

離散ウェーブレット変換を用いた富栄養化水域における藻類綱別クロロフィルa濃度の時系列解析

富永, 貴史

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

原田, 昌佳

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室

平松, 和昭

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室

丸居, 篤

九州大学新キャンパス計画推進室

<https://doi.org/10.15017/16505>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 64 (2), pp.125-134, 2009-10-29. 九州大学大学院農学研究院

バージョン：

権利関係：

離散ウェーブレット変換を用いた富栄養化水域における藻類綱別 クロロフィル *a* 濃度の時系列解析

富永貴史¹・原田昌佳*
平松和昭・丸居篤²

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室

(2009年6月30日受付, 2009年7月13日受理)

Time Series Analysis of Chlorophyll-*a* Concentration considering Algae
Class in a Eutrophic Water Body using Discrete Wavelet Transform

Takafumi TOMINAGA¹, Masayoshi HARADA*, Kazuaki HIRAMATSU
and Atsushi MARUI²

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science,
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

富栄養化した閉鎖性水域において、水の華と呼ばれる植物プランクトンの大量増殖は多くの水環境問題の原因となる。とりわけ、農業用ため池では、農業用水の汚濁は作物の生育の障害、農産物の商品価値の低下、通水障害などの農業用施設への悪影響、さらには水辺景観の悪化、悪臭の発生、水圏生態系の変化など、様々な問題を引き起こす。わが国では農業用水源としての貯水池の依存度は高く、また全国の農業用調整池のうち78%が富栄養状態である(吉永ら, 2004) 現状を鑑みると、このような水域の水質改善は急務である。持続的な農業用水源の保全や管理を考えるにあたり、詳細な水質モニタリングに基づく水環境の現状評価は重要な知見を与える。とくに、水理学的、水質学的さらには生物生態学的な観点からのアセスメントは、水環境保全や改善の計画・実施において重要な位置づけにある。

富栄養化防止対策や水質改善策を講じる上で、流域からの窒素やリンの負荷量や水域内部でのそれらの動態特性に加え、植物プランクトンの現存量やその種構成の季節的消長を把握することは重要な課題である。これまでの調査研究では、植物プランクトンの現存量の指標としてクロロフィル *a* (以下、Chl.*a*) が用いられており、その分析には分光光度計あるいは蛍光光度計を利用した溶媒抽出法が一般的に採用される。また、その種構成の季節的消長については、定期的に採取したサンプルの顕微鏡観測による同定に基づいて検討されることが多い。しかしながら、プランクトン種を考慮に入れた個体数、あるいはその指標となる Chl.*a* について、このような分析や観測によるデータの集積には多大な労力・時間を要するため、植物プランクトンの種構成の季節的消長を詳細に検討するために必要な時系列データの入手は容易ではない。このような現状を受け、近年では、藻類綱別 Chl.*a* 濃度をフィールドで直接 (*in situ*) かつ人為的処理なし (*in vivo*)

¹九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

¹Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environmental Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

²九州大学新キャンパス計画推進室

³New Campus Planning Office, Kyushu University

*Corresponding author (E-mail: mharada@bpes.kyushu-u.ac.jp)

で測定することができる観測機器が開発され、現地観測に適用した調査結果が報告されている（例えば、古里ら，2003）．この観測機器は、藻類網別 *in vivo* Chl.*a* の測定に多波長励起蛍光光度計を応用したものであり、短時間のインターバルでのデータ収録が可能となる．そこで本研究では、このようなクロロフィルメータである FluoroProbe (bbe Moldaenke 社製) を用いて、富栄養化が進んだ農業用ため池における藻類網別 Chl.*a* 濃度の連続観測を実施し、その濃度の季節的な変動特性を検討した．

ところで、九州大学伊都キャンパスの拠点である糸島地域は福岡市西部に位置し、都市近郊型の農業地域である．また、コメ、麦、施設園芸、畜産業などが盛んであり、福岡県内有数の農業地域として知られている．その一方で、糸島地域は水資源の乏しい地域でもあり、とりわけ伊都キャンパス周辺にあたる元岡地区、開地区、桑原地区においては、古くから水不足問題を抱え、水資源の確保は重要な問題となっている．そのため、糸島地域には多くの農業用ため池が点在し、農業用水資源としての依存度が高い．しかしながら、近年の都市化・混在化の影響を受けて、農業用水源の水環境は有機汚濁や富栄養化による深刻な水環境を抱えている．たとえば、開地区の農業用ため池の多くで、TP と Chl.*a* の各濃度は富栄養湖レベルに、また COD は農業用（水稻）水質基準を超過する濃度にあり、夏季にアオコの発生が確認されている（井芹ら，2008；松本ら，2008）．これまで、糸島地域の水問題は、地

