

(38) 統計学的手法を用いた長良川河口堰モニタリング資料の解析

Monitoring Data Analysis of Nagaragawa Estuary Barrage
by means of Statistical Method

武田 誠*, 松尾直規*

Makoto TAKEDA* and Naoki MATSUO*

ABSTRACT; The aim of this study is to estimate water quality characteristics in up-stream area of Nagaragawa estuary barrage based on statistical analyses of "Nagaragawa Estuary Barrage Monitoring Data". First, spectra of chlorophyll-a and DO data are evaluated by means of FFT(First Fourier Transform). Chlorophyll-a data have fluctuation component of about 10 day period affected by flood inflow in addition to fluctuation components of seasonal period and day period. Secondly, governing factors of chlorophyll-a and DO and their characteristics are investigated by means of Quantification Theory I. It is found that water temperature and growth of thermal stratification are the most important factors for the absolute value of chlorophyll-a and DO, though the governing factors seasonally change.

KEYWORDS; Water quality characteristics, Nagaragawa estuary barrage, Statistical analysis, FFT, Quantification Theory I

1. はじめに

長良川河口堰の建設に伴い、水質に与える河口堰の影響評価を目的に、建設省・水資源開発公団により水質自動監視装置(シラベル)が設置されており、平成6年から現在まで毎時の水質観測が行われている。これらのデータは膨大な数に上り、年度毎に長良川河口堰モニタリング資料¹⁾としてまとめられ、公開されている。現在、堰上流域で問題視されているのは藻類増殖現象と貧酸素水塊の発生である。藻類増殖現象は植物プランクトンの指標であるクロロフィルaを用いて、また、貧酸素水塊の発生は溶存酸素(DO)を用いて監視されている。

本研究では、主に平成7年7月6日から平成9年12月31日までのデータを用いて堰上流域の水質変動を数量化理論などの統計学的手法を用いて解析し、クロロフィルaとDOの支配的な影響因子の解明とその特性について検討する。

2. 検討手法

水質自動監視装置は図1に示すように、ジョーくん(河口から-0.5km地点)、イーナちゃん(3.0km)、イセくん(6.4km)、ナガラちゃん(13.6km)、トーカイくん(22.6km)、ナンノーちゃん(28.4km)、ヤープくん(31.2km)、トミーちゃん(木曽川河口から8.7km)の8つが設置されており、場所によって異なるが、水温、DO、pH、電気伝導度、濁度、COD、塩化物イオン、クロロフィルa、総窒素(T-N)、総リン(T-P)が表層、低層、底層で測られている。また、堰管理所において、気温、雨量、風向、風速、日射量、日照時間、流入量、流出量、ゲート開度などが測られている。本研究では、堰上流域に着目し、問題視されているイセ

* 中部大学工学部土木工学科(Dept. of Civil Engineering, Faculty of Eng., Chubu University)

くんの表層クロロフィルaと底層のDOについて検討を進める。解析に用いるデータにクロロフィルaとDOの影響を受けるものが含まれている場合、解析結果をなまらせる恐れがある。そこで、ここではイセくんのクロロフィルaおよびDOの値とその変化に関係すると考えられる関連因子をあらかじめ選定し、それらのデータを用いて解析を進める。植物プランクトンは水温、栄養塩であるT-N、T-Pによって活動が異なり、さらに、その輸送・混合特性は流量変動や成層の発達(ここでは、その指標として水温差(表層の水温-底層の水温)を定義する)に伴う流れの変化に大きな影響を受ける。また、DOは、水温によって飽和値が異なり、植物プランクトンの光合成により生成され、呼吸や有機物(指標として、COD)の分解により消費されるとともに植物プランクトンと同様に流れの変化に大きな影響を受ける。これらのことを考慮し、図2のように上記水質の生成消費の関係を考えた上で、解析に用いるデータ(関連因子)を抽出した。なお、取り扱った堰管理所のデータは場を規定する外的条件としての気象および流量・堰操作データである。

用いるデータに欠測があるため、可能な限り直線近似の補正を行った。ただし、あまりにも欠測期間が長く日射量などのように欠測期間で大きく変動するデータは補正できないため、その期間は使用しないものとした。また、クロロフィルaの濃度が高くなり計測限界を超え欠測となっている場合には上限値 $60 \mu\text{g/l}$ を設定した。

まず、FFTを用いたスペクトル解析を行い、使用するデータにどのような変動成分が入っているのかを確認し、つぎに、数量化理論を用いて解析を行うことで、支配的な影響因子の把握およびその因子の影響特性を検討した。

