられ、塩水は楔状に遡上し、塩水楔と呼ばれる。強混合型は逆に潮汐の混合力が密度差による安定効果を上回る場合に生じ、混合が促進されて鉛直方向に濃度がほぼ一様になり、等塩分線はほぼ鉛直となる。わが国においては、潮位変動の大きな有明海沿岸の河川河口域に多く見られる。緩混合型は両者の中間的な混合状態である。同一河川においても、潮位差が大きい大潮と小さな小潮の間で混合形態の変化が周期的に生じる場合があり、河口域における物質輸送や生物生息場を理解する上で、重要な物理的因子であるといえる。

河口域における物質輸送において特徴的な現象に、河川上流から流れてきた土粒子等が海水と接触する事で電気化学的な凝集反応を起こし、沈降して河口域に堆積する現象も知られている。凝集沈降は塩水楔の先端など特定の場所に生じやすく、底質の悪化などにつながることもある。

河口域は河川水の流れ方向に塩分の勾配があるが、塩分環境は生物の生息場を規定する重要な化学的環境である。浸透圧調節機能の違いに応じて、生物はそれぞれ適切な塩分環境に適応している。河川と外海を回遊する魚類は、河川を遡上、降下する際に感潮域を通過するので、鳥類にとって感潮域は絶好の摂餌場であり、また渡り鳥の休息の場としては欠かせない存在である（西條・奥田, 1996）。

沿岸海域の栄養塩類の供給源は、ほとんど河川由来である。そのため、河口域においては、流下方向に栄養塩の濃度勾配が生じるとともに濁度や植物プランクトン濃度の極大域が現れることが、以前から知られてきた（例えば、Schuchardt and Schirmer, 1991 ; Sin et al., 1999 ; Snow et al., 2000）。また、Gallegos・Jordan (2002) は、アメリカ東海岸のチェサピーク湾奥部における春期の渦鞭毛藻ブルームの挙動について、日射量や栄養塩の関係性という観点から観測を行っており、春期の出水後における栄養塩の供給がブルームの引き金になっていることを示している。Horne・Goldman (1994) は、同じチェサピーク湾の観測によって、赤潮プランクトンが季節とともに湾口から湾奥にかけて周期的に移動しているとしている。また、岡田・中山 (2002, 2003) は、夏期における荒川の河口域における塩分、植物プランクトン、栄養塩について縦断面方向に詳細な連続観測を行い、クロロフィル a 濃度が混合形態や潮位振幅に強く依存していることを見いだした。彼らは、モデル計算によっても植物プランクトン量が混合形態の変化とともに増減を繰り返している事を再現し、大潮期の方が小潮期に比べて河川からの流入する栄養塩が内湾にそのまま流出する割合が大きい事を示している。

近年、内湾に流入する河川の河口域や汽水湖沼では、冬期に海産性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鳥根県中海等では、冬期に渦鞭毛藻と見られる赤潮が発生し、年間のクロロフィル a 濃度が冬期に最大となる場合も生じており、水質管理上問題となっている（大谷, 1997）。しかし、その要因や変動機構については未知な部分も多く、継続的な観測が極めて少ないことなどから、生態系シミュレーションなどの解析例もまれである（中田, 2002）。

ところで、長良川及び木曾川河口部周辺では、長良川河口堰の建設・運用に伴い、水質等の常時観測を行う為に水質自動監視装置が設置され、長年にわたりモニタリングデータが蓄積されてきた（建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社, 2001）。近年、そのデータは公表され、モニタリングデータを総合的に解析する試みが

行われ始めている（例えば、玉井,2003；武田・松尾,2000）。植物プランクトンの変動に関しては、河口堰上流の淡水域における解析が中心で（村上,2002）、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（村上ら,2001；中村・藤野,2002；中村ら,2002）ほかは、報告及び解析例がほとんどない。

長良川河口域においては、河口堰という人工構造物の影響や堰下流部における揖斐川の流入などの影響があり、物理的にも複雑である。一方、木曾川河口部周辺にはそのような大規模人工構造物が存在しない事から、河口域の本質的な植物プランクトン変動機構を解明するためには好都合であると考えられる。そのため、本研究では、まず木曾川河口部周辺から得られたモニタリングデータを利用し、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。木曾川河口域のモニタリングデータの限界は、観測点が一箇所しかないこと、クロロフィルaの変動に対して一般に重要な因子であると考えられる栄養塩のデータがないことがあげられる。これらの限界を補うため、本研究においてはさらに長良川河口堰下流部を対象とした解析を行う。長良川河口域では、堰の下流側に2点の観測点があり、そのうちの上流側では栄養塩のモニタリングデータが得られている。このことを利用し、長良川河口域においては特に二地点間における塩分環境の違いの影響や、栄養塩濃度変動の影響について考察する。

## 2. 観測地点及び解析方法

長良川及び木曾川河口周辺には、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多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いる。最近、それらの観測データ（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）は公開され、利用可能となっている（建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社,2001）。塩水が遡上する観測地点としては、木曾川については、河口から8.7km上流の地点にある自動監視点（通称トミー）があり、長良川については河口基準点から3.0km上流の地点（同イーナ）及び同じく基準点から0.5km伊勢湾寄りの地点（同ジョー）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。特に木曾川の観測点は自然河川中に位置するため、河口堰等の大規模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、河口部及びその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。時系列変化及び解析に使用する日射量は名古屋市内のデータ（気象庁）を、木曾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（河川局,1995-1999）を使用した。更に潮位については、名古屋港のデータを使用した。また、伊勢湾奥部の水質については、中部国際空港(株)・愛知県（1999）のデータを用いた。

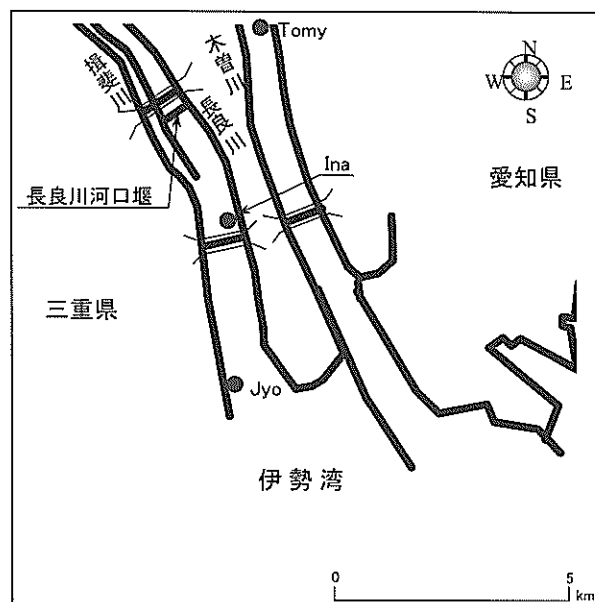


図-1 観測地点位置図

### 3. 時系列解析

#### 3.1 季節変動

モニタリングデータの一例として、1995年及び1996年の木曾川観測点（トミー）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。表層塩化物イオン濃度との関連をみると、クロロフィル a 濃度が大幅に上昇した場合には、表層塩化物イオン濃度も多くの場合上昇しているのが伺える。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、季節を問わず塩分環境が重要であることが示唆される。塩化物イオン濃度は、10月頃から3月頃までほぼ規則的に変動しているが、夏期には不規則で平均的な濃度が下がる傾向にある。これは、冬期には河川流量が低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(秋期から初春にかけての時期)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 濃度は1月ないし2月頃から3月中旬頃にかけて、次第に極大値が増加しながら増減を繰り返している。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)。3月中・下旬にはしばしば塩化物イオン濃度の急激な低下が生じる

