

木曽川河口域における植物プランクトンの冬期変動予測モデル

栗 木 秀 治*・中 村 由 行**

木曽川河口部において、冬期のクロロフィル a 濃度の変動特性を解析した。クロロフィル a 濃度は、塩化物イオン濃度と正の相関を持ちながら変動し、大潮小潮周期、及び半日の干満周期の潮汐の影響を受ける事が示された。日射量についても緩慢ながら依存している事が示された。塩化物イオン濃度、日射量、水温を入力変数として、クロロフィル a 濃度変動を再現する、簡易なモデルを構築し、実測値との比較を行った。その結果、モデル計算の結果は実測の変動特性を良く再現する事が出来、モデルの妥当性が示された。

1. はじめに

伊勢湾等の閉鎖性内湾において、開発により消滅した干潟、藻場等の整備に代表されるように、自然再生に対する関心が高まりを見せている。内湾の水質を語る上で、流域圏と沿岸海域を一体とした発想による管理が重要である。河川と内湾の接点ともいべき河口部においては、淡水と海水が出会う場であり、潮汐や河川流量の影響を受け、特有の流れや混合をとることが知られている。同時に河口域は塩分等の環境条件が急激に変化する場であり、この特性に適した独特の生態系を有している（例えば栗原, 1988; 西條・奥田, 1996）。特に近年、河川感潮域や汽水湖沼においては、海産性の渦鞭毛藻のブルームが報告されるようになってきている（Horne・Goldman, 1988; Gallegos・Jordan, 2002）。例えば長良川河口部等では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。しかし、その要因や変動のメカニズムについては未知の部分が多く、従来の生態系シミュレーションにおいても再現が困難な場合が多い（武田・松尾, 2000; 岡田・中山, 2002; 中田, 2002）。その一方で、長良川及び木曽川河口部周辺では、長良川河口堰の建設・運用に伴い長年にわたり蓄積されたモニタリングデータ（建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社, 2001）があり、特に木曽川においては河口堰等の人工構造物が存在しないことから、河口域における本質的な植物プランクトンの変動機構を解明する事が可能であると考えられる。そこで本研究では、木曽川河口域におけるクロロフィル a 濃度のデータに着目し、塩分、潮汐、日射、水温等の環境条件によってクロロフィル a 濃度の変動を推定する、簡易なモデルを構築し、濃度変動機構を解析する。

2. 研究の方法

長良川河口堰の建設、運用に伴う水質・流況の現況を把握するため、長良川及び木曽川河口部周辺には水質自

動監視装置が設置され、連続観測が行われており、データは一般に公開されている（建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社, 2001）。本研究は、その中の木曽川河口から 8.7 km 上流左岸にある観測地点（通称 Tomy, 図-1 参照）で採取されたデータを用いた。気象データについては名古屋市内のデータ（気象庁, 1996-1998）を採用した。更に流量については、河川局のデータ（建設省河川局, 1995-1999）を用いた。

一例として、木曽川での水質自動監視装置から得られた、1995 年及び 1996 年の各 1 年に渡る表層塩化物イオン濃度とクロロフィル a 濃度の時系列変化を図-2 に示す。季節を問わず、クロロフィル a 濃度が上昇する際、表層塩化物イオン濃度も概ね上昇しているのが伺える。特に 1996 年冬期においては、塩分の上昇に対応したクロロフィル a の極大が周期的にみられる。このことから、クロロフィル a 濃度を支配する要因として、塩分環境の重要性が示唆される。植物プランクトンは季節的に渦鞭毛藻や珪藻などの種の交替がみられ、一年を通じた解析は困難である。夏期には大規模な出水による擾乱が繰り返されるのに対し、冬期には比較的气象が安定しており、河川流量が安定しており洪水流による擾乱が殆ど発生し