下水賦存量などの“量”に視点を向けられていたが、自然環境と調和した農業農村環境の創出の観点から考えると、“質”にも十分に配慮しなければならない．

そこで、本研究では九州大学伊都キャンパスに隣接する開地区内の大久保池を対象とし、地区に必要なとされる適切な水環境評価を行うため、大久保池の岸付近に多波長励起蛍光光度計（FluoroProbe, bbe Moldaenke 社）を設置し、藻類網別 Chl.*a* 濃度の連続観測を行った．本研究では、藻類を藍藻類、緑藻類、渦鞭毛藻/珪藻類、クリプト藻類の4つの藻類網に分別し、これらの季節的消長を検討するためにウェーブレットを用いた時間周波数解析を行った．また、藻類網別 Chl.*a* 濃度の季節的变化に影響を与えることが予想される水温ならびに日射量の環境要因との応答性について、相互相関関数を用いて検討した．

本研究の実施にあたり、新キャンパス計画専門委員会における「九州大学新キャンパス予定地における農場用水の水質調査費」の補助を受けた．ここに、記して謝意を表します．

調査方法

1. 対象池の概要

研究対象池は、九州大学伊都キャンパスを源流とする大原川と、糸島地域の主要河川である瑞梅寺川水系の一つである水崎川に挟まれた開地区に位置する大久保池（図1、2）である．同池は流域面積約3.1ha、水面積約19,300m²、平均水深約3.5m、総貯水量約

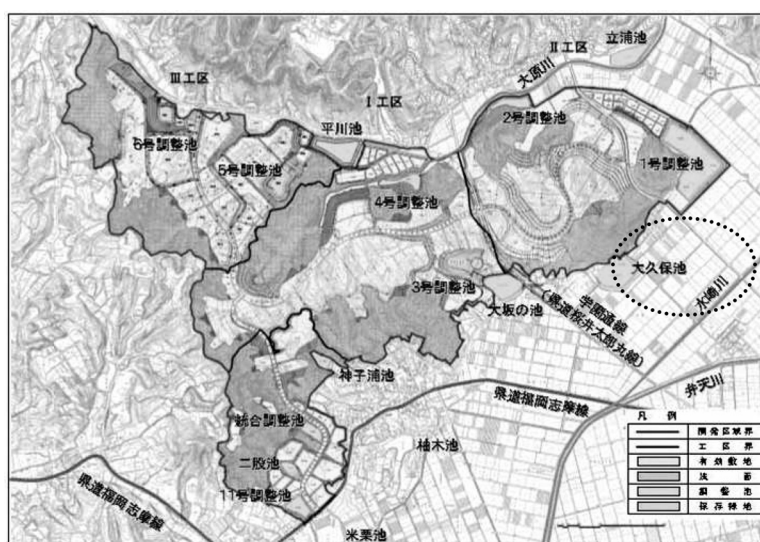


図1 対象池の配置図



図2 大久保池の概要

54,200m³の規模の貯水池であり、開地区の水稲栽培ならびにイチゴやトマトなどの施設園芸の灌漑用水源である。大久保池の特徴として、7～10月に岸周りでヒシ科植物の植生が見られ、また伊都キャンパス周辺の他の貯水池と同様に富栄養化の進行により水域が緑色に呈することが挙げられる。松本ら（2008）による2007年度の水質調査によれば、7月中旬～9月上旬の期間で、藍藻類 *Microcystis* 属、*Phormidium* 属、*Aphanizomenon* 属によるアオコが長期的に発生し、また、11月上旬にも *Aphanizomenon* 属によるアオコが観測された。そのため、Chl.*a* は7月中旬以降に30 $\mu\text{g}/\text{l}$ 程度と高い値で推移し、過栄養湖レベルに相当する。

2. 調査方法

観測期間は2008年8月9日～同年11月26日とし、対象池表層に設置した多波長励起蛍光光度計 (FluoroProbe, bbe Moldaenke 社製) により藻類網別 Chl.*a*、総 Chl.*a* ならびに水温の各データを約10分間隔で収録した。また、藻類網別 Chl.*a* の時系列特性を環境因子と関連付けて検討するために、大久保池に隣接する観測点で得られた気温、相対湿度、平均風速ならびに日射量の気象データを使用した。

ここで、本研究で用いた FluoroProbe (図3) の測定原理は次のとおりである。同じ網に属する藻類は、体内の光合成色素の質と量がほぼ同じである。よって、ある固定発光波長における藻類の蛍光励起スペクトルは、同じ網ではほぼ同じ値を取り、網間では大きく異なる。これにより、蛍光励起スペクトルを利用することで、藻類の網を判別することが可能となる。実際の藻類の判定には、発光波長の異なる6つの蛍光励起



図3 FluoroProbe の概要

LED (波長370nm, 470nm, 525nm, 570nm, 590nm, 610nm) が用いられる。緑藻、藍藻、渦鞭毛藻、珪藻、クリプト藻および水中の黄色物質がそれぞれ異なる波長で極大値を示し、測定された蛍光信号から黄色物質によるオフセットを控除することで、各藻類クラスの濃度を検出する。しかし、渦鞭毛藻類と珪藻類は、極大値を示す波長が近いため区別することができず、これらを合わせた濃度として検出されるため、本研究ではこれらを同一で扱い、渦鞭毛藻/珪藻類と表記する。