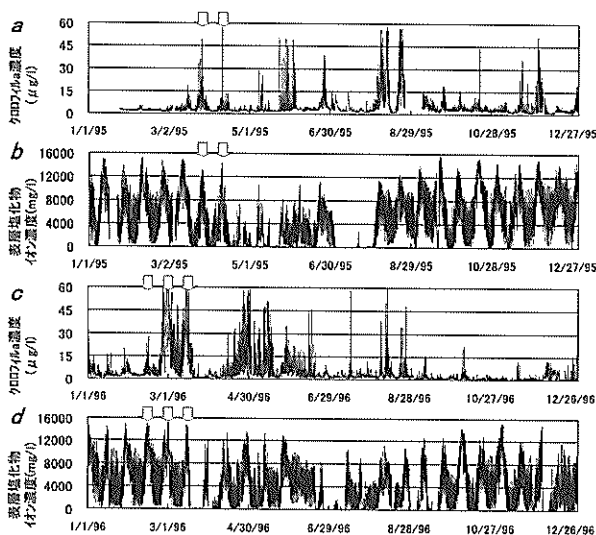


図-2 1995 (a, b) 年及び1996 (c, d) 年の木曾川観測点（トミー）におけるクロロフィル a 濃度及び表層塩化物イオン濃度の時系列変化

が、この時期に合わせてクロロフィル a の増加現象はいったん終止するようである。

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、年間を通じてのモデル解析は困難である。特に夏期は、大雨による河川の洪水流といった物理的な擾乱等の影響を受けて、きわめて不規則な変動を示しているのに対し、冬期は気候が比較的安定し河川流量も安定しており、洪水流などの擾乱も殆ど生じないため、塩分環境の周期的変動が維持されている。また植物プランクトンの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。

#### 3.2 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、木曾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、全天日射量、及び木曾川流量の時系列変化を、図-3 に示す。

塩化物イオン濃度と名古屋港の潮汐の時系列変化に注目すると、塩化物イオン濃度は小潮時、すなわち1日の潮位差が小さい場合に平均的に濃度が高くなり、日変動幅は小さくなる。逆に大潮時、すなわち1日の潮位差が大きい場合には平均的に濃度は低くなり、日変動の幅は大きい。このことから塩化物イオン濃度は潮汐の長期的変動(大潮・小潮周期)及び短期的変動(半日ないし1日の干満周期)に応じて大きく変動しているのが分かる。クロロフィル a 濃度と塩化物イオン濃度の時系列変化を見ると、塩化物イオン濃度が平均的に高くなる小潮時にクロロフィル a 濃度も高くなり、逆に大潮時には平均的にクロロフィル a 濃度は低くなっている。1日の濃度変動という点では、塩化物イオン濃度と同様にクロロフィル a 濃度も大きく変動している。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、塩化物イオン濃度が高くなるとクロロフィル a 濃度が高くなることから、冬期においては海産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

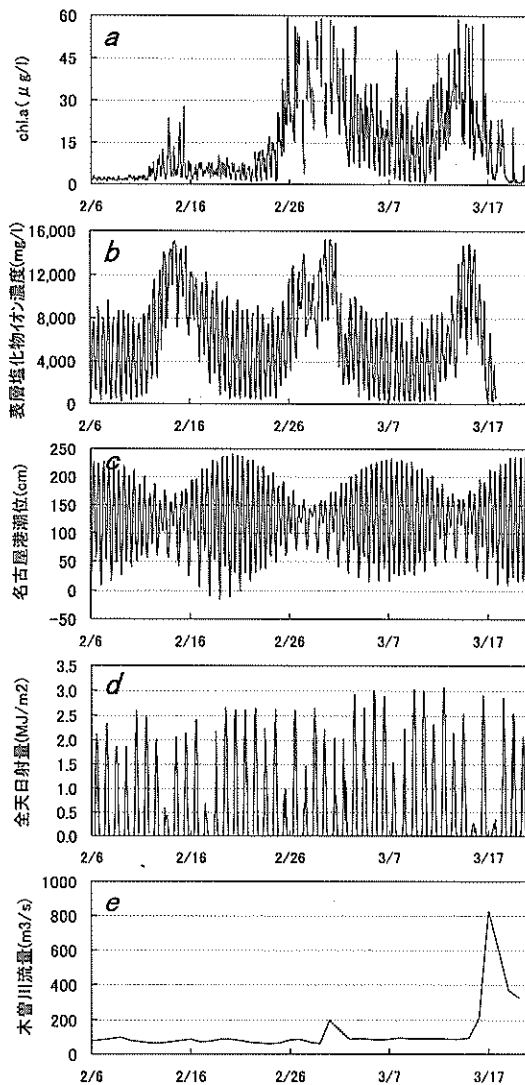


図-3 1996年冬期における木曾川観測点（トミー）でのクロロフィルa濃度 (a)、表層塩化物イオン濃度 (b)、名古屋港潮位 (c)、全天日射量 (d)、木曾川流量 (e) の時系列変化

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、これは木曾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菜種梅雨期に対応した融雪出水であると考えられ、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。

1996年冬期において、図-3と同じ期間のクロロフィ

ルaのデータについて、スペクトル解析を行った結果を図-4に示す。半日、一日および15日の周期に対応したピークを有している事がわかる。これらの特性は、塩化物イオン濃度のスペクトルと極めて似通っており、塩化物イオン濃度変動がクロロフィルaの変動を支配していることがわかる。