3. スペクトル解析

イセくんにおける表層のクロロフィルaと底層のDO、さらに、解析に用いる種々のデータについてFFT (Fast Fourier Transform) を用いてスペクトル解析^{2),3)}を行った。解析には1時間毎の連続データが存在する平成9年7月6日0:00から平成10年8月15日8:00までを対象とした。図3にクロロフィルaに関する分析結果を示す。なお、縦軸にはそれぞれの周波数に対応する振幅を示す。図から、クロロフィルaの変動には約227日周期と約1日周期の変動の他に、約62日周期と約24日周期の変動が卓越していることが分かる。約227日周期の変動は季節変動と考えられるが、取り扱った期間のデータの特性からたまたまこのような値になったものであろう。また、1日周期の変動は、温度や日射に關係する植物プランクトンの光合成活動から理解できるものである。一方、約62日周期と約24日周期の成分は、別の要因によるものであろう。そこで、用いた他のデータの解析結果と比較すると、ク

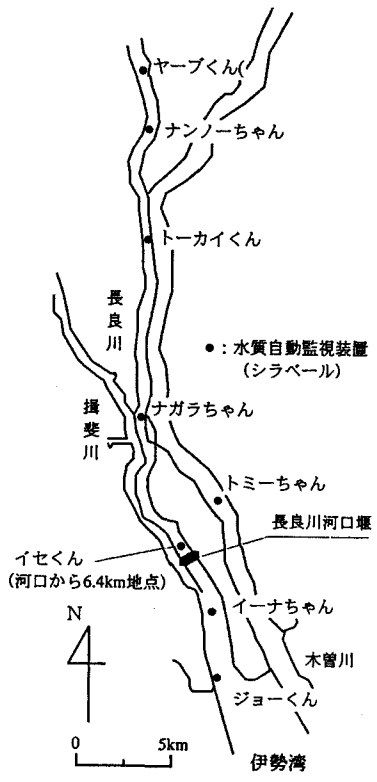


図1 水質自動監視装置の位置

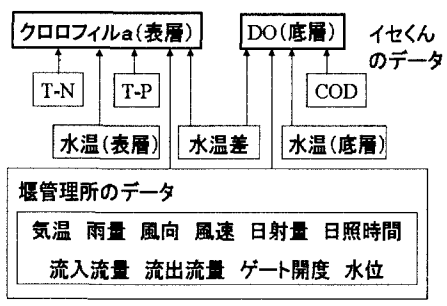


図2 解析に用いた関連データ

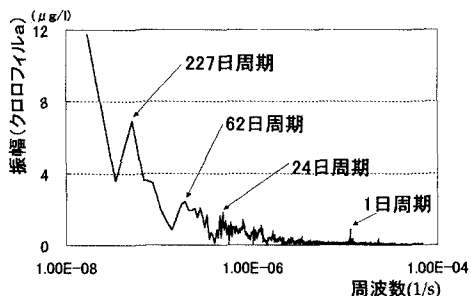


図3 クロロフィルaの分析結果

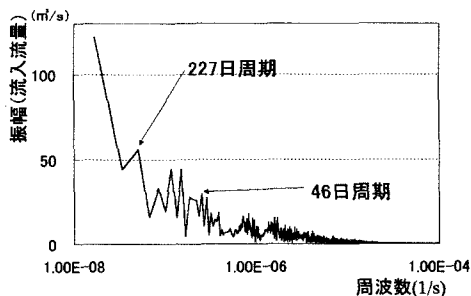


図4 流入流量の分析結果

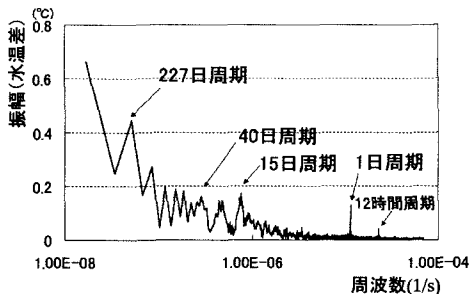


図5 水温差の分析結果

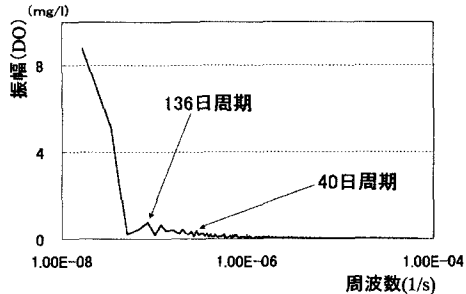


図6 DOの分析結果

クロロフィルaのスペクトル分布は流入流量と水温差のスペクトル分布（それぞれ図4と図5）と傾向が比較的類似していることが分かった。ただし、それぞれのスペクトル分布が完全に一致している訳ではなく、クロロフィルaの変動は流入流量や水温以外の要因とも関係していることを改めて示唆する結果となった。

つぎに、図6にDOの解析結果を示す。DOについてはDO飽和値に關係する水温の年変動に対応した年周期の変動が卓越しているのみであり、クロロフィルaにみられた日変動などがみられない。これは対象としているDOが底層のものであり、日変動する植物プランクトンの光合成活動や流量変動と余り関係がないことを示すものと言えよう。