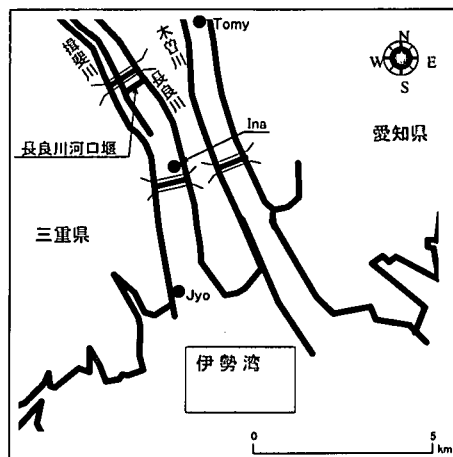


図-1 観測地点位置図

* 正会員 東洋建設株式会社
** 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部

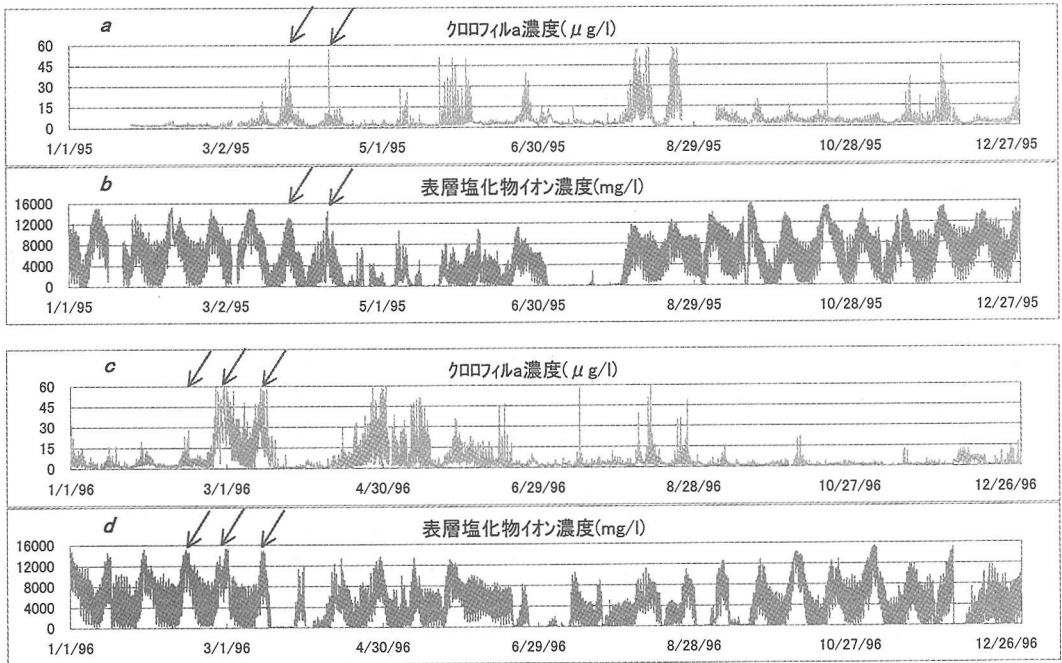


図-2 1995年(a, b)及び1996年(c, d)のクロロフィル-a濃度及び表層塩化物イオン濃度の時系列変化

ないため、周期性を持った塩分環境が長期間維持されている。また、植物プランクトン相も単純であると考えられる。そのため、本研究においては冬期を解析対象とした。

3. 時系列解析及び結果

図-2において、塩分やクロロフィルa濃度の周期的な変動パターンがみられた1996年2月6日～1996年3月20日の期間について、クロロフィルa濃度、表層塩化物イオン濃度、名古屋港の潮位(計算値)、名古屋での全天日射量及び木曾川流量の時系列変化を図-3に示す。塩化物イオン濃度は潮汐の影響を受け、小潮時に高い濃度を示し、大潮時に濃度が低くなる。また、干満に応じて塩化物イオン濃度は1日の中でも大きく変化している。つまり、短周期及び長周期の潮位変動に応じて塩化物イオン濃度は大きく変動することがわかる。また、クロロフィルa濃度と塩化物イオン濃度の時系列変化に注目すると、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濃度が高くなり、逆に大潮時には両者とも低くなる傾向が見られる。1日の中の変動という点では、クロロフィルa濃度も同様に大きく変動している。

以上より、クロロフィルa濃度は塩化物イオン濃度、つまり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ればクロロフィルa濃度も高くなることから海産性植物プランクトンによるクロ