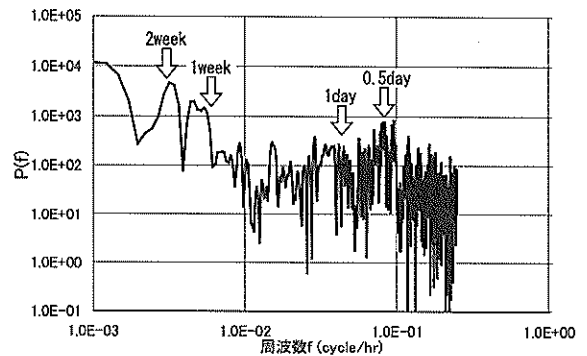


図-4 1996年冬期における木曾川観測点（トミー）のクロロフィルaのスペクトル

### 3.3 長良川観測点との比較

冬期におけるクロロフィルa濃度の変動を、木曾川及び長良川河口域の3測点で比較してみよう。図-5は、1997年1月から12月までの塩化物イオン濃度およびクロロフィルa濃度の時系列データを、木曾川（トミー）及び長良川河口域（イーナおよびジョー）の3測点と比較したものである。クロロフィルa濃度データを見ると、木曾川観測点においては、2月はじめから3月中旬まで、潮汐に応じたかなりの濃度変動があるものの、長期間にわたってブルームが継続して観測されていることがわかる。一方、長良川における二つの観測点ではそれぞれ異なる挙動を示している。河口堰直下のイーナにおいては、小潮の塩分極大に対応したクロロフィルa濃度の極大が間欠的に生じている。河口付近のジョーにおいては、一部欠測が見られるため明確ではないが、クロロフィルa濃度はかなり小さい。塩化物イオン濃度は、大潮・小潮サイクルの変動成分については木曾川観測点（トミー）での変動がもっとも周期的で、濃度の変動幅も大きい。イーナにおいては小潮期における濃度の極大がトミーと同様にみられるものの極大値の濃度はそれほど高くなく、特に3月以降には10000mg/lを超えることがほとんど見られなかった。観測点ジョーにおいては、大潮・小潮周期の変動現象はそれほど明確でなく、小潮においても日変動成分が卓越していた。このこと



は、ジョーは地形上の河口に当たり、相対的に鉛直混合が活発であることを示している。平均の塩化物イオン濃度は高く、特に2月までは10000mg/lを超える現象が継続していた。

以上のような3つの観測点相互の塩化物イオン濃度及びクロロフィル a 濃度の変動特性の違いは、この時期の植物プランクトンのブルームが、ある中間的な塩化物イオン濃度の周辺で生じていたことを示唆しているものと考えられる。このことを明確にするため、イーナ及びジョーにおける塩化物イオン濃度及びクロロフィル a 濃度の相関を調べたのが図-6である。図より明らかに、クロロフィル a 濃度の極大値は塩化物イオン濃度が10000mg/l前後で生じていることがわかる。

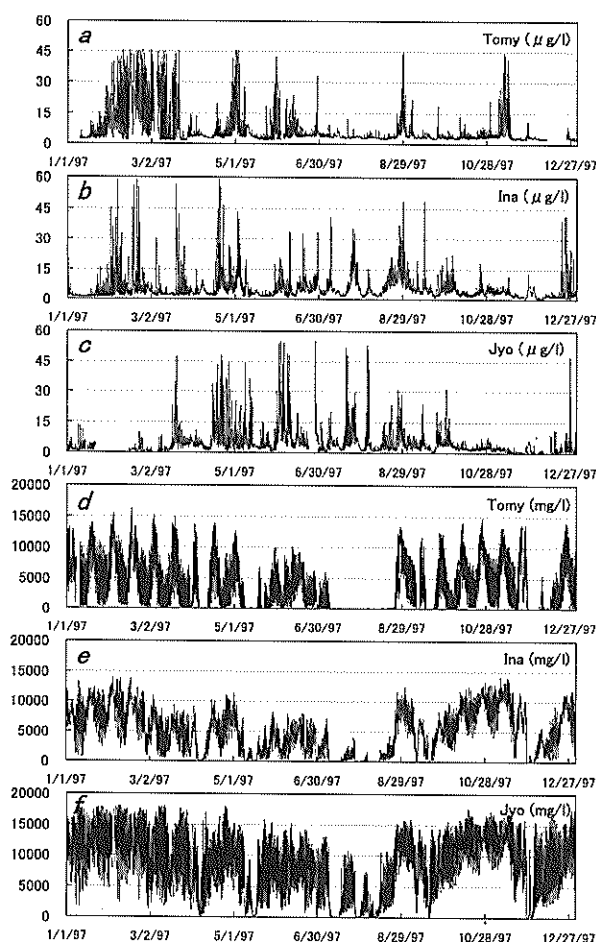


図-5 1997年冬期の、木曾川（トミー）及び長良川（イーナ&ジョー）観測点におけるクロロフィル a 濃度（a~c）及び表層塩化物イオン濃度（d~f）の時系列変化

#### 4. モデルの構築及び解析

##### 4.1 モデルの構築

前章の結果より、クロロフィル a 濃度を支配する要因として、半日及び大潮・小潮という潮汐周期により変動する塩化物イオン濃度の影響が主体的であり、さらに日射量の変化が関与していることが示唆された。また、一般に植物プランクトンの活性は水温や栄養塩濃度に大きく依存しているのが知られている。これらの事から、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。一般の低次生態系モデルにおいては動物プランクトンを変数として扱うモデルがしばしば用いられている。しかしながら、長良川モニタリングデータには冬期にこれらのデータがきわめて不足しているため、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。

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/m<sup>2</sup>)、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。

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

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

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

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

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

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

各項の表現の考え方及び根拠を、以下にまとめてみる。まず、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、ここでは汽水域の大型藻類の成長に対して Montagna ら (2002) が用い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-6 に示す長良川観測点におけるクロロフィル  $a$  の分布に基づいて、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 (例えば、中田 (1993))、水温依存性については Eppley (1972) が与えた指数関数式、光量については Steele (1962) の式、栄養塩については Michaelis-Menten 型の式である。ここで、 $\alpha$  は温度係数、 $I_{opt}$  は最適光量、 $K_m$  は半飽和定数である。

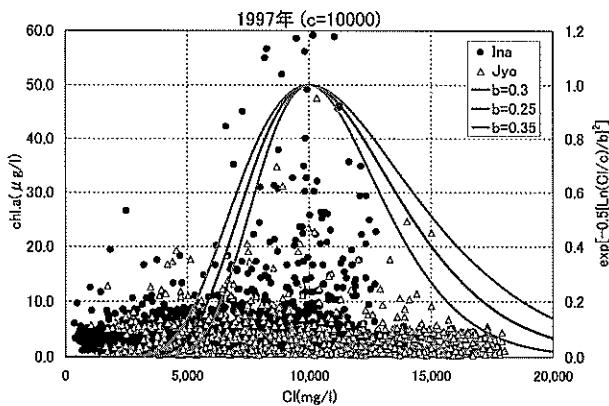


図-6 塩化物イオン濃度とクロロフィル  $a$  濃度の関係。曲線は、植物プランクトン増殖速度の塩化物イオン濃度依存性に関する対数正規分布モデルの結果を示す ( $c=10,000$ )。

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。

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

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

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た、Riley (1956) の式を用いた。係数値は、宍道湖・中海水系で用いられている値 (中田, 2002) を用いた。水深  $z$  については、ここでは便宜的に 1 m とした。

木曾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イーナにおいて全窒素 (TN) の測定値があるに限られている。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ざるを得ない。特に木曾川については推定するデータが全くないため、以下の木曾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) から溶存無機態窒素濃度を推定し、モデル計算に用いた。

