

貯水池水質観測技術の開発

鮎川 和 泰

1 はじめに

貯水池（ダム湖）のシアノバクテリア（ラン藻類）による水質障害として、Microcystis の異常増殖に代表されるアオコの発生や Dolichospermum（ジェオスミン産生種）および Pseudanabaena（2-MIB 産生種）などによるカビ臭の発生が顕在化して久しい。アオコは、景観障害とともに周辺への独特な臭いによる弊害をもたらす。カビ臭に対しては、特に水道水源として利用される場合、カビ臭物質の除去対策を講じる必要がある。

また、近年の線状降水帯等による河川氾濫を防ぐため「低水位運用（貯水池の常時満水位より数 m 貯水位を下げた運用）」が開始されているが、水位低下により①表水層（水温躍層以浅）の容量減少を来すと共に、②降雨を通じて集水域から供給された栄養塩の滞留時間が長くなり、結果的に③植物プランクトンの増殖を招く、等の貯水池水質への悪影響が危惧されることから、その対処法についても検討する必要がある。

これまで、それらの対策に資する調査研究があまり進展しなかった理由の一つとして、水質のモニタリング手法が確立されていないことが上げられる。ラン藻類及び緑藻類の一部は浮上・沈降（日周変動）を繰り返しながら増殖する特性¹⁾があることから、一定深度のみでの水質モニタリングでは、各プランクトン種による貯水池内の競合関係を明確に評価するには不十分である。

例えば、従来アオコの観測は目視により、湖面の緑色の度合いを指標化して用いられているが、ラン藻類（特にアオコ形成種の Microcystis 属など）は、炭酸同化により糖を生成して沈降し、エネルギーを消費して浮上する。その日周変動による鉛直方向への移動距離は、10 m 程度²⁾³⁾もあると言われている。また、ラン藻類の増殖速度は緑藻類、珪藻類と異なり比較的遅い。

そこで、センサーによる計測を前提条件として、ラン藻類とその他の植物プランクトン種の分布状況を総合的に評価する上で必要な検査項目を選定し、鉛直方向（深度別）に、これらの項目を詳細に自動観測できるシステムを開発した。

2 技術開発の目的

筆者らは、貯水池の水質を鉛直的かつ連続的に把握するため、ソーラーパネルを電源とし、Chl-*a*（クロロフィル *a*：すべての植物プランクトン量の指標）、PCY（フィコシアニン：ラン藻類の指標）、pH（炭酸同化の指標）、DO（溶存酸素：貧酸素化の状況把握）、EC および Turbidity（電気伝導度および濁度：流入水の供給深度の把握）、ORP（酸化還元電位：酸化還元状況の指標）、Water temp.（水温：湖水の成層状況の把握）の各センサーを搭載した多項目水質計を 1 時間ごとに昇降させる水質計自動昇降装置（マイクロプロファイラー）（図 1、図 2）を開発するに至った。

対象とするラン藻類の個体サイズは 2.5~9.5 μm (Microcystis aeruginosa)⁴⁾と微細であることから、ラン藻類の生息環境は、できれば 10 cm 単位で考えることが望ましい。そこで、筆者らはラン藻類の鉛直浮上・沈降を把握することを目的に 0.02 m 深度ごとに計測しデータの蓄積を行っている。

