資料 [Limnological record]

フィコシアニンセンサーによる野外でのアオコの定量

中川 恵¹⁾・高村典子¹⁾

Quantification of cyanobacterial water blooms by a phycocyanin sensor in the field

Megumi NAKAGAWA¹⁾ and Noriko TAKAMURA¹⁾

Abstract

We studied whether values of a phycocyanin sensor (BGA (Blue-Green Algae)) (YSI Inc.) revealed the total biovolume of cyanobacteria and that of bloom-forming cyanobacteria, respectively, in 64 irrigation ponds, and concluded that the sensor explained 87% of both biovolumes. No cyanobacteria were observed under microscopy with the phycocyanin sensor value of $< 10^2$ cells mL^{-1} , and cyanobacteria were observed in only 40% of ponds with sensor values between 123 and 2,653 cells mL^{-1} . However, cyanobacteria were always observed with a sensor value of $\geq 2,758$ cells mL^{-1} . A significant linear regression with a sensor value of $\geq 2,758$ cells mL^{-1} was obtained to estimate the biovolume of cyanobacteria. A similar result was obtained for bloom-forming cyanobacteria with a sensor value of $\geq 6,680$ cells mL^{-1} . In the conclusion, the phycocyanin sensor showed the total biovolume of cyanobacteria and that of bloom-forming cyanobacteria in the field when the phycocyanin sensor value was generally $\geq 10^4$ cells mL^{-1} .

Keywords: cyanobacteria, water bloom, biovolume, phycocyanin sensor, irrigation pond

摘 要

野外で簡便にフィコシアニンの量が測定できるフィコシアニンセンサー (YSI 社) の計測値が、検鏡法にて定量したシアノバクテリアの現存量 (構成種の細胞体積の総和) ならびにアオコ構成種の現存量を表すかどうかを、ため池で採集した植物プランクトンについて検討した。センサー計測値はシアノバクテリアの現存量もしくはアオコ構成種の現存量のおおの 87% を説明した。

センサー計測値が 10^2 cells mL^{-1} より小さい池では、顕微鏡下でシアノバクテリアは観察されなかった。センサー計測値が 123 ~ 2,653 cells mL^{-1} の間では、シアノバクテリアが検鏡で認められない池が 6 割あった。一方、センサー計測値が 2,758 cells mL^{-1} 以上では、全ての池でシアノバクテリアが観察された。センサー計測値が 2,758 cells mL^{-1} 以上を示した池について、センサー計測値からシアノバクテリアの現存量を推定する有意な線形回帰式を得た。シアノバクテリアの代わりにアオコ構成種の現存量について検討したところ、センサー計測値が 6,680 cells mL^{-1} 以上を示した池について、同様の結果を得た。

以上より、ため池の植物プランクトンについては、センサー計測値がおおむね 10^4 cells mL^{-1} 以上と高い範囲であれば、その値は野外のシアノバクテリアの現存量もしくはアオコ構成種の現存量を表すと考

¹⁾ (独) 国立環境研究所 〒305-8506 つくば市小野川 16-2 National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan
(連絡先 中川 恵 ✉ nakagawa.megumi@nies.go.jp)

えることができた。

キーワード：シアノバクテリア，アオコ，現存量，フィコシアニンセンサー，ため池

(2010 年 12 月 13 日受付；2011 年 3 月 24 日受理)

はじめに

1970 年代より様々な湖沼やため池で富栄養化が顕在化し、各地でアオコの発生がみられるようになった。「アオコ」は科学用語として明確に定義されていないが、湖沼でシアノバクテリアが大発生する現象の一つで水面に集積して水の色が濃緑色に呈する場合と、そのような状態を創出している原因のシアノバクテリアを指す場合との両方を示す（渡辺，1994；近藤ら，1998）。つまり，アオコを構成する藻類種は，それ自体がアオコと呼ばれることもあるが，現象としてのアオコ状態を創出する種でもある。アオコの原因となるタクサ（Taxa）には，主に *Anabaena* 属，*Microcystis* 属，*Planktothrix* 属などが知られている（渡辺，2007）。