次に、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、 $K_2$  は  $0^\circ\text{C}$  における呼吸速度係数、 $\beta$  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 (1993) 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。

それぞれの係数値は、汽水である宍道湖・中海水系に適用された Nakata et al. (2000)、あるいは中田 (2002) における値を基準とした。一部は試行錯誤的に求めた。係数の値と出典を表-1 に示す。

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。

冬期においては木曾川等の伊勢湾に注ぐ河川流量が低下し伊勢湾水の塩分は相対的に高い。そのため、冬期の木曾川河川水と伊勢湾海水の密度差は夏期と比較して大

大きく、感潮部では混合力が弱くなる。夏期には大潮期には強混合型、小潮期には弱混合型であるのに対して、冬期には緩混合～弱混合が支配的となる(須賀,1979)。クロロフィル a 濃度が塩分と連動して変動しているのは、塩化物イオン濃度の中間的な層に渦鞭毛藻が存在し、潮汐によりこれらの層が移流しているためであると考えられる。

このような河川感潮域の水質・生態系解析においては、混合形態の変化を記述出来る、流体力学モデルと植物プランクトン増殖モデルを組み合わせる事が有益である(例えば岡田・中山,2002)。しかしながら、混合形態が変化する場の解析は必ずしも容易ではない上に、境界条件を与える場所での観測値が存在しない。さらに、渦鞭毛藻には遊泳力があり、好適な塩分(塩化物イオン濃度)条件の層に移動する事が知られている。そのため、その移動性をどうモデル化するかという問題も生じる。本研究の主たる対象とする木曾川においては、冬期における塩分変動がかなり規則的であることから、安定した流動条件の下で植物プランクトンの増殖が生じていることが示唆される。これらの事から、本研究においては力学モデルとの連結は行わず、簡便な方法でクロロフィル a の変動を扱う事を試みた。すなわち、多層の塩分層  $Cl_i$  毎に適応した植物プランクトン (chl. a<sub>i</sub>) が存在すると考え、各層について独立してモデル式を計算して、クロロフィル a 濃度の時間変化 chl. a<sub>i</sub>(t) を求めた。その上で観測値の塩化物イオン濃度に応じて対応する層のクロロフィル a 濃度の計算値を選択する事とした。本研究では塩化物イオン濃度層の分割  $\Delta Cl$  を 1000mg/l 毎とし、計17層に分割した。図-7に、モデルの概念図を示す。

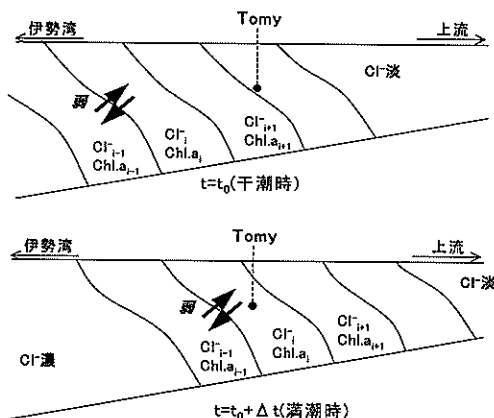


図-7 冬期の感潮部における混合の様子およびモデル概念図

表-1 パラメータの値(単位)と出典

$b = 0.3$	本研究
$c = 10,000 \text{ (mg/l)}$	本研究
$k_0 = 0.464 \text{ (m}^{-1}\text{)}$	中田 (2002)
$A_1 = -0.026 \text{ ((}\mu\text{g/l)}^{-1} \text{ m}^{-1}\text{)}$	中田 (2002)
$A_2 = 0.211 \text{ ((}\mu\text{g/l)}^{-2/3} \text{ m}^{-1}\text{)}$	中田 (2002)
$z = 1 \text{ (m)}$	本研究
$K_1 = 0.0085 \text{ (h}^{-1}\text{)}$	本研究
$K_2 = 8.9 \times 10^{-4} \text{ (h}^{-1}\text{)}$	本研究
$\alpha = 6.33 \times 10^{-2} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	Nakata et al. (2000) 中田 (2002)
$\beta = 5.24 \times 10^{-2} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	Nakata et al. (2000) 中田 (2002)
$\gamma = 6.93 \times 10^{-2} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	Nakata et al. (2000) 中田 (2002)
$Km = 0.0042 \text{ (mg/l)}$	中田 (2002)
$m_0 = 2.0 \times 10^{-5} \text{ ((}\mu\text{g/l)}^{-1} \text{ h}^{-1}\text{)}$ (木曾川)	本研究
$m_0 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ ((}\mu\text{g/l)}^{-1} \text{ h}^{-1}\text{)}$ (長良川)	

#### 4.2 木曾川河口域への適用

本モデルを、まず木曾川河口域観測点(トミー)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。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-8に示す。

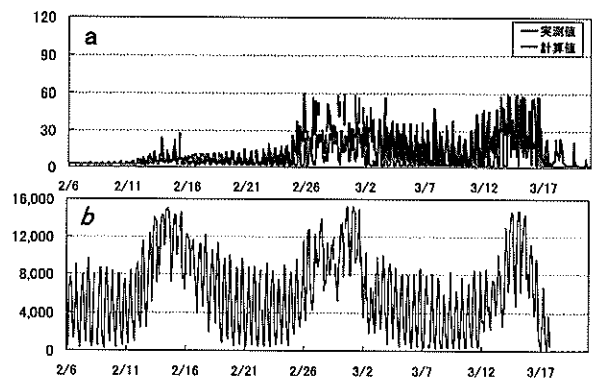
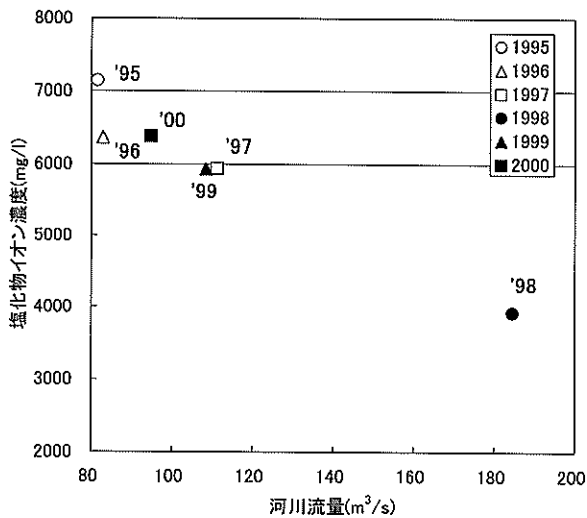


図-8 クロロフィル a の計算結果及び実測値の比較 (a, (μg/l)) と塩化物イオン濃度 (b, (mg/l)) の時系列変化 (1996年, 木曾川観測点トミー)