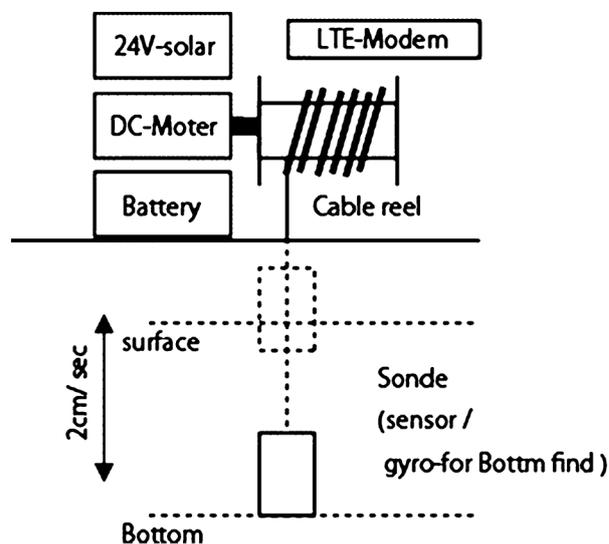


図 1 水質計自動昇降装置の構成



図2 水質計自動昇降装置設置状況

3 クロロフィル a 及び PCY センサーの適用試験

藻類に含まれる Chl-a を直接蛍光により定量できる *in-vivo* 蛍光 (IVF) 法は確立され、既に実用化されている。*In-vivo* 蛍光 (IVF) 法とは、従来の抽出法による Chl-a 計測に対し、植物プランクトンに直接青色光を照射すると細胞内の Chl-a が赤色光を放射する性質を利用して試水中の生きている植物プランクトン (藻類) を検知する現場型の計測法である。一方、PCY センサーは、ラン藻類の有するアンテナ色素 (フィコシアニン) を選択的に計測する技術を利用したものであり、その計測値は野外におけるラン藻類の指標となる⁵⁾。これらの特性について、ラン藻類、緑藻類、珪藻類の培養株を用い比較・確認した。センサー波長はそれぞれ、Chl-a 励起光 460 nm、放射光 685 nm (±20 nm)、及び PCY 励起光 590 nm、放射光 660 nm (±20 nm) である。

図3にラン藻類(1)として *Microcystis aeruginosa*, ラン藻類(2)に *Synechococcus* sp., 緑藻類に *Scenedesmus* sp., 珪藻類に *Aulacoseira granulata* を用い、各培養株を適宜希釈した試験水に対する Chl-a 及び PCY センサーの応答性について確認した結果を示す。ラン藻類の Chl-a と PCY の間には明瞭な直線性があり、かつ PCY に対し高感度に応答することがわかる。Chl-a 濃度 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ 当たりの PCY 指示値と比較すると、珪藻類で 400、緑藻類で 1000 に対し、ラン藻類は 110000 (cells/mL) であった。これらの結果より、PCY センサーがラン藻類に対し選択的に応答することが確認された。

また、この結果が示すように、ラン藻類の PCY と Chl-a の比 (PCY/Chl-a) がラン藻類以外の比よりも圧倒的に高いことから、その比をうまく活用することで、野外におけるラン藻類の出現・衰退にフォーカスした植物プランクトンの遷移の状況把握も可能になるものと推察される。