FluoroProbe による連続観測に加え、植物プランクトンの優占種の季節的消長を調べるために、生物調査を約1週間間隔で下記の通りに実施した。プランクトンの発生状況に応じて5～25lの採水を行ない、メッシュサイズ63 μm のプランクトンネットを用いて約25 ml に濃縮した。この試料水に10%ホルムアルデヒド溶液3 ml を添加し、プランクトンを固定した後、光学顕微鏡を用いてプランクトン種を属レベルまで同定した。

3. 解析方法

一般に、各種の水質や微気象の変動時系列は非定常信号であり、これらがもつ確率統計学的特性は時々刻々と変化する。そのため、本研究のような連続観測により得られた時系列データからその動的特性を抽出する

場合、変動の時間的ならびに空間的推移を同時に捉えることのできる時間周波数解析が求められる。本研究では、時系列の様々なスケール分布（周波数特性）を元の時間軸情報を失うことなく取り出すことができるウェーブレット解析を用いて、Chl.*a*の時系列解析を試みた。

ところで、時系列信号の解析・予測についての理論はノイズの存在しないある種の理想的な信号を対象とすることが多い。しかしながら、実測データを対象とする場合、観測器に由来する観測雑音をはじめとする様々なノイズの影響を考慮した時系列解析が要求される。本研究においても、Chl.*a*の連続観測に基づいて各藻類網の季節的変化を解析するにあたり、データに含まれるノイズに対する適切な処理が必要である。そこで、近年信号処理の分野で有効的に用いられているウェーブレット解析を用いたノイズ処理技術を導入した（例えば、原田ら、2006）。本手法では、時系列の整合性のある部分を取り除くことなくノイズ処理が可能となる。

任意の離散化された時系列を $x(t)$ とすると、離散ウェーブレット変換は正規直交基底 $\Psi_{j,k}(t)$ によって次のように定義される。

$$w_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{j,k}(t) dt \quad (1)$$

また、(1)式は内積（畳み込み積分）を用いて以下のように簡略化できる。

$$w_{j,k} = \langle x(t) | \Psi_{j,k}(t) \rangle \quad (2)$$

さらに、離散ウェーブレット分解の再構成である離散ウェーブレット逆変換は次式で定義される。

$$x(t) = \sum_j \sum_k w_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (3)$$

ここで、正規直交基底 $\Psi_{j,k}(t)$ はアナライジングウェーブレット $\Psi(t)$ を用いて次式で与えられる。

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k) \quad (4)$$

本研究では、アナライジングウェーブレットとして Daubechies の20係数ウェーブレットを採用した。係数 $w_{j,k}$ はウェーブレット係数と呼ばれ、ウェーブレット成分の振幅を表す。また、 j はレベル（以下、Level）、 k はトランスレーションパラメータと呼ばれ、それぞれ対数周波数と時刻に対応する。時系列のデータの個数が 2^n 個であれば、ウェーブレット成分は $j = -1 \sim (n-1)$ の計 $(n+1)$ 個に分解される。ただし、 $j = -1$ は変動時系列の平均値を表す。そして、デー

タのサンプリング周波数を f_s (Hz) とすると、Level j ($\neq -1$) の中心周波数 f_c は次式で与えられる (Newland, 1993)。

$$f_{c,j} = 2^{j-n} f_s \quad (5)$$

ウェーブレット係数の2乗値 $w_{j,k}^2$ は、時系列 $x(t)$ の全変動パワーに対する変動成分の寄与率を表す (Newland, 1993)。

ウェーブレット解析に基づくノイズ処理は、ウェーブレット係数 $w_{j,k}$ をある閾値 λ により平滑化されるものである。この閾値処理には種々の手法が提案されている。この中で、広く利用されている処理手法としてハード閾値処理とソフト閾値処理がある。ハード閾値処理は次式で表される。

$$w_{j,k}^{\text{Hard}} = \begin{cases} 0 & |w_{j,k}| < \lambda \\ w_{j,k} & |w_{j,k}| \geq \lambda \end{cases} \quad (6)$$

この場合は、係数をそのままにするか除去するかの決定を単純に行う。一方、ソフト閾値処理は、係数が信号とノイズの両方を含むと考え、全ての係数からノイズ部分を除去することで信号を分離するものである。本研究では次式のソフト閾値処理（新・中野、2005）が妥当であると考え、これを採用した。

$$w_{j,k}^{\text{Soft}} = \begin{cases} 0 & |w_{j,k}| < \lambda \\ \text{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda) & |w_{j,k}| \geq \lambda \end{cases} \quad (7)$$