4. 数量化理論Ⅰ類を用いた解析

数量化理論Ⅰ類⁹⁾を用いてイセくんにおける表層のクロロフィルaと底層のDOに与える影響因子を検討する。外的基準（知りたい項目、この場合、クロロフィルaとDOなど）のデータ数が n 個あり、これらの外的基準は、属性（関連する項目、この場合、水温、気温、流量など）によって影響を受け、いま、この属性が R 個あるとする。さらに、属性 j は k_j 個のカテゴリーを持つものとする。ある外的基準のデータに対応する属性データが k_j 個のカテゴリーのうちの k 番目に当てはまるとき、 $\delta_i(j,k)=1$ で表し、当てはまらない場合は、 $\delta_i(j,k)=0$ で表す。このとき、以下の関係が成り立つ。

$$\sum_{k=1}^{k_j} \delta_i(j,k) = 1 \quad , \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{k_j} \delta_i(j,k) = n \quad , \quad \sum_{i=1}^n \delta_i(j,k) = n_{jk} \quad (1)$$

ここで、 n_{jk} は属性 j においてカテゴリー k に反応した総数総数として求められる。数量化理論Ⅰ類では、予測値

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{k_j} \delta_i(j,k) x_{jk} \quad (2)$$

の達成度が最大になるように変数 x_{jk} （以下、カテゴリー値とする）を決定する．そのためには実測値と予測値の相関係数 ρ が最大になるように $\partial\rho/\partial x_{lm}=0$ ，すなわち，以下の連立方程式を解けばよい．

$$\sum_{i=1}^n Y_i \delta_i(l,m) = n_{lm} x_{lm} + \sum_{l \neq m} \sum_{k \neq m} f_{lm}(j,k) x_{jk} \tag{3}$$

$$f_{lm}(j,k) = \sum_{i=1}^n \delta_i(j,k) \delta_i(l,m) \tag{4}$$

ここで、 Y_i は外的基準である．また、 $w_j = \max x_{jk} - \min x_{jk}$ はレンジと呼ばれ、 j 番目の要因が、外的基準に及ぼす影響の大きさを示す相対的な尺度となる．

上記の方法を用いて、表 1 の 3 ケースの解析を行った．CASE 1 では属性の影響度とその特徴を検討し、CASE 2 では、CASE 1 の結果を基に平成 10 年のクロロフィル a と DO の再現計算を試みた．CASE 3 では、用いるデータを 1 日以下の周期成分とそれ以上の周期成分に分けて、支配因子の評価とクロロフィル a および DO の再現性について検討した．

表 1 解析ケース

CASE	外的要因	使用するデータ	使用する水質項目	気象および流量・堰操作データ	備考
CASE1	クロロフィル a	H7 年 7 月 6 日～ H9 年 12 月 31 日	水温(表層)、T-N、 T-P、 水温差	気温 雨量 風向 風速 日射量 日照時間 流入流量 流出流量 水位 アンダーフローの 開度 オーバーフローの 越流水深	
	DO		水温(底層)、クロロフィル a (表層)、COD、水温差		
CASE2		H10 年 1 月 1 日～ H10 年 12 月 31 日	水温(表層)、T-N、 T-P、 水温差		CASE1の結果を用いた 再現計算
			水温(底層)、クロロフィル a (表層)、COD、水温差		
CASE3	クロロフィル a の 成分分離値	H7 年 7 月 6 日～ H9 年 12 月 31 日	水温(表層)、T-N、 T-P、 水温差		
	DO の 成分分離値		水温(底層)、クロロフィル a (表層)、COD、水温差		

4. 1 絶対量を対象とした解析

図 7 に CASE 1 におけるレンジの分布を、図 8 に水温と水温差のカテゴリー値を示す．図 7 より、イセくんのクロロフィル a では表層水温と水温差の影響が大きいことが分かる．また、図 8 のカテゴリー値をみると、表層水温が高いほどクロロフィル a は増加し、低いほど減少している．また、水温差が大きいほどクロロフィル a は増加する傾向にある．これは、水温が高まれば植物プランクトンの活動は活発になり、また、水温差すなわち水温成層が発達することにより水の鉛直混合が抑制されて植物プランクトンが表層に集積し、クロロフィル a が増大することを反映していると考えられる．

つぎに、図 7 より DO のレンジについてみると、底層の水温と水温差が大きく関係していることが分かる．さらに、図 8 のカテゴリー値をみると、水温が高いほど DO は低下し、水温差が大きいほど DO は低下している．前者は、DO の飽和値は水温が高いほど低くなることに起因し、後者は、水温差が大きくなると、前述したように鉛直混合が抑制されるため、底層への酸素の供給が抑制される一方で、酸素消費が進み DO の低下が生じることに起因する．