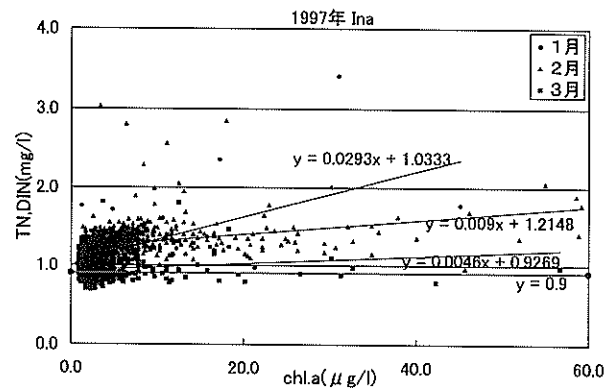
図一11 冬期における平均流量（木曾川犬山観測点）と塩化物イオン濃度平均値（トミー）の比較（数字は年を示す）

#### 4.3 長良川河口域への適用—栄養塩の影響について—

長良川における観測点イーナでは総窒素(TN)のデータが採取されている。解析の主たる対象として木曾川の水質自動監視装置で得られたデータをここまで解析して来たが、栄養塩のクロロフィル 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。そこでイーナで得られた塩化物イオン濃度、TN のデータを利用して栄養塩の変化を推定する。

植物プランクトンの増殖に直接関わるのは無機溶存態窒素 (DIN) である。水質自動監視装置で得られるのは TN だけであるため、正確な DIN を算出するのは困難であるが以下の方法で DIN を推定し、モデル式に組み込んだ。

1997年の1月から3月までの、クロロフィル a と TN の相関関係を示す散布図を図一12に示す。1月、2月、3月のデータをそれぞれ色分けして、各月について近似直線を引いた。散布図に着目すると、2月から3月にかけて、クロロフィル a 濃度に関係なく TN の濃度が全体的に下がっており、散布図全体を見てもその下限は概ね 0.9mg/l となっているのが分かる。これは、対象期間中の河川流量が少なく安定している中で、栄養塩、つまり DIN が徐々に涸渇し、3月には TN の大部分が有機態窒素あるいはプランクトン態窒素で占められているためであると解釈出来る。冬期においては時間の経過に関係なくデトリタス態窒素の濃度は 0.9mg/l と殆ど変化せず、TN の濃度変動には DIN とプランクトン態窒素 (chl.a と相関がある部分) の変動が影響する。



図一12 長良川観測点（イーナ）におけるクロロフィル a 濃度と TN の比較

このような考えに基づき、月毎に描いた近似直線の y 切片と、下限ライン  $y=0.9$  との差をその月を代表する DIN 濃度とみなし、その濃度をそれぞれの月の中間日の濃度と仮定し、これらに挟まれた日については直線内挿する事により各日の DIN を推定した。半飽和定数  $K_m$  は、中田 (2002) に基づき  $0.042\text{mg/l}$  とし、毎日の栄養塩制限項式 (5) を求めた。

イーナ及びジョーにおける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一13に示す。計算開始直後は、実測値が激しく濃度変動しているのに対し、殆ど変動が現れてこないが、時間経過と共に潮汐による濃度変動を実測値に近い形で再現出来るようになっていく。更に、木曾川を対象とした計算結果では、計算の後半にあたる3月にはどのケースでも計算値が過大となる傾向にあったが、計算値に DIN の項を組み込んだ長良川のケースでは、推定された DIN 濃度が2月から3月にかけて減少傾向にあるので、計算値の過大化が抑制されているのが伺える。よって3月の計算値は、実測値のオーダーをほぼ忠実に再現しているのがグラフより見てとれる。

イーナ及びジョーにおける1996年及び1997年のモデル計算においては、枯死速度係数  $m_0$  についても再検討を行った。すなわち、木曾川における値 ( $2.0 \times 10^{-5} ((\mu\text{g/l})^{-1} \text{h}^{-1})$ ) を用いた場合にはクロロフィル a 濃度が過大となるため、長良川においては試行錯誤的に適合度のよい値を求め、最終的に  $2.0 \times 10^{-4} ((\mu\text{g/l})^{-1} \text{h}^{-1})$  とした。長良川河口堰においては、堰の存在によって物理的に流れが弱められており (有田・鯉淵, 2003) 滞留性が高まっている。このため、捕食者の動物プランクトンなどの増殖には適しており、自然河川である木曾川河口

モデル式の初期値は2月6日0時の実測値を与えた。この時点においては、塩化物イオン濃度の変化によってもクロロフィルa濃度の値に変化が見られない事から、各層において同じ初期値を与えた。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とっている。実測値の1回目と3回目のピークに対応した計算値は、実測値とややかけ離れた値を示しており、特に3回目については計算値がかなり過大となる傾向が見られる。しかし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。後半部分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からと推測される。計算対象期間には、終了時付近で大きな出水が見られるものの、それ以外では河川流量は少ないレベルで安定しており、栄養塩が次第に涸渇したものと推定される。

ここで、この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。1997年1月11日から1997年3月26日及び1998年1月30日から1998年3月14日におけるクロロフィルa濃度の実測値及び計算値の時系列変化を図-9に示す。計算で用いる係数は1996年と同一とする。実測値を見ると、1997年のこの時期は全般に濃度変動が激しく、逆に1998年は全般的に低い値を示しているが、計算値はそれぞれの実測値の特徴をほぼ忠実に再現している。また、どちらのケースも3月の小潮時で塩分濃度が平均的に上昇すると、計算値も過大となる。

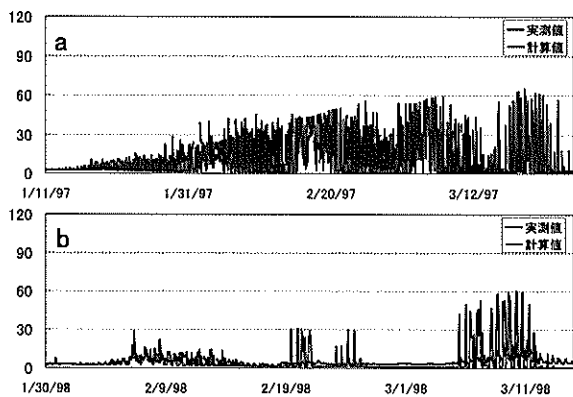


図-9 1997年 (a) 及び1998年 (b) のクロロフィルaの計算結果及び実測値の時系列変化の比較 ( $\mu\text{g/l}$ ) (木曾川観測点トミー)

1997年及び1998年の顕著な違いの理由を調べるため、以下のような数値実験を試みた。すなわち、1997年のケースをベースとし、塩化物イオン濃度のみ1998年のデータを採用した場合、日射量のみ1998年のデータを採用した場合の2通りの計算を行った。結果を図-10に示す。