閾値の処理には最もよく使われる普遍閾値処理を用いた。これにより、Level j での閾値は次のように設定される。

$$\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln n_j} \quad (8)$$

ここで、 n_j は Level j のウェーブレットの係数長（個数）であり、 σ_j は対象時系列に含まれるノイズの標準偏差である。ここで、現実的には σ_j の値は不明であるので、次式で表す標準偏差の推定値を用いた (Johnstone and Silverman, 1997)。

$$\sigma_j = \frac{\text{median}\{|w_{j,k}| : k = 1, \dots, n_j\}}{0.6745} \quad (9)$$

以上のように、ウェーブレット解析におけるノイズ処理は、離散ウェーブレット変換によりウェーブレット係数を求め、式(8)より設定される閾値に応じて各Levelで式(7)の閾値処理を行い、さらに離散ウェーブレット逆変換により時系列を再構成することにより達成される。しかしながら、ソフト閾値処理ではウェー

ブレット係数を過剰に平滑化する傾向があり、分解された全 Level に対して閾値処理を行うことにより、時系列の本質が失われる可能性がある。そこで、ノイズは時系列の高周波成分に重畳するものと考え、高周波領域でのみソフト閾値処理を行った。

ところで、FluoroProbe による連続観測ではデータの取り込みを10分間隔に設定したが、サンプリング時間にズレが生じたため、不定間隔の離散データが得られた。そこで、得られたデータに対して30分間のアンサンブル平均を計算し、毎時00分、30分の30分インターバルの時系列データを作成した。その結果、観測期間中（8月9日～11月26日）のデータ数は5224個であったが、離散ウェーブレット解析ではその数を2のべき乗で与える必要がある。そこで、観測値のアンサンブル平均が変化しないように、時系列データの末尾にダミーデータを付加し、データ総数を $n = 2^{13}$ (=8192) とした。

結果と考察

1. 観測結果

図4に、藻類網別 Chl. *a*、総 Chl. *a* および水温の経時変化を示す。

まず、緑藻類は観測期間にわたって極めて少ない濃度で推移したが、10月の期間で約20 $\mu\text{g/l}$ まで増加する変動が観測された。つぎに、藍藻類は他の網よりも著しく多量に存在し、とくに8月中旬～9月上旬と10月中旬～下旬に非常に高い濃度を示した。また、渦鞭毛藻/珪藻類とクリプト藻類はいずれも11月末まで顕著な変化は見られなかったものの、11月下旬にそれら

の増加が観測された。総 Chl. *a* 濃度は、8月～9月に緩やかに増加し、その後はおよそ25～50 $\mu\text{g/l}$ で推移したが、10月中旬～下旬および11月下旬に大きく増加した。これらから、藍藻類が10月末までの総 Chl. *a* 濃度をほぼ規定し、11月以降のピークは渦鞭毛藻/珪藻類、クリプト植物門に起因するものであることが分かる。これは、藍藻類と珪藻類の季節的消長が相反する挙動を示す既往の研究（藤本ら、1995）に合致する。なお、大久保池の総 Chl. *a* 濃度の平均値は、約55 $\mu\text{g/l}$ であった。この値は、OECD による湖沼類型の過栄養湖レベル（年平均 Chl. *a* : 25 $\mu\text{g/l}$ 以上）に相当する。

表1に、光学顕微鏡で観察した大久保池の植物プランクトンの第1、第2優占種を示す。8月～9月中旬は概ね藍藻類 *Microcystis* 属が第1優占種であった。ついで、9月中旬～10月初旬期間では珪藻類、緑藻類と変移し、再び藍藻類の *Anabaena* 属、*Anabaenopsis* 属が優占した後、11月末まで珪藻類 *Melosira* 属の優占が継続した。また、9月初旬には藍藻類 *Microcystis* 属が大量に発生しており、これがアオコの原因となったと考えられる。

図4と表1の結果を比較すると、観測期間を通じて藍藻類が卓越し、FluoroProbe による11月の渦鞭毛藻/珪藻類の増加は、珪藻類の優占として観察されている。緑藻類に関しても、ほぼ同様の結果である。クリプト藻類が急激に増加しているのにも関わらず、優占種として観察されていないのは、クリプト藻類の固体サイズが小さいため、明確に観察されていないことが原因と考えられる。以上より、FluoroProbe は概