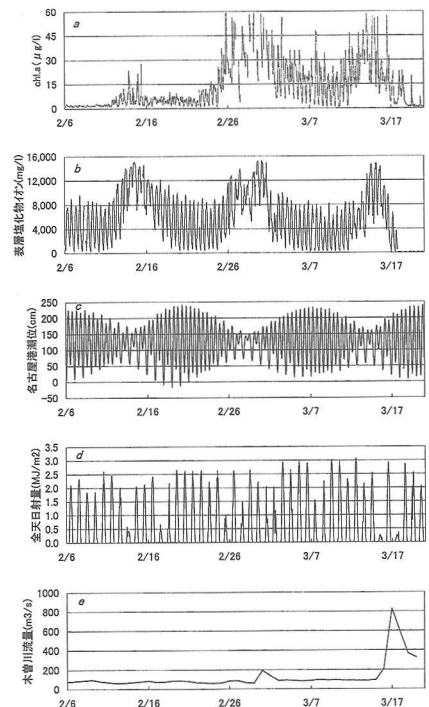


図-3 クロロフィル-a濃度(a)、表層塩化物イオン濃度(b)、名古屋港潮位(c)、全天日射量(d)、木曾川流量(e)の時系列変化

ロフィルaが冬期においては卓越しているのが伺える。全天日射量の時系列変化に注目してみると、時間の経

過に伴い1日の最大値のピークが徐々に高くなっているのが判る。クロロフィルa濃度の時系列変化を見ると、潮汐の影響による上昇、降下は見られるものの平均的にはあるが上昇傾向が見られ、大潮時においても1日の変動の中での最大値が高くなっているのが判る。このことから、日射の増加による、クロロフィルa濃度を増加させる効果は存在しないと推定出来る。

4. モデル式の構築及び実測との比較

3章の解析結果より、クロロフィルa濃度の変動は、半日周期及び大潮・小潮という潮汐周期により変動する塩分の影響及び日射の影響を受ける事が示唆された。さらに、一般に植物プランクトンの活性は水温に大きく依存する事が知られている。これらの事から、クロロフィルa濃度を、塩分、日射、水温等の関数で表されるモデルを構築して、その時系列変化を実測値と比較した。

$$dchl.a/dt = (P - R)chl.a(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$P = f(Cl)g(T, I) \dots\dots\dots (2)$$

$$R = r(T) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $chl.a(t)$ 、 P 、 R 、はそれぞれクロロフィルa濃度、一次生産速度、呼吸（死亡も含む）速度であり、一次生産速度 P は塩化物イオン濃度 (Cl) と水温 (T)、日射 (I) の関数で、呼吸速度 R は水温の関数で表されるものとする。 P 及び R を以下の式として定義した。

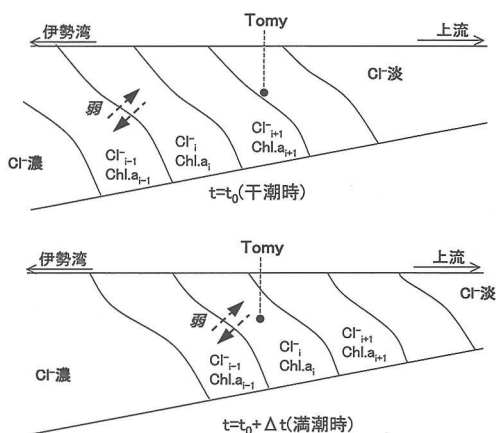
$$\begin{aligned} P &= f(Cl)g(T, I) \\ &= K_1 \exp(\gamma Cl) \exp(\alpha T) I / I_{opt} \\ &\quad \cdot \exp(1 - I / I_{opt}) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$P = r(T) = K_2 \exp(\beta T) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 I_{opt} は最適光強さとする。それぞれの係数は、過去の研究結果及び統計的手法により求めた。

係数は以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= 6.68 \times 10^{-4} \quad (h^{-1}) \\ K_2 &= 2.97 \times 10^{-5} \quad (h^{-1}) \\ \alpha &= 6.33 \times 10^{-2} \quad (^{\circ}C^{-1}) \\ \beta &= 5.24 \times 10^{-2} \quad (^{\circ}C^{-1}) \\ \gamma &= 1.11 \times 10^{-4} \quad ((mg/l)^{-1}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