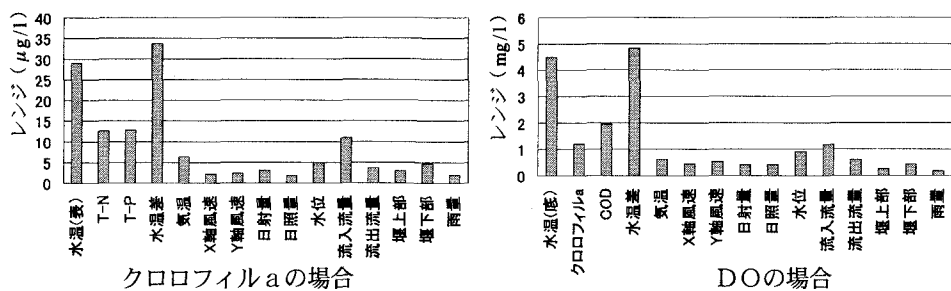


図7 レンジの分布

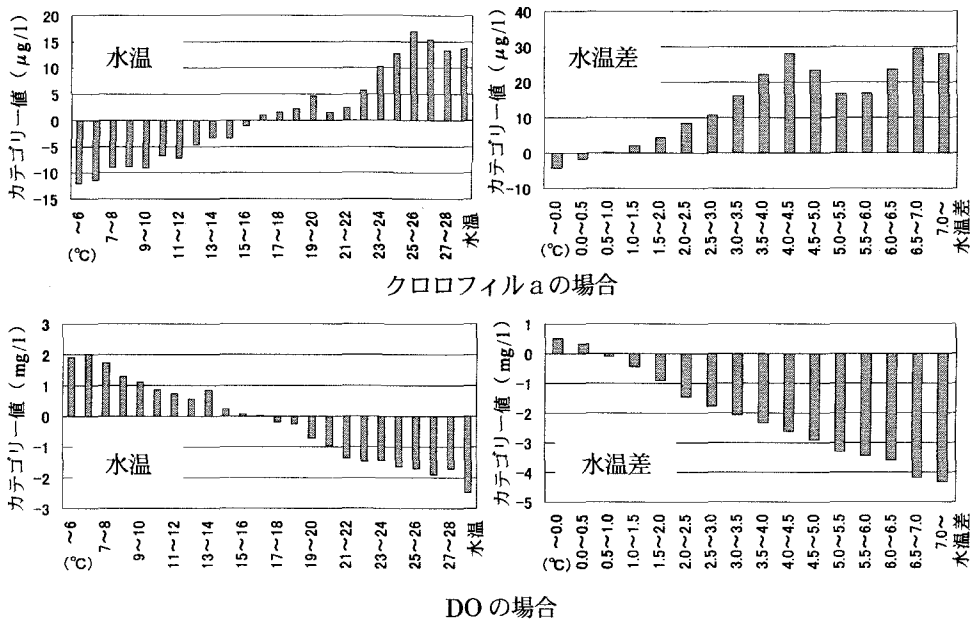


図8 カテゴリー値の分布

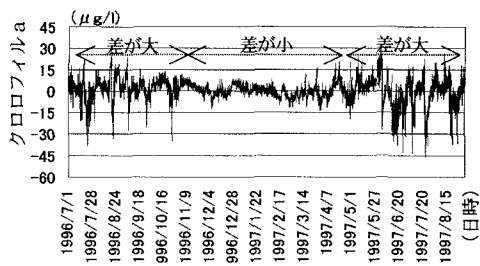


図9 クロロフィルaの予測値と実測値の差

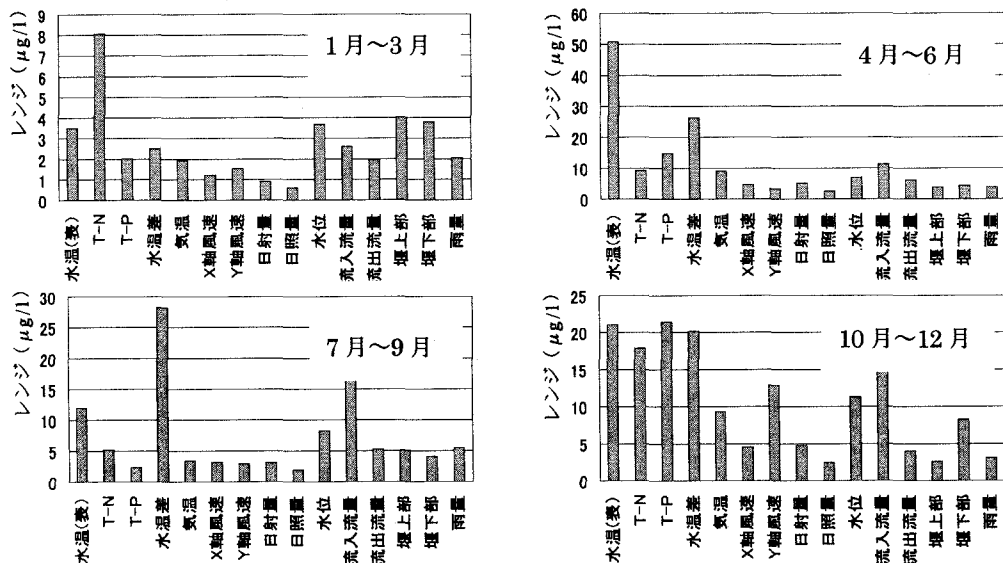
表2 CASE1の相関係数

	クロロフィルa	DO
全データ	0.77	0.90
1月～3月	0.77	0.77
4月～6月	0.90	0.91
7月～9月	0.79	0.83
10月～12月	0.86	0.91