アオコが発生すると，遮光して他の水生植物の成長を妨げる。また，それ自体の分解によって溶存酸素が消費されるために他の水生動物が酸欠となり，死に至らしめたりすることがある。また，カビ臭が発生したり，肝臓毒や神経毒などの有害な化学物質が生成される（朴・林，1994；彼谷，2001）。アオコの発生を制御することは，安全な飲用水を確保するだけでなく，農業や内水面漁業を良好に営み，生物多様性を保全していく上で重要である。そのためには，どの程度の量のアオコが，いつ，どこで発生しているかを，迅速，かつ簡便に捉える必要がある。

現在，アオコの定量は検鏡法（高村，2003）で行われている。また，液体クロマトグラフィーによりフィコシアニンを定量（Otsuki et al., 1994）し，指標値とする場合がある。しかし，両者ともに現場ですぐに測定値がでない。さらに，検鏡法では同定に慣れるのに熟練が必要であり，しかもアオコ構成種は不定形の群体を作ることがあるため，計数作業は容易ではない。こうした理由により，野外でのアオコの定量には相当な時間を要してきた。

しかし，最近，YSI 社が開発したフィコシアニンセンサーは，主にシアノバクテリアが有するフィコシアニンの濃度を蛍光法で測定し，*M. aeruginosa* の細胞濃度（cells mL⁻¹）を計測値として出力するもので，現場でアオコを

すぐに定量できるとしている。しかし，多様な植物プランクトン種で構成される自然の湖水や池水について，その定量性は不明である。そこで，本研究では兵庫県東播磨・北播磨にある 64 のため池において，同一の対象試水についてフィコシアニンセンサーでの現場計測値と検鏡法によるシアノバクテリアならびにアオコの現存量を比較することで，本センサーの計測値が野外のシアノバクテリアならびにアオコの現存量を表すかどうかを検討した。

方 法

現場計測

調査は，2007 年 8 月に，兵庫県東播磨地域にある 64 のため池で実施した（Fig. 1）。池の最深部へはフローターを用いて移動し，その水深 0.2 m のシアノバクテリア濃度（cells mL⁻¹）を BGA センサー（6131, YSI, Yellow Springs, Ohio）と Multiparameter Display System（650MDS, YSI, Yellow Springs, Ohio）を備えた多項目水質計（6600-D, YSI, Yellow Springs, Ohio）で測定した。数値は毎回，付帯のワイパーでクリーニングした後，水面が上記水質計を池水に浸す前と同じ状態になるのを確認してからおよそ 2 分後の安定した値を読んだ。

池の水の採水は，現場計測の直後，池水で共洗いした 100 mL 容ポリプロピレン容器に水深 0.2 m の池水を直接採水した。試水はすぐにルゴール液（高村，2003）を数滴滴下して固定し，室温で保存した。

フィコシアニンセンサーの計測は，本センサーの励起 LED 発光部より 595 nm の光が水中に照射されると，それに当たったフィコシアニンが励起されて蛍光を発するため，その蛍光 650 nm の光を本センサーの受光部が捕捉する。出力単位は *M. aeruginosa* の細胞濃度（cells mL⁻¹，以後，計測値と記す）として示され，0 ～ 2.80 × 10⁵ cells mL⁻¹（定量下限値：220 cells mL⁻¹，分解能：1 cell mL⁻¹）が計測範囲である。測定可能範囲内の線形性には，0 ～ 400 μg L⁻¹ の間を段階的に希釈したローダミン液の濃度を説明変数，本センサーの蛍光強度を目的

Fig. 1. Map of 64 irrigation ponds in present study area.

図 1. 本調査地域における 64 のため池の位置.

変数とした時の単回帰直線の決定係数 ($r^2 = 0.9999$) が用いられている。また、 $0 \sim 1.82 \times 10^5 \text{ cells mL}^{-1}$ までの間を段階的に希釈した *M. aeruginosa* の密度を説明変数、蛍光強度を目的変数とした時の単回帰直線の r^2 は 0.999 である (YSI 社 私信)。

同定・計数・体積への換算

試水はよく振って均一にした後、Utermöhl (1958) のセディメントチャンバーに溢れる程度に入れ、ガラス板で気泡が入らぬように余分な水を切って蓋をした。24 時間静置した後、対物レンズ 40 倍を備えた倒立顕微鏡