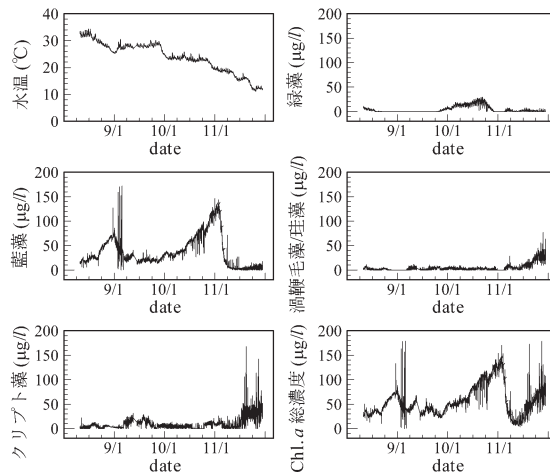


図4 藻類網別 Chl. *a* 濃度、総 Chl. *a* 濃度および水温の時系列データ

表1 観察された植物プランクトンの第1, 第2優占種

大久保池				
観測日	第一優占種		第二優占種	
	綱	属	綱	属
8/6	藍藻類	<i>Aphanocapsa</i>	藍藻類	<i>Microcystis</i>
8/11	藍藻類	<i>Microcystis</i>	藍藻類	<i>Aphanocapsa</i>
8/16	藍藻類	<i>Microcystis</i>	藍藻類	<i>Oocystis</i>
8/20	藍藻類	<i>Microcystis</i>	藍藻類	<i>Anabaena</i>
8/28	藍藻類	<i>Microcystis</i>	藍藻類	<i>Anabaena</i>
9/4	藍藻類	<i>Microcystis</i>	藍藻類	<i>Aphanocapsa</i>
9/10	藍藻類	<i>Microcystis</i>	藍藻類	<i>Aphanocapsa</i>
9/17	藍藻類	<i>Microcystis</i>	緑藻類	<i>Sphaerocystis</i>
9/24	珪藻類	<i>Synedra</i>	緑藻類	<i>Chlamydomonas</i>
10/1	緑藻類	<i>Mougeotia</i>	藍藻類	<i>Anabaenopsis</i>
10/7	藍藻類	<i>Anabaena</i>	珪藻類	<i>Synedra</i>
10/22	藍藻類	<i>Anabaenopsis</i>	緑藻類	<i>Mougeotia</i>
10/28	藍藻類	<i>Anabaena</i>	藍藻類	<i>Anabaenopsis</i>
11/5	藍藻類	<i>Anabaenopsis</i>	珪藻類	<i>Melosira</i>
11/12	珪藻類	<i>Melosira</i>	緑藻類	<i>Chlamydomonas</i>
11/17	珪藻類	<i>Melosira</i>	藍藻類	<i>Microcystis</i>
11/26	珪藻類	<i>Melosira</i>		

ね良好に藻類網を判別していると考えられる。

2. ウェーブレットによる解析結果

(1) Chl.a 時系列の時間周波数特性

図4のChl.aに関する観測データのウェーブレット解析にあたり、式(7)のノイズ処理によりこれらの変動時系列を平滑化した。上述のとおり、高周波成分域にノイズが重畳するものと考え、ここではLevel 7 (8.68×10^{-6} Hz)のウェーブレット係数に対してソフト閾値処理を行った。ノイズ処理後の藻類網別Chl.aおよび総Chl.aの時系列データに対するウェーブレット解析の結果を図5に示す。同図は、ウェーブレット成分の振幅の2乗値 $w_{j,k}^2$ を時間-周波数平面上にプロットした図である。暖色系は元の時系列の全変動パワーに対する変動成分の寄与が大きいこと、寒色系はそれが小さいことをそれぞれ表し、周波数帯ごとに変動成分の全変動量に対する寄与率の時間的推移を容易に捉えることができる。

図5(1)より、藍藻類は期間を通じて 3.0×10^{-6} Hz以下の周波数成分が支配的である。すなわち、約4日以上の緩やかな変動成分の元の時系列に対する寄与が大きい。また、9月初旬と10月下旬に局所的に高周波成分(1日周期以下)が検出された。これは、藍藻類が大量に発生した時期と概ね一致し、アオコが観察されるほど藍藻類が多いときには、数時間周期の小刻み

な変動成分が卓越するといえる。

図5(2)より、緑藻類は 8.0×10^{-7} Hz以下(約2週間周期以上)の低周波成分が支配的である。10月に高周波成分の寄与が散在しているものの、その大きさは相対的に小さい。これより、緑藻類は期間を通じて約2週間周期以上の緩やかな周期の変動成分が顕著であることが分かる。

図5(3)より、渦鞭毛藻/珪藻類は 4.0×10^{-7} Hz以下の周波数成分が支配的である。つまり、29日以上という長い周期で変動していることが示唆される。また、11月後半に高周波成分の寄与が増大し、藍藻類と同様に、出現量の増加に応じて周期の短い成分が顕著となる。一方、図5(4)よりクリプト藻類は比較的低周波成分の寄与が高いものの、期間を通じて支配的な周波数成分は確認できなかった。また、渦鞭毛藻/珪藻類と同様、11月下旬に高周波成分の寄与が散在した。

図5(5)より、総Chl.aは $10^{-6} \sim 10^{-5}$ Hz(約2日~10日周期以上)の低周波成分が支配的である。また、同図は図5(1)と類似した結果であり、観測期間中の総Chl.aの動態は藍藻類の影響が極めて大きいことに起因すると考えられる。