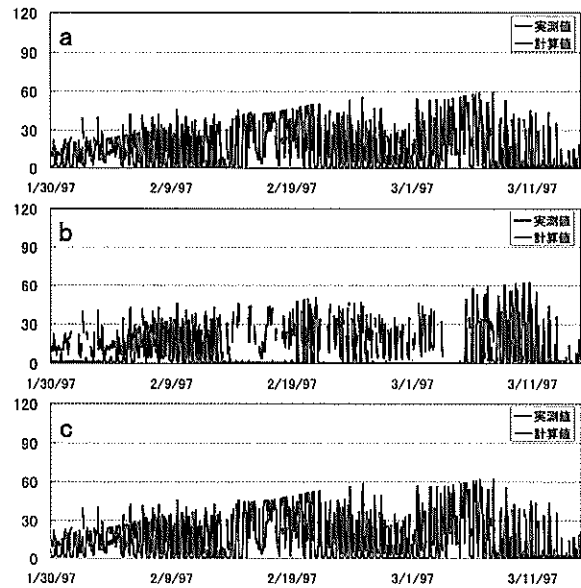


図-10 クロロフィルaの通常の計算結果 (1997年の入力値) (a), 及び1998年の塩化物イオン濃度 (b), 日射 (c) と交換した場合の計算結果の比較 ( $\mu\text{g/l}$ )

日射量を変えたケースでは顕著な変化は見られなかったのに対し、塩化物イオン濃度を変えたケースではクロロフィルa濃度の極大が間欠的となり、計算の末期を除いて、全般的に濃度レベルが低い結果となった。このことから、1998年の低クロロフィルa現象は、塩化物イオン濃度が全般的に低下しており、最適の塩化物イオン濃度環境がきわめて限定された期間にしか生じなかった事が原因であると考えられる。

では、なぜ1998年には塩化物イオン濃度が低かったのであろうか。河口域の塩分は河川流量によって影響を受けることは容易に想像される。そこで、この点を明確にするために、各年の2月から3月15日までのデータに対して、塩化物イオン濃度の平均値と木曾川流量 (大山観測点) 平均値を比べたのが、図-11である。明らかに、他の年に比べて1998年は流量が大きい。また、流量の変動もこの年は大きいことが流量年表から見いだされる。このことが塩化物イオン濃度の低下、ひいては植物プランクトンの低いブルームの原因であると考えられる。

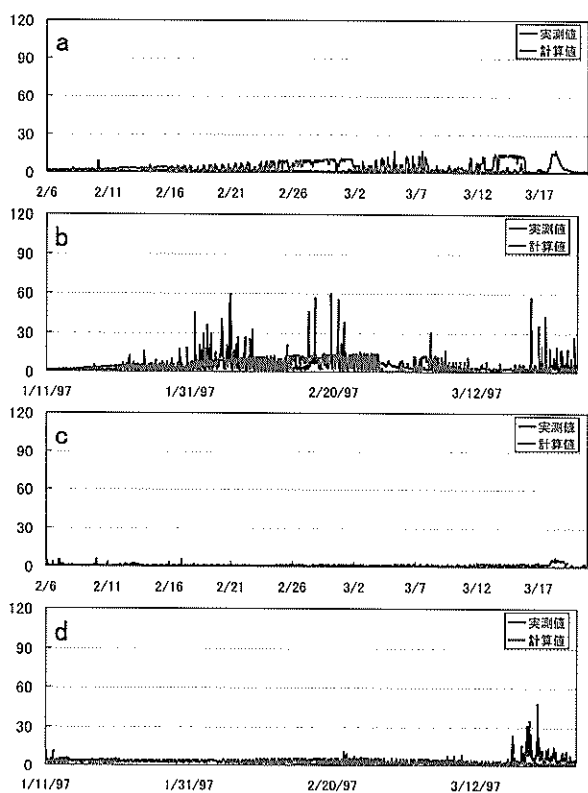


図-13 長良川観測点（イーナ (a, b) 及びジョー (c, d)）におけるモデルによる計算結果及び実測値の時系列変化の比較 ( $\mu\text{g/l}$ ) (1996年 (a, c) 及び1997年 (b, d))

部よりも捕食圧が高い可能性があると考えられる。但し、河口堰モニタリングにおける動物プランクトン調査はほとんどが堰上流側で行われ、本解析に利用可能なデータはほとんどないのが現状である。

長良川における計算結果は、特に97年にみられるような間欠的な chl. a の増加現象をあまり再現できなかった。これは本モデルの構造上の限界であると考えられる。

図-13に示した計算ケースは長良川河口域を対象とした計算結果であるが、この期間の流量は木曾川についても低水流量時に相当するため、木曾川河口域においても同様な栄養塩の枯渇が3月期に生じていた可能性がある。そのため、TNの経時計測が行われていれば、同様な手法によってDINの項を導入する事により、3月の計算値がやや過大な結果を説明できる可能性が示唆される。

#### 4.4 伊勢湾奥部の水質との比較

長良川及び木曾川のモニタリングと時期がほぼ並行する形で、中部国際空港の建設に伴う環境影響評価を行うために伊勢湾全体で水質調査を含む各種調査が行われている（中部国際空港(株)・愛知県, 1999）。長良川及び木曾川河口に近い伊勢湾観測地点における水質の観測値を、長良川及び木曾川観測点（イーナ, トミー）におけるものと比較したのが図-14である。全窒素 (TN) 濃度については、伊勢湾観測点の値は長良川（イーナ）の約1/2程度である。クロロフィル a 濃度については、夏季において伊勢湾の方が高い場合もあるが、解析期間である1-3月については、伊勢湾の方が低い。特に感潮域で大きなブルームが見られた1996年及び1997年については、伊勢湾側ではそのような顕著なブルームは生じていなかった。