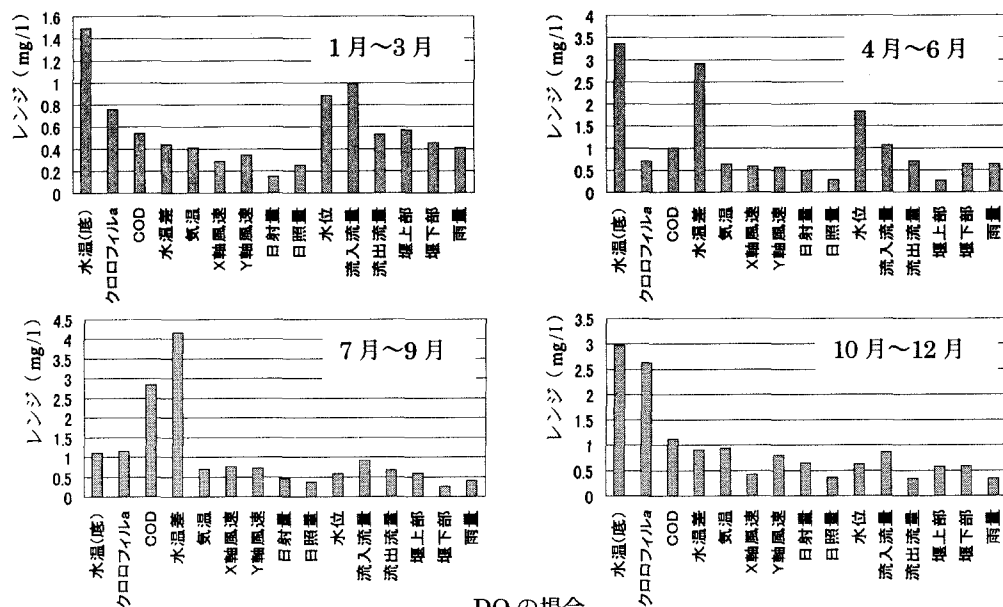
CASE 1の分析結果に基づき、(2)式で求めたクロロフィルaの予測値と実測値の差を示すと図9のようになり季節によって異なる結果が認められる。そこで、4つの季節(1月～3月、4月～6月、7月～9月、10月～12月)に分けて同様の解析を行った。予測値と実測値との相関係数は、表2の結果となった。

これから、1月～3月と7月～9月では相関係数が小さくなっているが、その他は高くなっており、特に

4月～6月や10月～12月の季節の変わり目で相関係数が大きくなっていることが分かる。得られたレンジの結果を図10に示す。これらの図から、季節に分けた解析の場合、外的基準に影響を与える項目は、季節により変化していることが分かる。クロロフィルaについてみると、4月～6月の季節の変わり目で表層水温が変化しやすい時期には、水温が最も外的基準に影響を与えている。しかし、7月～9月をみると、水温差がもっとも大きな影響を与えていることが分かる。これは、夏場の表層水温は高い値を維持しその変動が



クロロフィルaの場合



DOの場合

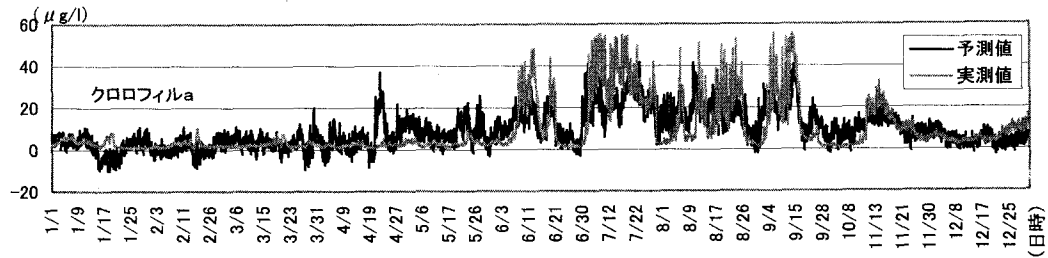
図10 レンジの分布

あまり無いため影響が小さい結果になったと考えられる。

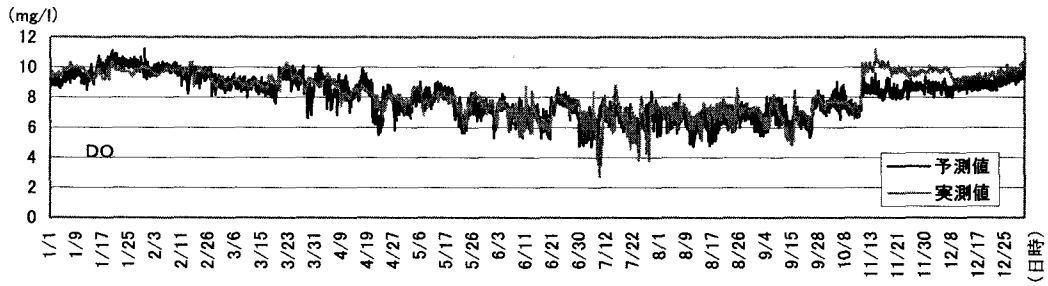
つぎに、CASE 1 で得られたカテゴリー値と平成 10 年の水温や流量などのデータを使用して、同年のクロロフィル a と DO の再現計算を試みた。ここで行った再現計算がある程度の精度で行えたならば、CASE 1 で得られたカテゴリー値やレンジの検討結果が妥当なものと判断できる。得られた予測値と実測値の相関係数は表 3 のようになった。また、図 11 に年間のデータを用いた場合を、図 12 に季節