(2) 環境要因に対するChl.aの応答性

藻類量の季節的変動と水質的・気象的な環境要因との関連性を検討するために、水温ならびに気温、日射

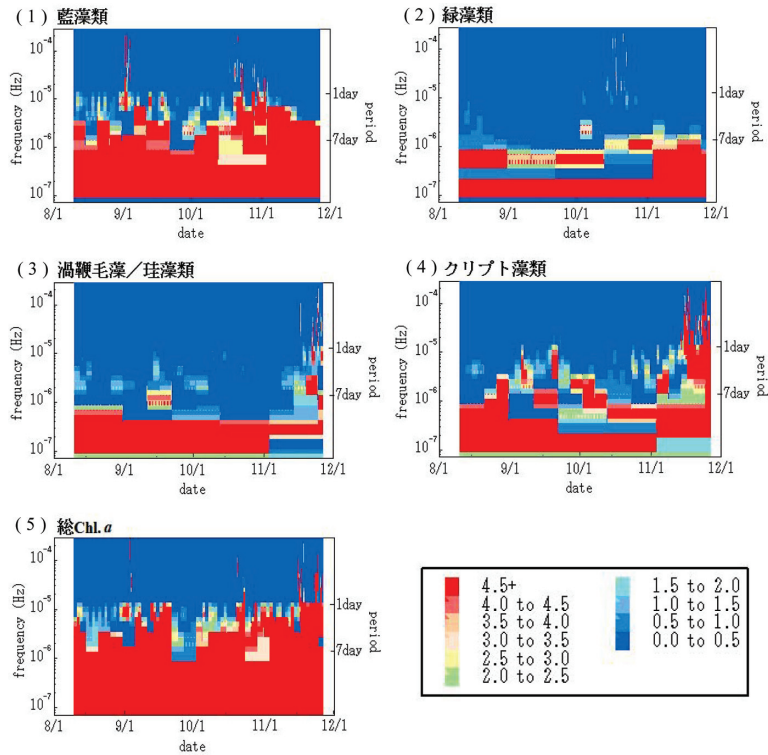


図5 藻類網別 Chl.*a* と総 Chl.*a* のウェーブレット解析結果

量、風速、湿度の各気象観測データ（図6）と藻類網別 Chl.*a* との相互相関係数を求めた。その結果、藻類網別 Chl.*a* はいずれの環境要因とも良好な相互相関を示さなかった。そこで、藻類の季節的消長の観点から環境要因との応答性を検討するにあたり、Chl.*a* の1日スケールでの変動成分の挙動特性の把握は重要であると位置づけ、とくに、環境要因として藻類の生長・増殖に最も大きな影響を及ぼす水温、日射量に着目した。すなわち、Chl.*a* および水温・日射量の環境要因の24時間周期のウェーブレット成分間の相互相関係数を計算し、変動成分の視点から両者の応答性を検討した。水温と日射量のそれぞれに対する計算結果を図7、8に示す。

同図より、緑藻類と藍藻類の現存量はいずれも水温、日射量に対して良好な応答性を示し、また緑藻類と藍藻類で異なる結果であった。すなわち、タイムラグがゼロの場合に着目すると、水温、日射量に対して緑藻類と藍藻類はそれぞれ正、負の相関を示した。このような相関は、緑藻類と藍藻類の種間競争を考える上で重要な知見を与えるものと考えられる。一方、渦鞭毛藻/珪藻類とクリプト藻類については、明確な相互相

関を見出すことができない。この理由として、両藻類の出現が11月以降と限定的であったことが推測できる。そこで、Chl.*a* の増加傾向が顕著に見られた11月のデータを用いて相互相関係数を計算し、その結果を図9に示す。同図より、藻類の増殖が見られる期間に限定することでも、渦鞭毛藻/珪藻類、クリプト藻類は水温、日射量に対して良好な応答性を見出すことはできない。以上から、藻類の現存量と環境要因の関連性を検討するにあたり、1日周期の変動成分に着目することで、両者の明確な応答性を見出すことができる。

要 約

富栄養化水域の水環境評価において、藻類の総量に加え、種構成や現存量の季節的変化の観点から検討する意義は大きい。本研究では、Chl.*a* ならびに TP がいずれも富栄養湖レベルにあり、夏季にアオコの発生が観測される農業用ため池を対象に、多波長励起蛍光光度計により藍藻類、緑藻類、渦鞭毛藻/珪藻類、クリプト藻類に区分した4種の藻類網別 Chl.*a* の連続観測を行った。ウェーブレット解析による各 Chl.*a* の動態特性を検討することで、対象水域の藻類の種構成と