(TS-100, Nikon, Tokyo) で、チャンバーの直径を含む線上に存在する植物プランクトン種もしくはタクサを数えた。アオコ構成種（渡邊, 2007）はほとんどが群体で存在するため、種ごとに計数ユニットを決めて計数した。例えば、*Planktothrix* のように糸状群体を形成するタクサは接眼マイクロメーターに合わせ 25 μm の円筒体、同じく *Anabaenopsis* のように螺旋状群体を形成するタクサは 1 螺旋、*Aphanocapsa* のように塊状群体を形成するタクサは 1 塊とした。計数は総ユニット数が 400 以上になるまで、チャンバーの直径を含む複数列の線上を計数した。不定形の群体を形成する *Microcystis* は、超音波破砕機で群体を壊した後、対物レンズ 20 倍を備えた透過型正立顕微鏡 (BX51, Olympus, Tokyo) で、血球

計数盤を用いて細胞数を計数した。*Anabaena* が混在する池では、群体を破砕すると *Microcystis* の細胞かどうか分からなくなるため、予め群体状のまま細胞サイズを計測し、両タクサの細胞の違いを認識した上で計数を実施した。

次に、各タクサの現存量 ($\mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$) を算出するため、おのこのについて葉緑体（シアノバクテリアについては細胞全体）の体積を求めた。体積への換算は、葉緑体の形状を球、楕円体、円筒体、直方体、三角錐などに近似させ（Wetzel and Likens, 1991）、基本となる長さを計測して得た。長さの計測は、顕微鏡画像をデジタルカメラ (DFC490, Leica, Heerbrugg, Switzerland) で取り込み、計測ソフト (IM500 Ver. 5) で行なった。

Table 1. Cyanobacterial taxa observed in 64 irrigation ponds in summer 2007. ○ denotes bloom-forming taxa (Watanabe, 2007).

表 1. 2007 年 8 月に 64 のため池で出現したシアノバクテリアタクサの一覧。○は渡邊（2007）に従ったアオコ構成種。

Order	Genus	Species	Water bloom forming taxa by Watanabe (2007)
Chroococcales	<i>Aphanocapsa</i>	spp.	-
Chroococcales	<i>Chroococcus</i>	<i>turgidus</i> (Kützing) Nägeli	-
Chroococcales	<i>Dactylococcopsis</i>	spp.	-
Chroococcales	<i>Merismopedia</i>	spp.	-
Chroococcales	<i>Microcystis</i>	<i>aeruginosa</i> (Kützing) Kützing	○
Chroococcales	<i>Microcystis</i>	<i>wesenbergii</i> (Komárek) Komárek in Kondratieva	○
Chroococcales	<i>Microcystis</i>	spp.	○
Chroococcales	<i>Rhabdoderma</i>	spp.	-
Nostocales	<i>Anabaena</i>	<i>eucompacta</i> Li et M. M. Watanabe	○
Nostocales	<i>Anabaena</i>	<i>mendotae</i> Trelease ^{*1}	○
Nostocales	<i>Anabaena</i>	<i>oumiana</i> M. Watanabe	○
Nostocales	<i>Anabaena</i>	<i>pseudocompacta</i> M. Watanabe	○
Nostocales	<i>Anabaena</i>	<i>spiroides</i> Klebahn	○
Nostocales	<i>Anabaena</i>	<i>viguieri</i> Denis et Frémy	○
Nostocales	<i>Anabaena</i>	spp. ^{*2}	○
Nostocales	<i>Anabaenopsis</i>	<i>circularis</i> (G. S. West) Woloszinska et Miller	○
Nostocales	<i>Aphanizomenon</i>	<i>flos-aquae</i> (L.) Ralfs	○
Nostocales	<i>Aphanizomenon</i>	spp. ^{*2}	○
Nostocales	<i>Cylindrospermopsis</i>	<i>curvispora</i> M. Watanabe	○
Nostocales	<i>Cylindrospermopsis</i>	<i>raciborskii</i> (Woloszinska) Seenayya et S. Raju	○
Nostocales	<i>Raphidiopsis</i>	<i>mediterranea</i> Skuja f. major Yoneda	○
Oscillatoriales	<i>Lyngbya</i>	<i>contorta</i> Lemmermann	-
Oscillatoriales	<i>Lyngbya</i>	<i>limnetica</i> Lemmermann	-
Oscillatoriales	<i>Phormidium</i>	<i>tenue</i> (C. Agardh ex Gomont) Anagnostidis et Komárek	-
Oscillatoriales	<i>Planktothrix</i>	<i>agardhii</i> (Gomont) Anagnostidis et Komárek	○
Oscillatoriales	<i>Planktothrix</i>	<i>isothrix</i> (Skuja) Komárek et Komárek	○
Oscillatoriales	<i>Planktothrix</i>	<i>raciborskii</i> (Woloszynska) Suda et M. M. Watanabe	○
Oscillatoriales	<i>Planktothrix</i>	spp. without <i>agardhii</i> , <i>isothrix</i> , <i>raciborskii</i>	○
Oscillatoriales	<i>Romeria</i>	<i>elegans</i> Woloszynska ex Geitler	-
Oscillatoriales	<i>Spirulina</i>	spp. without <i>maxima</i>	-