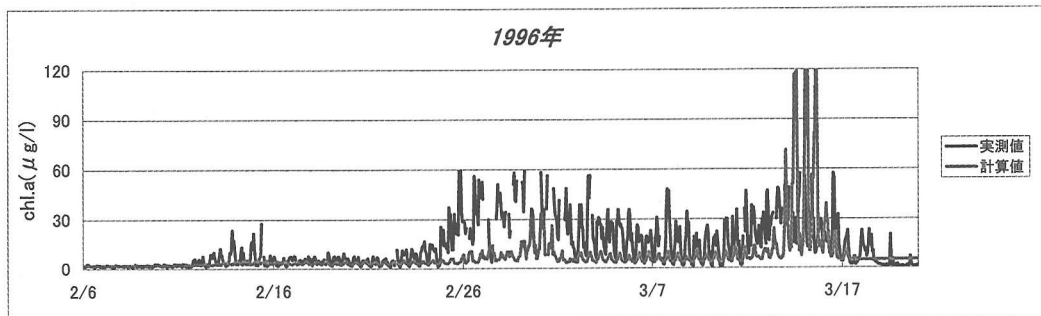


図—4 冬期の感潮部における混合概念図

塩化物イオン濃度は水質自動監視装置から得られる1時間毎のデータを、日射については1日の総量の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における3月の平均値とした。

冬期の木曾川河口感潮部は、河川水と海水との密度差が夏期に比べ大きくなり、感潮部において混合力が弱くなる。つまり弱混合～緩混合が支配的となる（例えば須賀, 1979）（図—4 参照）。クロロフィルa濃度が塩分の変動と連動しているのは、より高塩分の層に渦鞭毛藻が存在し、潮汐によりこれらの層が観測地点を移流している結果であると考えられる。

このような河川感潮域の解析においては、通常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普通である（例えば岡田, 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、渦鞭毛藻は移動性があり、好適な塩分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。以上の事から、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



図—5 モデルによる計算結果及び実測値の時系列変化

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 ($chl.a_i$) が存在すると考え、各層について独立して基礎式を解き、クロロフィル a の時間変化 $chl.a_i(t)$ を求めた。その上で、観測値の塩分に応じて、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。本研究では層分割を Cl 濃度 1000 mg/l 毎に行い、計 17 層に分割した。

1996 年 2 月 6 日～1996 年 3 月 20 日までの、モデルの計算結果を図-5 に示す。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、塩分の変化によってもクロロフィル a の値の変化がみられない事から、各層において同じ初期値を与えた。計算期間中、小潮は 3 回あらわれており、クロロフィル a の実測値がそれに依り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過大な傾向にあるのは、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。計算対象期間には大きな出水もみられず、栄養塩が次第に涵濁した事が推定される。

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。図-6 に 1997 年 1 月 11 日～1997 年 3 月 26 日及び