表 3 CASE2 の相関係数

	クロロフィル a	DO
全データ	0.70	0.86
1 月～3 月	0.54	0.59
4 月～6 月	0.68	0.78
7 月～9 月	0.70	0.44
10 月～12 月	0.33	0.83

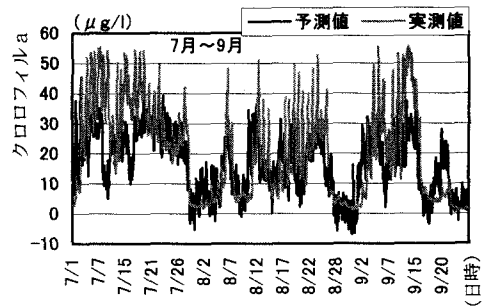


クロロフィル a の場合

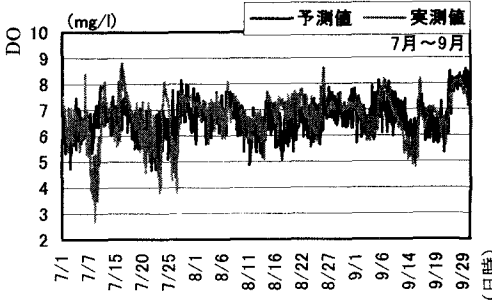


DO の場合

図 11 1 年間の変動の予測



クロロフィル a の場合



DO の場合

図 12 季節別の変動の予測

別に解析した場合の予測値と実測値を示す。これらの結果から、クロロフィルaとDOの両者とも、値の大まかな変化が比較的精度良く再現されており、CASE1で得られた結果が妥当であると判断できる。

また、計算結果から、年間を通じた解析の場合、クロロフィルaとDO両者とも予測値と実測値の相関係数は比較的高く良い精度を示している。しかし、季節に分けた場合、その相関係数はCASE1と比べて低くなっている。前者の結果は、大規模な季節変動は年によって大きな変化はしないため相関係数が高くなったものと考えられる。一方、後者の季節に分けた場合には、関係する変動のスケールが小さく年毎に変化しやすいため、相関係数が小さくなったものと考えられる。また、クロロフィルaとDOとを比較すると、DOの方が予測値と実測値の差が小さいようである。とくに、図12の7月～9月をみると、DOの予測値は比較的観測値を表しているのに対し、クロロフィルaの予測値は観測値の大まかな変動を再現しているものの日周期の変化は十分に再現していない。これらのことから、特にクロロフィルaにおける日周期成分の検討が課題として残った。

なお、表3の7月～9月の場合をみるとクロロフィルaよりもDOの方が相関係数は低い値を示しており、図12と矛盾する結果である。これは、DOの予測値が高い場合に実測値も高くなるといった両者の相関は小さいもののその値の差はそれほど大きいものではないことを示していると考えられる。一方、クロロフィルaの場合は、相関係数が0.70と比較的高く予測値と実測値の相関は高いものの、図12の結果からその値には大きな差があったものと考えられる。

4. 2 成分分離を用いた解析

データの中に季節変動や日変動など様々な成分が含まれていることから、これらを同一に処理することは困難と考えられる。そこで、得られているデータを、日周期以下の成分とそれ以上の周期の成分に分離して