*1 : *Anabaena mendotae* could not be identified because there was only one occurrence (pond 07-03) and there were few akinetes.

*2 : *Anabaena* and *Aphanizomenon* spp. could not be identified because there were few akinetes. Both trichomes were straight.

同定に用いた文献は以下である。シアノバクテリア (Cyanophyceae) は Huber-Pestalozzi (1938) および 渡邊 (2007), 黄緑色藻 (Xanthophyceae) は Ettl (1978), 黄緑色藻 (Chrysophyceae) は Starmach (1985), 珪藻 (Bacillariophyceae) は Krammer and Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991ab) と 渡辺 (2005), 渦鞭毛藻 (Dinophyceae), クリプト藻 (Cryptophyceae) および プラシノ藻 (Prasinophyceae) は 水野・高橋 (2000), ミドリムシ藻 (Euglenophyceae) は Huber-Pestalozzi (1955), ラフィド藻 (Raphidophyceae (Chloromonadophyceae)) は 廣瀬 (1977), 緑藻 (Chlorophyceae) は 廣瀬 (1977), Komárek and Fott (1983), 水野・高橋 (2000) および 山岸 (1998)。

なお, 本研究では, 渡邊 (2007) が日本アオコ大図鑑に定義しているタクサをアオコ構成種とした (Table 1)。

解析

センサー計測値がどのような藻類グループの現存量で説明されるかを調べるため, センサー計測値を目的変数, アオコ構成種の現存量, シアノバクテリアの現存量, クリプト藻の現存量ならびに渦鞭毛藻の現存量を説明変数として単回帰および重回帰分析を行った。次に, センサー計測値を説明変数, 検鏡にて算出したシアノバクテリアの現存量ならびにアオコ構成種 (Table 1) の現存量を目的変数とした単回帰分析を行った。計算には R (version 2.4.1) を用いた。

結果

出現した植物プランクトンの藻類グループ別現存量

64 のため池で出現した植物プランクトンの藻類グループ別現存量を Fig. 2 に示す。珪藻綱 (Fig. 2c), 緑藻綱 (Fig. 2d), クリプト藻綱 (Fig. 2e), 渦鞭毛藻綱 (Fig. 2f), ミドリムシ藻綱 (Fig. 2g) の 5 分類群は, ほぼすべての池で出現した。これらに対し, シアノバクテリア (Fig. 2a) は 38 池, ラフィド藻綱 (Fig. 2h) は 18 池, 黄緑色藻は 28 池, 黄緑色藻は 40 池, プラシノ藻は 8 池で出現した。

現存量をみると, シアノバクテリア, 珪藻綱および緑藻綱が大きく, それぞれの最大値は, 順に $8.69 \times 10^7 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$, $1.99 \times 10^7 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ および $3.15 \times 10^7 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$ であった。クリプト藻, 渦鞭毛藻綱, ミドリムシ藻綱およびラフィド藻綱の現存量は, 先の 3 綱より一桁小さかった (最大値は, 順に $9.98 \times 10^6 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$, $3.47 \times 10^6 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$, $6.73 \times 10^6 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$, $3.93 \times 10^6 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$)。

Fig. 2. Biovolumes of each algal taxonomical group. Ponds listed in order of phycocyanin sensor values, from small (left) to large (right).