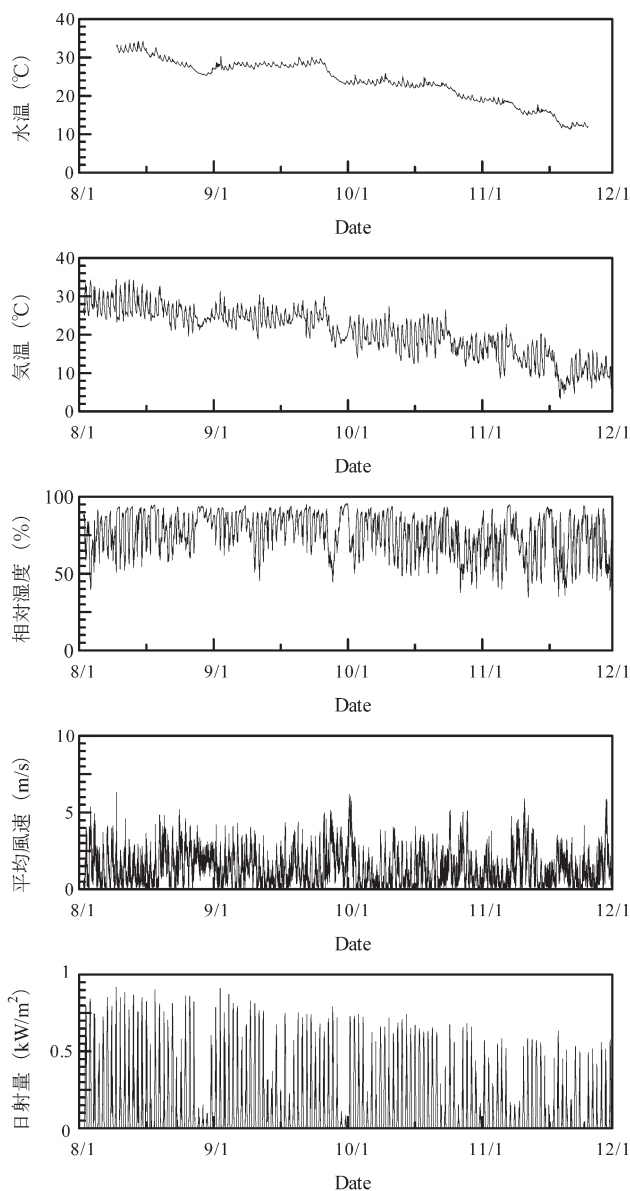


図6 水温および気象観測データ

その現存量の季節的消長について論じた。

観測結果より、対象池では夏季に藍藻類が多く、秋季にかけて藍藻類が減少するにつれて渦鞭毛藻/珪藻類、クリプト藻類が増加した。ウェーブレットによる藻類網別 Chl. *a* の時間周波数解析の結果、各藻類網に共通して、観測期間中の変動成分では、1週間以上の緩やかな周波数成分が卓越し、また約 1.2×10^{-5} Hz (1日周期) 以上の高い周波数成分の寄与が局所的に

存在した。4種いずれの藻類において、この1日周期の変動成分の寄与が高い期間で、Chl. *a* 濃度の増加が見られた。つぎに、Chl. *a* 濃度の動態と環境要因との関連性を検討するために、水温、日射量に対する各 Chl. *a* 濃度の相互相関係数を求めたところ、各 Chl. *a* 濃度と環境要因の間には明確な相関を見出せなかった。そこで、その変動成分に着目し、両者の1日周期のウェーブレット成分間の相互相関について検討した。