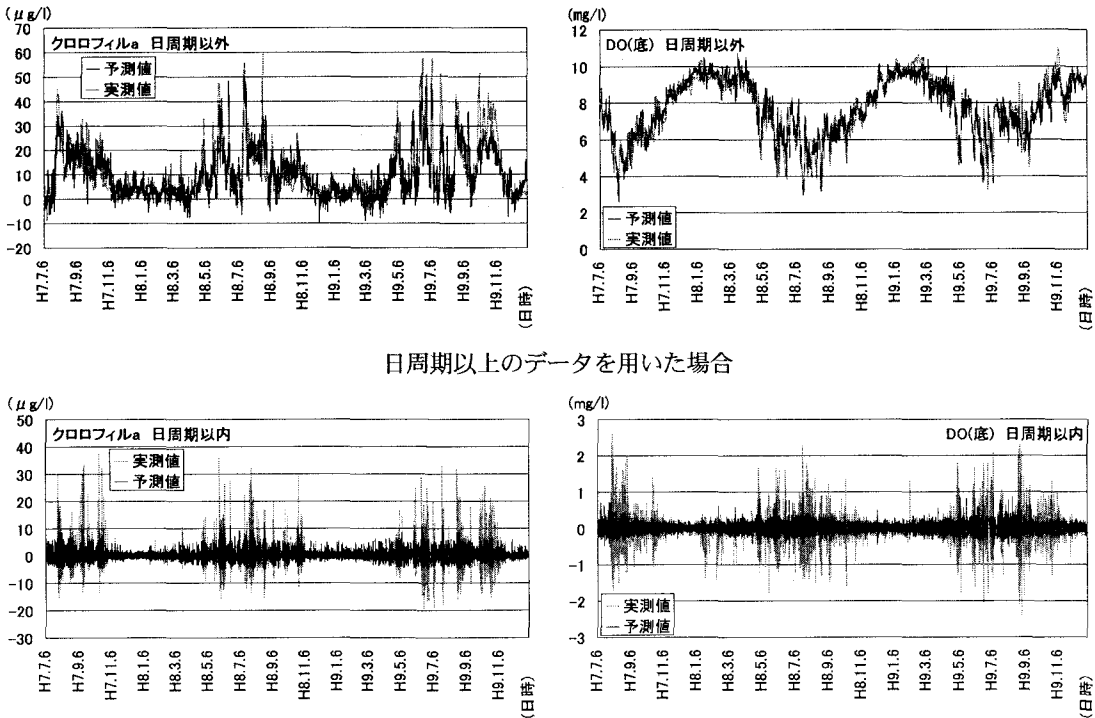


図13 予測値と実測値の比較

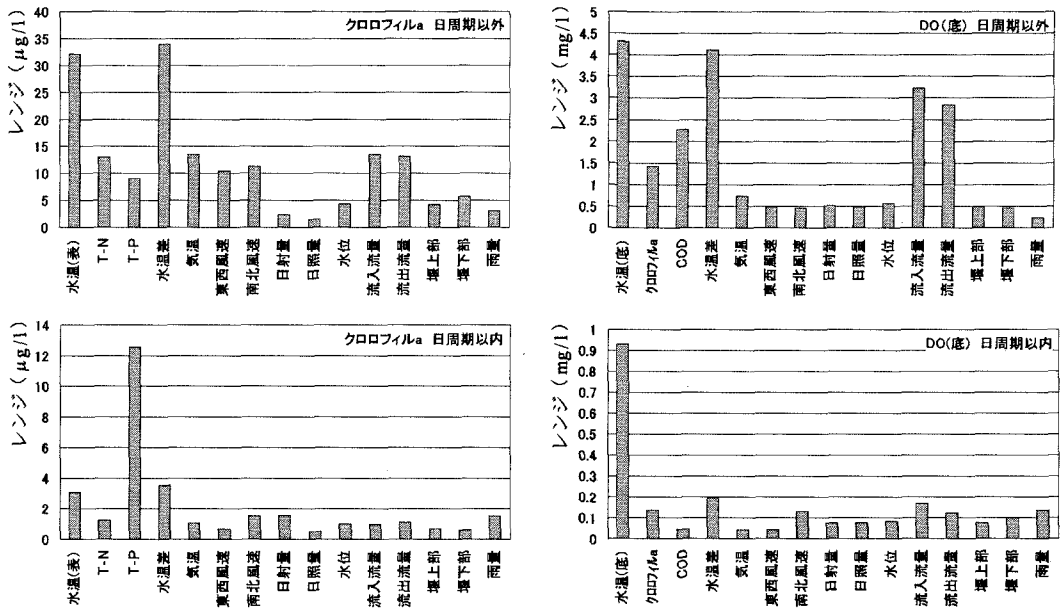


図 14 レンジの分布

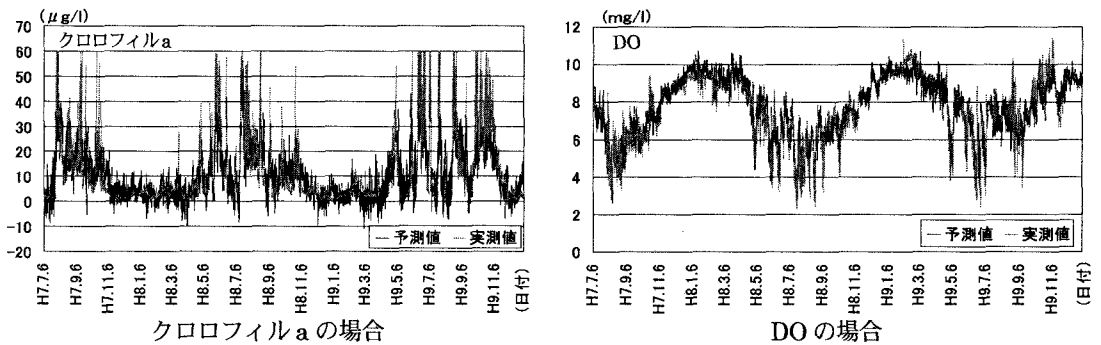


図 15 実測値と予測値の比較

数量化理論Ⅰ類による解析を行う。まず、もとなるデータに 25 時間の移動平均操作を施してデータを作成する。このデータは、日周期以上の周期を有するデータである。次に、もとのデータから移動平均値（1 日以上の周期を有するデータ）を引くことにより日周期以下の周期成分を有するデータを作成する。この 1 日以上の周期成分と、1 日以下の周期成分をそれぞれ数量化理論により解析した。