図 2. 64 のため池で出現した植物プランクトンの藻類グループ別現存量 (体積)。フィコシアニンセンサーの読みの小さいほうから順に並べた。

黄緑色藻綱, 黄緑色藻綱およびプラシノ藻綱の現存量はこれら 4 綱より更に小さかった (最大値は, 順に $6.40 \times 10^5 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$, $1.31 \times 10^5 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$, $3.04 \times 10^4 \mu\text{m}^3 \text{mL}^{-1}$)。

フィコシアニンセンサー計測値を説明する藻類グループ
フィコシアニンはシアノバクテリアとクリプト藻が持つ他に, 一部の渦鞭毛藻でも有する (千原, 1999)。そこで, センサーの値が, シアノバクテリアの現存量に加え, クリプト藻や渦鞭毛藻の現存量にどの程度影響しているのかを検討した (Table 2)。その結果, シアノバクテリア現存量は単独でセンサー測定値の全変動の 87 % を説明した ($p < 0.001$)。シアノバクテリアの現存量にクリプト藻綱の現存量を加えると説明率は 90% と増加した。しかし, おおのに渦鞭毛藻綱の現存量を加えても説明率は増加しなかった。また, シアノバクテリアの現存量の代わりにアオコ構成種の現存量についても検討したところ, 同様の結果を得た。

Table 2. Results from multiple linear regression analysis explaining phycocyanin sensor values.

表 2. フィコシアニンセンサー計測値を目的変数 (y), 藻類グループそれぞれの現存量を説明変数 (x) とした時の重回帰分析の結果.

Explanatory variable (x)	df	F	p	adj. r ²
Cyanobacteria	1 , 62	411.7	< 0.001	0.867
Cyanobacteria, Cryptophyceae	2 , 61	290.5	< 0.001	0.902
Cyanobacteria, Dinophyceae	2 , 61	202.5	< 0.001	0.865
Cyanobacteria, Cryptophyceae, Dinophyceae	3 , 60	190.5	< 0.001	0.900
Bloom-forming cyanobacteria	1 , 62	419.0	< 0.001	0.869
Bloom-forming cyanobacteria, Cryptophyceae	2 , 61	295.8	< 0.001	0.904
Bloom-forming cyanobacteria, Dinophyceae	2 , 61	206.2	< 0.001	0.867
Bloom-forming cyanobacteria, Cryptophyceae, Dinophyceae	3 , 60	194.0	< 0.001	0.902

これらのことから、本センサーの計測値は、シアノバクテリア現存量もしくはアオコ構成種の現存量をよく説明し、クリプト藻綱も 3% 程度影響していることが分かった。

フィコシアニンセンサー計測値と検鏡によるシアノバクテリアの現存量の関係

本調査では、センサー計測値は $0 \sim 74,379 \text{ cells mL}^{-1}$ の間で出力された (Fig. 3)。これは、同時に測定したクロロフィル *a* 濃度では $1 \sim 438 \mu\text{g L}^{-1}$ に相当した (中川ら, 未発表)。センサー計測値とシアノバクテリアの現存量の関係 (Fig. 3a) は、以下の 3 つの範囲に分けられた。すなわち、1) センサー計測値が低くシアノバクテリアが認められない範囲、2) センサー計測値が中程度でシアノバクテリアは認められる場合と認められない場合がある範囲、3) センサー計測値が高く、すべてにシアノバクテリアが認められる範囲、である。

センサー計測値が $0 \sim 65 \text{ cells mL}^{-1}$ の間にあった池は 64 池中 5 池あり、顕微鏡下でシアノバクテリアの存在は認められなかった (Fig. 3a)。

センサー計測値が $123 \sim 2,653 \text{ cells mL}^{-1}$ の間にあった池は、64 池中 34 池あった。34 池のうち 13 池では、顕微鏡下でシアノバクテリアの存在が認められた (Fig. 3a)。この 13 池のうち 3 池は、センサー計測値が定量下限値 ($220 \text{ cells mL}^{-1}$) とされる数値以下であったが、ごく少量 (少ない順に 1.16×10^3 , 6.91×10^3 および $12.8 \times 10^3 \mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$) のシアノバクテリア (*Chroococcus turgidus*, *Dactylococcopsis* spp., *Lyngbya contorta* あるいは *Lyngbya limnetica*) が出現していた (Fig. 2a)。一方, 34

Fig. 3. Relationships between phycocyanin sensor values and total biovolumes of cyanobacteria (a) and bloom-forming cyanobacteria (b), respectively.