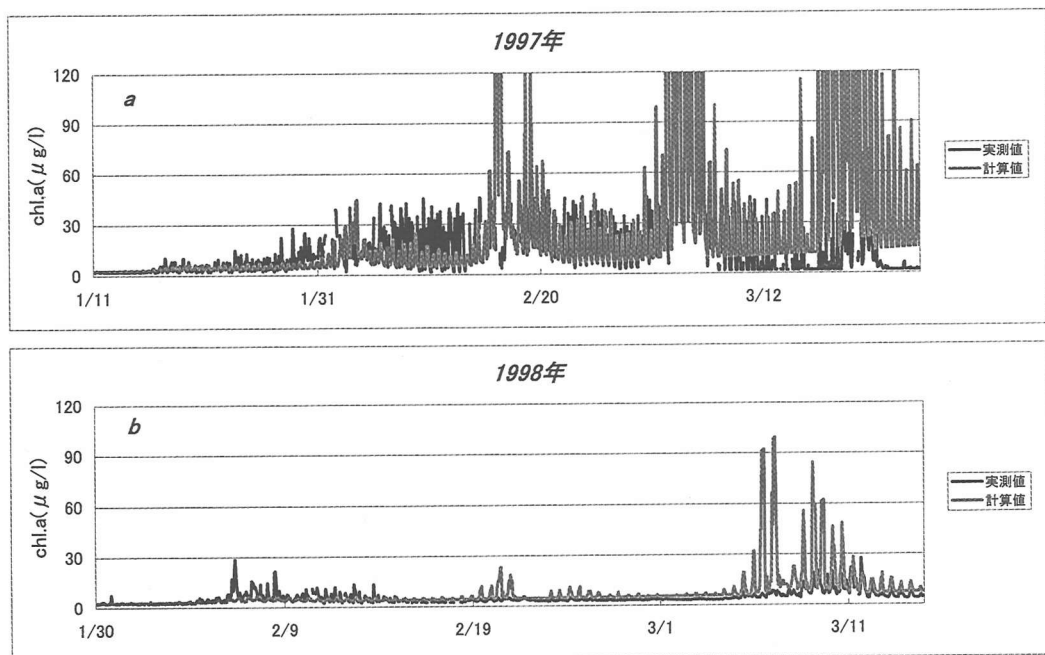


図-6 1997 年 (a) 及び 1998 年 (b) の計算結果及び実測値の時系列変化

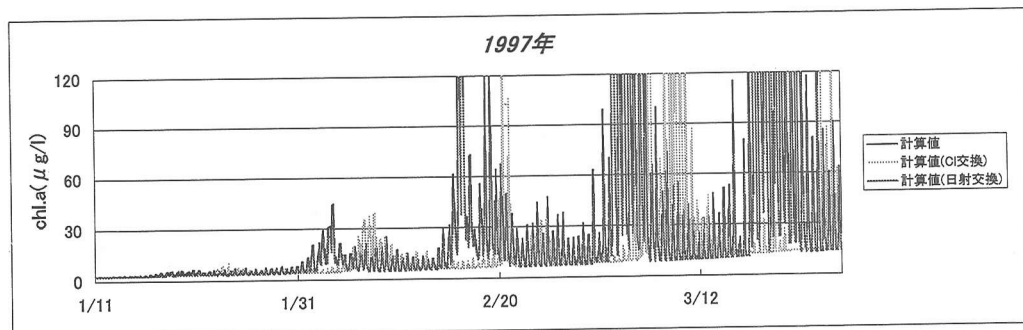


図-7 通常の計算結果 (1997 年の入力値) 及び塩化物イオン濃度、日射をそれぞれ 1998 年のものと交換した場合の計算結果の比較

1998年1月30日～1998年3月14日までのクロロフィルaの実測値及び計算値の時系列変化を示す。係数は1996年と同一である。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。

1997年及び1998年の顕著な違いの理由を調べるため、以下の様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、及び日射のみ1998年のデータを採用した場合の計算を行った。図-7に時系列計算の結果を示す。日射を変えた場合には顕著な変化は見られなかったのに対し、塩分を変えたケースでは、クロロフィルaの量が顕著に低下した。このため、1998年の低クロロフィル現象は全般的に塩分が低下した事が原因であると考えられる。

以上から、今回冬期のクロロフィルa濃度を予測する際、本研究により構築したモデルはその変動パターンをほぼ忠実に再現したものと結論づけられる。モデル式で使われた係数についてもその妥当性が証明されたと思われる。

5. 結 論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- ・水質データを採取した地点、つまり木曾川河口より上流8.7km地点では、表層塩化物イオン濃度は、大潮・小潮といった長期にわたる潮汐の周期変動を受け、小潮時には平均的に濃度は高くなり、逆に大潮時には濃度は低くなった。これにより、クロロフィルa濃度も小潮時に高くなり、大潮時には低くなった。また半日の潮汐の干満に伴う変動を受け、塩化物イオン、クロロフィルa濃度ともに連動して変動する事が確認された。

- ・冬から春先にかけて、日射量も漸増していく過程でクロロフィルa濃度も徐々に上昇していく事が確認された。

- ・冬期のクロロフィルa濃度の変動を予測するモデル式を構築した。モデルは、塩化物イオン、水温、日射の関数で表わされる。解析の後半部分を除いて、上述のクロロフィルaの濃度変動特性をほぼ再現する事が出来た。

本モデルでは、栄養塩の影響がモデル式に考慮されていない。栄養塩の影響を組み込めば再現精度はより高くなると推測される。

参 考 文 献

- 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.
- 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.
- 西條八束・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, pp. 85-105.
- 須賀鏡三 (1979) 感潮河川域における塩水くさびの水理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.
- 中田喜三郎 (2002): 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, 環境章地球環境局編.
- Gallegos, C. L. and T. E. Jordan (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. 4 A, pp.508-518.
- Horne, A. J. and C. R. Goldman (1994): LIMNOLOGY, McGraw-Hill.