クロロフィル a、DO の予測値と実測値の比較を図 13 に示す。1 日周期以上の成分では、予測値と実測値の相関係数は、クロロフィル a で 0.84、DO で 0.94 と比較的高い値であったが、1 日周期以下の成分ではクロロフィル a が 0.54、DO が 0.44 と低い値に留まった。図 13 をみると、1 日周期以上の成分ではクロロフィル a、DO とともに予測値はそれらの変動を十分に表現できている。しかし、1 日周期以下の成分ではクロロフィル a、DO とともに夏場の変動が表現できていない。

つぎに、レンジの分布を図 14 に示す。1 日周期以上の成分ではクロロフィル a、DO とともに、水温、水温差、流入流量、流出流量のレンジが高くなっている。これは、水温、水温差などは、年で大きく変動するため影響が高くなったと思われる。また 1 日周期以下の成分では、クロロフィル a で T-P のみが高くなっている。

る。また、DO では水温のみが高くなっている。このように 1 日周期以下のデータでは影響項目が偏ってしまう結果となった。しかし、長良川では富栄養状態にあり⁴⁾、クロロフィル a の日変動が T-P のみに支配されるとは考えにくく、今後の検討を要する。

1 日周期以上の成分の予測値と、1 日周期以下の成分の予測値を足し合わせ、もとなるデータと比較した結果を図 15 に示す。相関係数はクロロフィル a で 0.82、DO で 0.93 となり、CASE 1 と比べて若干相関係数が高くなった。しかし、予測値と実測値の差を見てみるとクロロフィル a、DO とも、夏場で予測値と実測値の差が大きいたことが分かる。これは、1 日周期以下のデータによる解析で特に夏場に予測値と実測値の大きな差がみられたことが原因と考えられる。したがって、今後、より詳細な変動の予測を行うには、植物プランクトンの活動などに起因する 1 日周期以下の短い変動の解明が必要であることが改めて確認された。

5. おわりに

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

1) 長良川河口堰上流域のイセくんにおける表層のクロロフィル a と底層の DO さらにそれらに影響を与えるデータについて FFT を用いたスペクトル解析を行った。その結果、クロロフィル a の変動には季節変動と日変動に伴う周期成分の他に数十日周期の成分が含まれており、これらの成分と近い周期の成分が流入流量と水温差に存在していることが分かった。

2) 数量化理論 I 類を用いてクロロフィル a と DO に与える支配的な影響因子とその特性を検討した。まず、絶対量で検討した結果、特に水温と成層発達（水温差）がクロロフィル a と DO に影響を与えていることが分かった。また、季節で分けて解析した結果では、支配要因が異なり、4 月～6 月および 10 月～12 月の季節の変わり目では水温の影響が強いが、夏場は水温差の影響が強いことが分かった。これは、夏場は比較的水温が高くその変動も大きく変化しないためであろうと考えられる。

3) 平成 7 年～平成 9 年の解析で得られたカテゴリー値を用いて平成 10 年のクロロフィル a と DO の予測を行った。その結果、年データを対象とした場合は、比較的良好な精度を示した。これは、季節変動のような比較的長い時間スケールの水質変化は年によって大きく変化しないためであろう。しかし、季節に分けた場合、特に夏場で精度が悪い結果となった。これは、特に生物活動が影響を与える短い周期の変動は年毎に大きく変化するためと考えられる。

4) 各データを 1 日以下の周期成分と 1 日以上周期成分に分離し、それぞれについて数量化理論 I 類を用いた解析を行った。結果、1 日以上周期成分は比較的再現精度が高かったが、1 日以下の周期成分は、十分な結果とは言えず、この点の改善が課題として残った。

最後に、本研究は、中部大学ハイテクリサーチセンター、河川整備基金、文部省科学研究費（基盤研究(c) (2) 研究代表者：松尾直規）の補助を受けたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 平成 6 年度～平成 9 年度長良川モニタリング資料：建設省中部地方建設局・水資源開発公団中部支社。
- 2) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析 入門，鹿島出版会，1994。
- 3) 亀田弘行・池渕周一・春名功：新体系土木工学 2 確率・統計解析，技報堂出版株式会社，1981。
- 4) 松尾直規・武田誠・吉田吉治：長良川河口堰上下流域の水質特性，総合工学 第 11 巻，pp.139-146。
- 5) 松尾直規・武田誠：統計学的手法を用いた長良川河口堰モニタリング資料の解析，総合工学 第 12 巻，pp.105-117。