図 3. フィコシアニンセンサー計測値とシアノバクテリアの現存量 (a) ならびにアオコ構成種の現存量 (b) との関係。両軸は常用対数で示した。

池のうち残る 21 池ではシアノバクテリアは観察されなかった。従って、この範囲のセンサー計測値では、シアノバクテリアが検鏡では認められない場合でも、シアノバクテリアの存在を示す計測値である池が 6 割あった。実際、シアノバクテリアが観察されなかった 21 池のうち 7 池、加えて、シアノバクテリアの存在があった 13 池のうち 1 池では、クリプト藻もしくは渦鞭毛藻が優占していた。そのため、これらの池では、これらの藻類グループのフィコシアニンを捉えて値として出力していた可能性が考えられた。この区間では、本センサーはシアノバクテリア、クリプト藻、渦鞭毛藻の区別が出来ていない可能性がある。

センサー計測値が $2,758 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上であった 25 池では、全ての池でシアノバクテリアが観察された (Fig. 3a)。そこで、センサー計測値が $2,758 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上であった 25 池について、センサー計測値を説明変数 (x)、検鏡によるシアノバクテリアの現存量を目的変数 (y1) として単回帰分析を行い、以下の式を得た。

$$y1 = 842.5 x - 3361401.8 \quad (n = 25, r^2 = 0.810, p < 0.001) \quad (1)$$

回帰直線へのあてはまり具合 ($r^2 = 0.810$) は良く、得られた傾きは有意であった ($p < 0.001$)。そのため、センサー計測値が $2,758 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上であれば、シアノバクテリアの現存量をセンサー計測値でおおむね説明できることが分かった。

フィコシアニンセンサー計測値と検鏡によるアオコ構成種の現存量の関係

同様に、センサー計測値と検鏡して得たアオコ構成種の現存量の関係 (Fig. 3b) も、以下の 3 つの範囲に分けられた。すなわち、1) センサー計測値が低くアオコ構成種が認められない範囲、2) センサー計測値が中程度でアオコ構成種は認められる場合と認められない場合がある範囲、3) センサー計測値が高く、すべてにアオコ構成種が認められる範囲、である。

センサー計測値が定量下限値 ($220 \text{ cells mL}^{-1}$) とされる数値以下としている場合が 64 池中 11 池であった。11 池のうち 3 池には、先に示したようにシアノバクテリアが出現していた (Fig. 2a) が、アオコ構成種の出現は認められなかった (Fig. 2b)。つまり、本センサーが定量下限値以下である場合には、アオコは出現していないと判定できた。

センサー計測値が $220 \sim 5,637 \text{ cells mL}^{-1}$ の間にあった池は、64 池中 34 池あった。このうち 9 池では顕微鏡

下でアオコ構成種の存在が認められた (Fig. 2b) が、残る 25 池では観察されなかった。ただし、この 25 池のうち 7 池では、今回アオコと定義されなかったシアノバクテリア (*L. contorta*, *L. limnetica* あるいは *Phormidium tenue*) が $1.42 \times 10^3 \sim 1.42 \times 10^6 \mu\text{m}^3 \text{ mL}^{-1}$ の範囲で出現していた。従って、この範囲のセンサー計測値では、シアノバクテリアもしくはアオコ構成種が検鏡では認められない場合でも、アオコ構成種を含むシアノバクテリアの存在を示す計測値である池が半数以上あった。

センサー計測値が $6,680 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上であった 19 池では、全ての池でアオコ構成種が観察された (Fig. 2a)。そこで、センサー計測値が $6,680 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上であった 19 池について、センサー計測値を説明変数 (x)、検鏡によるアオコ構成種の現存量を目的変数 (y2) として単回帰分析を行い、以下の式を得た。

$$y2 = 874.9 x - 5418363.4 \quad (n = 19, r^2 = 0.770, p < 0.001) \quad (2)$$

回帰直線へのあてはまり具合 ($r^2 = 0.770$) はシアノバクテリアの現存量を目的変数とした場合 (1) ($r^2 = 0.810$) より若干低くなったものの得られた傾きは有意であった ($p < 0.001$)。そのため、センサー計測値が $6,680 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上であれば、アオコ構成種の現存量も本センサー計測値でおおむね説明できることが分かった。