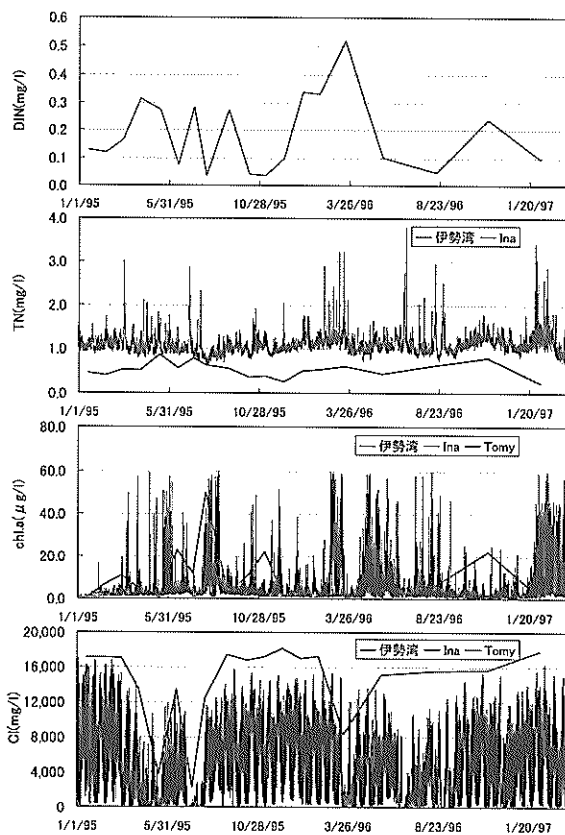


図-14 長良川観測点及び伊勢湾奥部における水質の比較

#### 4.5 感度解析

冬期における植物プランクトンの変動機構に対して、塩化物イオン濃度を始めとして各環境因子の影響度を調べるため、モデルのパラメータについて感度解析を行った。対象としたパラメータは、塩化物イオン濃度に関しては  $b$  (塩化物イオン濃度の適応度の幅) および  $c$  (最適塩化物イオン濃度) とし、日射量については最適光量  $I_{opt}$ 、水温については光合成速度、呼吸速度および枯死速度に係わる温度係数 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )、捕食速度の影響として  $m_0$  を選択した。これらのパラメータについて、木曾川における解析で用いたパラメータの組を基本ケースとし、それらの0.5倍、2倍のケースについて結果を比べた。但し、 $c$  については、2倍の塩化物イオン濃度 (20000 mg/l) は存在しないので、その代わりに1.5倍を用いた。図-15に解析の結果を示す。

最も影響度が大きいのは、植物プランクトンの増殖速度に直接影響する最適光量  $I_{opt}$ 、および光合成速度の水温係数  $\alpha$  である。呼吸速度および枯死速度に係わる温度係数 ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) については感度が低い結果となった。塩化物イオン濃度へ適応度を示すパラメータ  $b$  および  $c$  については、2月末及び3月中旬におけるクロロフィル a の極大値に対してはほとんど影響しない。しかしながら、2月中旬及び3月初旬においてクロロフィル a 濃度が極小となる時期 (大潮期に相当する) においては、これらのパラメータによって敏感に影響を受ける。例えば、小さめの  $b$  ( $=0.15$ ) および大きめの  $c$  ( $=15000$ ) の値の場合には、計算結果は過小評価となり、反対に大きな  $b$  あるいは小さな  $c$  の値の場合には、大潮時におけるクロロフィル a 濃度の極小値がほとんど生じず、ほぼ単調に増加する傾向となった。また、半日もしくは日周期の変動についても、小さめの  $b$  ( $=0.15$ ) および大きめの  $c$  ( $=15000$ ) の値の場合には、計算結果は実測値よりもさらに敏感に変動する結果となった。この理由は、塩化物イオン濃度の適応度のパラメータ (最適値  $c$  および適応幅  $b$ ) は、塩化物イオン濃度環境に対する植物プランクトンの鋭敏性を示すためである。大潮・小潮サイクルに応じた塩化物イオン濃度環境の変化の影響を示すためには、これらのパラメータが極めて重要であることがわかる。

枯死速度係数  $m_0$  (本モデルでは捕食速度の影響を示す) の影響については、3月以降、特に3月中旬 (小潮期) におけるクロロフィル a 濃度の極大現象に対して影響が大きい。この時期には植物プランクトンの増殖と枯死がほぼ均衡し、濃度が平衡に達する。そのため、他のパラメータが一定であれば、枯死速度係数  $m_0$  は、クロロフィ

ル a 濃度の極大値を決定する因子であるといえる。

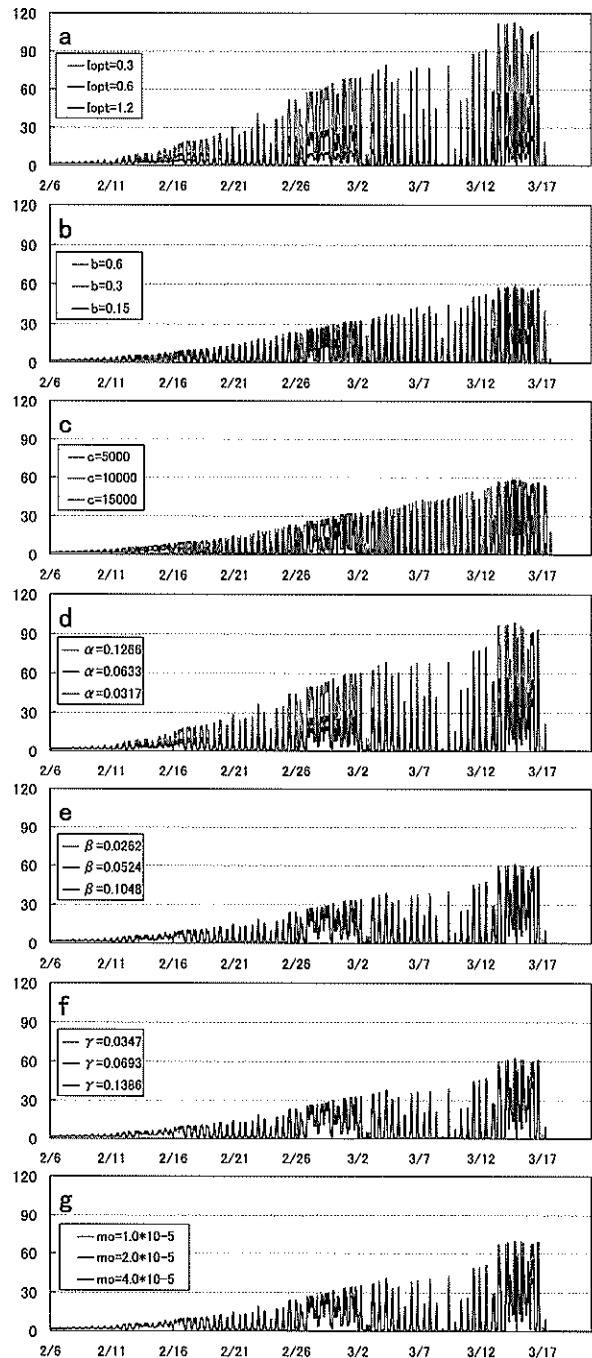


図-15 感度解析の結果 (1996年における基本ケースをもとに、各パラメータの値を0.5倍、及び2倍にした時の計算結果の比較 ( $\mu\text{g/l}$ )。但し、最適塩化物イオン濃度  $c$  については、2倍の代わりに1.5倍の結果を示す)

## 5. まとめ

木曾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。その結果として、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の変動に応じて濃度変動する塩化物イオン濃度の影響を強く受け、塩化物イオン濃度が平均的に高くなる小潮時に高くなり逆に塩化物イオン濃度が平均的に低くなる大潮時には低くなる事が確認された。また、冬から春先にかけて日射量が漸増していく過程で、クロロフィル a も、特に全般的に濃度が低い大潮時において、徐々に濃度が上昇していくのが確認された。冬期の河川感潮域で一般的に渦鞭毛藻を主とする海産性の植物プランクトンのブルームが生じると言われているが、この解析の中で裏付けがなされたと言える。