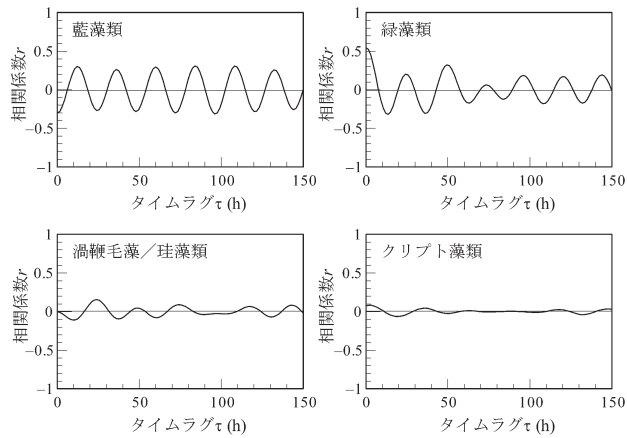


図7 24時間周期の藻類網別 Chl.*a* と水温のウェーブレット成分間の相互相関

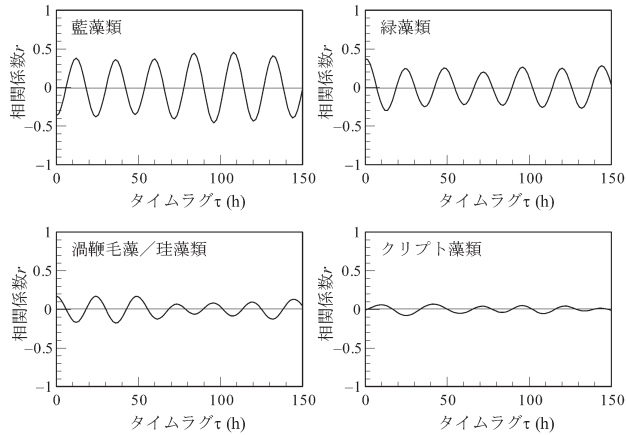


図8 24時間周期の藻類網別 Chl.*a* と日射量のウェーブレット成分間の相互相関

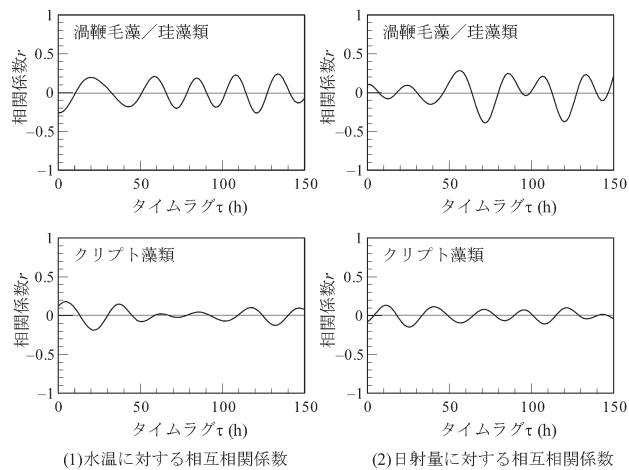


図9 発生期間を考慮した渦鞭毛藻/珪藻類、クリプト藻類と水温、日射量のウェーブレット成分(24時間周期)間の相互相関

その結果、観測期間中に優占的に存在した藍藻類、緑藻類の1日周期の変動成分は、水温、日射量のそれに対して良好な相互相関を示した。以上より、藻類の発生量と環境要因の関連性を検討するにあたり、1日周期の変動成分に着目することで応答性を見出すことができた。

文 献

- 藤本尚志・福島武彦・稲盛悠平・須藤隆一 1995 全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子との関係。水環境学会誌, 18(11): 901-908
- 古里栄一・上久保典昭・浅枝隆 2003 現地における植物プランクトン網別現存量の高速測定手法の適用, 2003年度第37回日本水環境学会年会講演集: 118
- 原田昌佳・福田真弓・齋幸治・吉田勲・平松和昭・森 牧人 2006 Wavelet 解析を援用した Local Approximation 法による富栄養湖の溶存酸素の短期予測, 農業土木学会論文集, 246: 139-149
- 井芹晴香・原田昌佳・平松和昭・森 牧人・丸居 篤 2008 動植物プランクトンの季節的消長から見た富栄養化貯水池の水環境評価, 九大農学芸誌, 63-2: 147-160
- Johnstone, I. M. and B. W. Silverman 1997 Wavelet Threshold Estimators for Data with Correlated Noise. *J.R. Statist. Soc., Series B*, 59: 319-351
- 松本晶子・原田昌佳・平松和昭・森 牧人・丸居 篤 2008 動植物プランクトンの季節的消長から見た富栄養化貯水池の水環境評価, 九大農学芸誌, 63-2: 161-177
- Newland, D. E. 1993 An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis, Longman Scientific and Technical: 295-370
- 新 誠一・中野和司監訳 2005 図説ウェーブレット変換ハンドブック, 朝倉書店: 107-115
- 吉永育生・白谷栄作・長谷部均・馮 延文・人見忠良 2004 農業用調整池のクロロフィル a , COD_{Mn} 及び栄養塩類濃度の季節変動特性, 水環境学会誌, 27, No.2: 137-142

Summary

In the water environment evaluation of a eutrophic water body, it is important to conduct it from the viewpoint of seasonal change and how that affects the quantity and kind of algae in addition to its gross weight. In this study, consecutive observation of the Chl. a density according to the algae class was conducted, and the change of characteristics was examined by wavelet analysis. In this research, for *In Vivo* Chl. a , which is divided into blue-green algae, green algae, dinoflagellate genus/diatoms, and cryptophyte algae, total Chl. a and water temperature were measured by multiwavelength excitation spectrofluorometer (FluoroProbe). Additionally, the surface water was sampled about once a week, and algae were identified to the genus level with an optical microscope. Based on this observation, a lot of blue-green algae exist in the intended reservoir in summer, and as blue-green algae decreased, dinoflagellate genus/diatoms and cryptophyte algae also decreased. In the fluctuation component of the Chl. a density in each algae class, a slow frequency component from a few days to a week accelerated, and there was the contribution of a frequency component of about 1.2×10^{-5} (circadian rhythm) locally. The Chl. a density increased when the contribution of the fluctuation component of this circadian rhythm was high in all four kinds of algae. Furthermore, to examine the relevance between a change in the Chl. a density and the environmental factor, a cross-correlation coefficient of each Chl. a density for water temperature and amount of solar radiation was evaluated. As a result, because the correlation between each Chl. a density and the environmental factor could not be found, their fluctuation components were focused on, and the cross-correlation of the wavelet component interval for 24 hours was examined for both. In this way, good cross-correlation was accepted for blue-green algae and green algae, which should be considered mainly a result of eutrophication. From these, good responsiveness could be found by paying attention to the fluctuation component of a circadian rhythm when relevance of the quantity of the outbreak of algae and the environmental factor were examined.