まとめ

フィコシアニンセンサー計測値は、シアノバクテリアの現存量もしくはアオコ構成種の現存量のおおの 87% を説明した。センサー計測値が定量下限値 ($220 \text{ cells mL}^{-1}$) 以下では、おおむね顕微鏡下でアオコ構成種は観察されなかった。センサー計測値が $123 \sim 2,653 \text{ cells mL}^{-1}$ の間では、シアノバクテリアが検鏡で認められない場合が 6 割あった。一方、センサー計測値が $2,758 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上では、全ての池でシアノバクテリアが観察され、さらに $6,680 \text{ cells mL}^{-1}$ 以上では、全ての池でアオコ構成種が観察された。双方の閾値以上について、センサー計測値からシアノバクテリアの現存量もしくは、アオコ構成種の現存量を推定する有意な線形回帰式を得た。

謝 辞

(株) 地域生態系保全の大封裕介氏にはため池にて計測と採集の補助をしていただいた。ここに記して感謝い

たします。

文 献

- 千原光男 (1999): 藻類の多様性と系統. バイオダイバーシティ・シリーズ 3. 裳華房, 東京.
- Ettl, H. (1978): Xanthophyceae. In: 3. Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, J. Gerloff and H. Heynig (eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- 廣瀬弘幸 (1977): 日本淡水藻図鑑. 内田老鶴圃新社, 東京.
- Huber-Pestalozzi, G. (1938): Das Phytoplankton des Süßwassers. Band XVI. 1. Teil. In: Die Binnengewässer, A. E. Thienemann (ed.). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Huber-Pestalozzi, G. (1955): Das Phytoplankton des Süßwassers. 4. Teil. Euglenophyceen. In: Die Binnengewässer, A. E. Thienemann (ed.). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- 彼谷邦光 (2001): 飲料水に忍びよる有毒シアノバクテリア. 裳華房, 東京.
- Komárek, J. B. and B. Fott (1983): Das Phytoplankton des Süßwassers. 7. Teil. 1. Hälfte. Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Chlorococcales. In: Die Binnengewässer, H.-J. Elster and W. E. Ohne (eds.). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- 近藤竜二・鍵谷 豪・幸 保孝・廣石伸互・渡辺眞之 (1998): アオコの分類. 日本水産学会誌, 64: 291-292.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot (1986): Band 2/1. Bacillariophyceae. 1. Teil. Naviculaceae. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot (1988): Band 2/2. Bacillariophyceae. 2. Teil. Bacillariophyceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot (1991a): Band 2/3. Bacillariophyceae. 3. Teil. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot (1991b): Band 2/4. Bacillariophyceae. 4. Teil. Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- 水野寿彦・高橋永治 (2000): 日本淡水プランクトン図鑑. 東海出版, 東京.
- Otsuki, A., Omi, T., Hashimoto, S., Aizaki, M and N. Takamura (1994): HPLC fluorometric determination of natural phytoplankton phycocyanin and its usefulness as cyanobacterial biomass in highly eutrophic shallow lake. Water, Air and Soil Pollution, 76: 383-396.
- 朴 虎東・林 秀剛 (1994): *Microcystis* 属とミクロキスティン. アオコその出現と毒素ー, 渡辺真利代・原田健一・藤木博太 (編): 75-99. 裳華房, 東京.
- Starmach, K. (1985): Band 1. Chrysophyceae und Haptophyceae. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- 高村典子 (2003): 植物プランクトン. 地球環境調査計測事典 第2巻 陸域編②, 竹内 均 (監修): 187-191. フジ・テクノシステム, 東京.
- Utermöhl, H. (1958): Zur Vervollkommenung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Mitteilungen, 9: 1-38.
- 渡辺眞之 (2007): 日本アオコ大図鑑. 誠文堂新光社, 東京.
- 渡辺仁治 (2005): 淡水珪藻生態図鑑. 内田老鶴圃, 東京.
- 渡辺泰徳 (1994): アオコの生物学と生態学. アオコその出現と毒素ー, 渡辺真利代・原田健一・藤木博太 (編): 1-24. 裳華房, 東京.
- Wetzel, R. G. and G. E. Likens (1991): Limnological Analyses. Springer-Verlag, New York.
- 山岸高旺 (1998): 淡水藻類写真集ガイドブック. 内田老鶴圃新社, 東京.