このことから、植物プランクトンの挙動に影響を与える主要因として、塩分及び日射が挙げられる。よってこれらの関数で表される、クロロフィル a 濃度の変動予測モデルを構築し、複数の年度で計算を行い、実測との比較を行った。計算後半部分で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、河川からの栄養塩の供給が少なくなるこの時期に、モデルの中で栄養塩の影響を全く考慮していなかった事によるものと考えられた。よって長良川の水質自動監視装置（イーナ）では総窒素を連続観測していたので、このデータを使用して無機溶存態窒素を推定し、モデルに栄養塩の項を組み込んでイーナにおけるモデル計算を行い、実測との比較を行った。この結果、後半部分で過大傾向にあった計算値が抑えられており、モデル自体の再現性が更に高まった。

塩分、日射、及び栄養塩を使用して簡易な植物プランクトンの濃度変動予測を立てる事が可能となった。実際には植物プランクトンは食物連鎖という枠の中では生産者という立場にあり、この連鎖において動物プランクトンや底生の二枚貝といった消費者の摂餌の対象となっている。無機栄養塩についても、今回は窒素にのみ注目したが、リンや珪素といった物質の影響も少なからず存在している。これらを考慮したモデルを構築すれば更に精度が上がるものと思われ、今後の課題となっていくであろう。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 A「長良川河口堰が汽水域生息場の特性に与えた影響に関する研究（研究代表者：金沢大学玉井信行）」の補助を受けた。特に玉井信行教授には、本研究のきっかけを与えて頂いた。また、東海大学中田喜三郎教授には、伊勢湾の観測値の所在をご教示頂いた。お二人の熱心なお誘いと親切なご教示がなければこの研究はあり得なかった。さらに、研究の最終段階では東洋建設(株)山崎智弘氏に解析及びとりまとめにご尽力頂いた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 有田正光・鯉淵幸生（2003）：長良川河口堰が堰下流域の塩水侵入に与えた影響、「長良川河口堰が汽水域生息場の特性に与えた影響に関する研究」文部科学省科学研究費補助金基盤研究（A）（1）研究成果報告書，pp.17-40.
- 宇野木早苗（1996）：海から川を考える，海の研究，Vol.5，pp.327-332.
- 大谷修司（1997）：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，沿岸海岸研究，Vol. 35，pp. 35-47.
- 岡田知也・中山恵介（2002）：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.
- 岡田知也・中山恵介（2003）：荒川河口域における混合形態に伴う Chlorophyll-a 動態と海域への河川流入負荷量変動，国土技術政策総合研究所資料，第87号，pp.1-23.
- 気象庁編集：気象庁月報，地上気象観測資料 CD-ROM 版
- 栗原康（1988）：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。
- 建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社（2001）：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。
- 建設省河川局（1999）：平成10年度流量年表，建設省河川局。
- 建設省河川局（1998）：平成9年度流量年表，建設省河川局。
- 建設省河川局（1997）：平成8年度流量年表，建設省河川局。
- 建設省河川局（1996）：平成7年度流量年表，建設省河川局。
- 建設省河川局（1995）：平成6年度流量年表，建設省河



- 川局.
- 西條八東・奥田節夫 (1996) : 河川感潮域－その自然と変貌－, 名古屋大学出版会, 248p.
- 須賀堯三 (1979) 感潮河川域における塩水くさびの水利に関する基礎的研究. 土木研究所資料, No.1537, 255 p.
- 武田誠・松尾直規 (2000) : 統計的手法を用いた長良川河口堰モニタリング資料の解析, 環境工学研究論文集, No.37, pp.369-378.
- 玉井信行編 (2003) : 長良川河口堰が汽水域生息場の特性に与えた影響に関する研究, 文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (A) (1) 研究成果報告書, pp.1-261.
- 中部空港(株)・愛知県 (1999) : 中部空港建設事業及び空港島地域開発用地埋立造成事業に関する環境影響評価書 (資料編), 623p.
- 中田喜三郎 (2002) : アジアにおける水資源域の水源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.
- 中田喜三郎 (1993) : 生態系モデル－定式化と未知のパラメータの推定法－, 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.
- 中村由行・藤野智亮 (2002) : 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.
- 中村由行・栗木秀治・藤野智亮 (2002) : 河口域における溶存酸素濃度の動態－長良川河口堰下流部におけるモニタリングデータの解析－, 港湾空港技術研究所報告, 第41巻, pp.1-84.
- 村上哲生 (2002) : 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.
- 村上哲生・服部典子・藤森俊雄・西條八東 (2001) : 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.
- Eppley, R. W. (1972) : Temperature and phytoplankton growth in the sea, Fisheries Bulletin, Vol.70, pp.1063-1085.
- Gallegos, C. L. and Jordan, T. E (2002) : Impact of the spring 2000 phytoplankton bloom in Chesapeake Bay on optical properties and light penetration in the Rhode River, Maryland, Estuaries, Vol. 25, No. 4A, pp.508-518.
- Horne, A.J. and Goldman, C.R. (1994) : LIMNOLOGY, McGraw-Hill.
- Miyata, K. and A. Hattori (1986) : Distribution and seasonal variation of phosphorus in Tokyo Bay, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol.42, pp.241-254.
- Montagna, P.A., R. D. Kalke, and C. Ritter (2002) : Effect of restored freshwater inflow on macrofauna and meiofauna in upper Rincon Bayou, Texas, USA, Estuaries, Vol.25, 1436-1447.
- Nakata, K., F. Horiguchi, and M. Yamamuro (2000) : Model study of Lakes Shinji and Nakaumi - a coupled coastal lagoon system, J. Marine Systems, Vol.26, pp.145-169.
- Riley, G. A. (1956) : Oceanography of Long Island Sound 1952-54. I. Physical Oceanography, Bulletin Bingham Oceanography Coll., Vol.15, pp.15-46.
- Sin, Y., R. L. Wetzel, and I. C. Anderson (1999) : Spatial and temporal characteristics of nutrient and phytoplankton dynamics in the York River Estuary, Virginia: Analysis of long-term data, Estuaries, Vol.22, pp.260-275.
- Schuchardt, B. and M. Shirmer (1991) : Phytoplankton maxima in the tidal freshwater reaches of two plain estuaries, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.32, pp.187-206.
- Snow, G. C., J. B. Adams, and G. C. Bate (2000) : Effect of river flow on estuarine microalgal biomass and distribution, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.51, pp.255-266.
- Steele, J. H. (1962) : Environmental control of photosynthesis in the sea, Limnology and Oceanography, Vol.1, pp.61-70.
- Uye, S., T. Shimazu, M. Yamamuro, Y. Ishitobi, and H. Kamiya (2000) : Geographical and seasonal variations in mesozooplankton abundance and biomass in relation to environmental parameters in Lake Shinjio - Ohashi River - Lake Nakaumi brackish-water system, Japan, J. Marine Systems, Vol.26, pp.193-207.

港湾空港技術研究所資料 No. 1066

2003.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright © (2003) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。