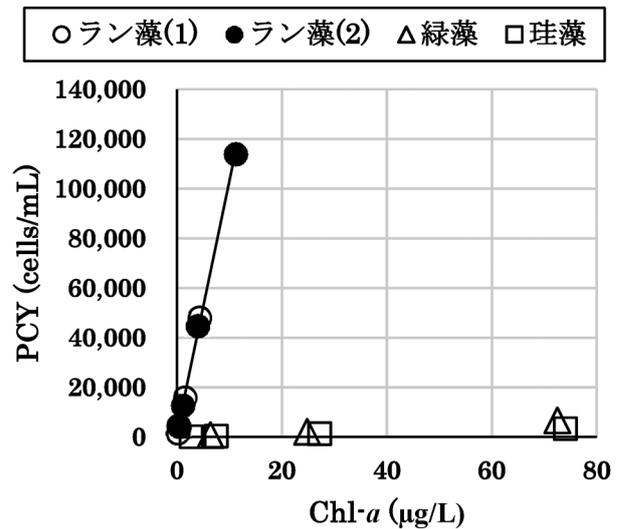


図3 植物プランクトン種別培養株による Chl-a 及び PCY センサーの応答試験

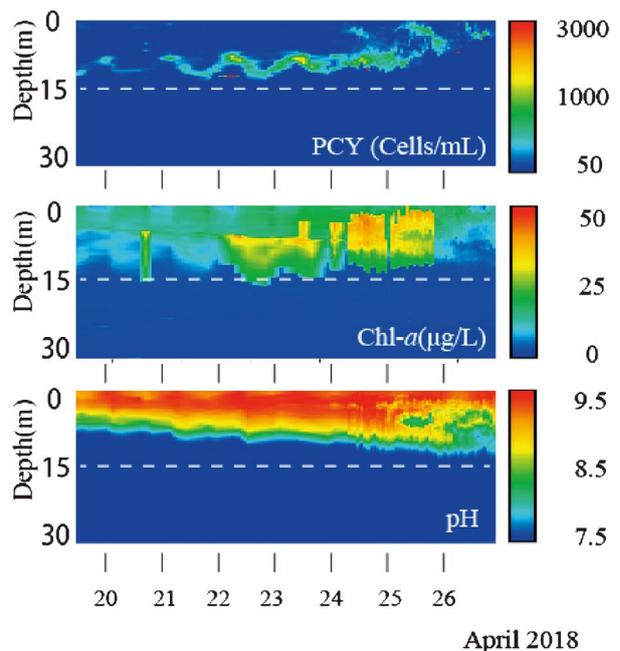


図4 貯水池におけるラン藻類の増殖過程

4 水質計自動昇降装置の現場への適用

図4にラン藻類が増殖し始める4月の貯水池における Chl-a, PCY, pH の時系列変化を示した。この時期には、まだアオコの発生はほとんどないが、PCY 値が示すように、ラン藻類は深度 8~12 m 付近で規則的な日周変動を示し、その濃度も増加していることがわかる。一方、Chl-a 濃度は表層において増加しており、PCY の挙動と異なった。4月22日以降、PCY が増加すると共に Chl-a の最大濃度の深度は沈み込んだのに対し、PCY は表層へとその濃度の極大深度を変えたことがわかる。これらは、植物プランクトンの炭酸同化によりその生息環境の pH をアルカリ化させたことと、

pH のアルカリ化に伴いラン藻以外の植物プランクトンが炭素制限によりその深度を深くしたことを示唆する⁶⁾。

5 水質改善への検討例

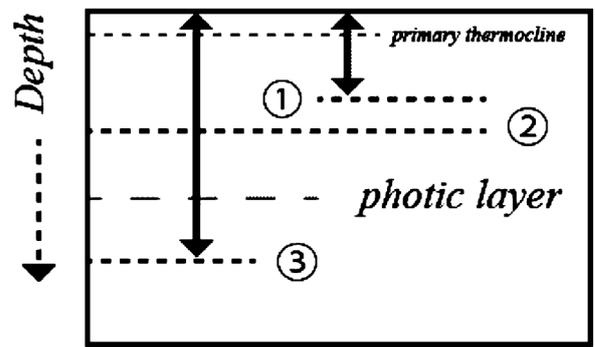
多くの貯水池では、曝気-循環装置（気泡式循環装置）が、夏期のラン藻類の異常増殖対策として導入されている。この主目的は有光層で生産した植物プランクトンを増殖不可能な無光層の深部に沈めることにあるが、その効果は限定的であるとの指摘もある。しかしながら、これまでの運用方法は依然として当初のマニュアル⁷⁾に則ったものであり、水質観測結果を考慮した運用法の改善は行われていない。そのため、気泡式循環装置の運用中にもかかわらず、アオコの広がりや来すことしばしば観察されている。そこで筆者らは、この気泡式循環装置の運用方法を見直すと共に、最適な運用法を導くべく様々な検討を行ってきている。

ここでは、島根県 F ダムにおいて行った調査研究例を紹介する。2019 年は、7 月時点で既にアオコレベル 4 の状況にあったが、8 月 1 日より気泡循環を開始した。なお本検討での気泡吐出深度は、従来の気泡循環⁷⁾（図 5 の③）と異なり、表水層（二次水温躍層以浅）の下部（図 5 の①）を選定した。水温と pH のより低い深水層（水温躍層以深）を選定しなかった理由は、一般に深水層の栄養塩（N, P）濃度が高いことから、その影響を避けるためである。

図 6 に気泡式循環装置の運用前、運転 1 週間後、及び 1 か月後の各水質鉛直データの結果を示す。筆者らが気泡循環の最大の目的とする表層 pH の効率的な低下を図るため、7 月 30 日時点の水温と pH の鉛直分布に基づき、前述の通り水温躍層（10～15 m）以浅で水温と pH が最も低い深度 9 m 層にて吐出した。

図 6 に示すように、気泡式循環装置運用前の水温は、深度 10 m までなだらかに低下しているが、運用開始後 1 週間で水温勾配がなくなり一定の水温となった。それに伴い表層でアルカリ化していた pH は pH7 台で安定化し、PCY の濃度も激減した。一方、Chl-a については一度減少傾向を示すも、1 か月後には開始当初よりも高い濃度を示した。また、1 か月後の検鏡結果より、その植物プランクトン種の主体が珪藻類であったことから、気泡式循環装置の pH 制御を基盤とする運用で、ラン藻類の優占増殖を抑制し各植物プランクトン種が共存できる環境に移行したものと考えられる⁸⁾。

また本結果は、植物プランクトン生産層の pH 制御が表水層の循環で十分であることを示しており、その分、従来法に比べて循環に要するエネルギー量も軽減できることから、運用管理面における電気代の大幅な削減につながることを意味する。



① pH control depth (New method)

② Thermocline(secondary)

③ Traditional control depth

⇕ Mixing zone by aeration

図 5 気泡式循環装置運用深度の選定

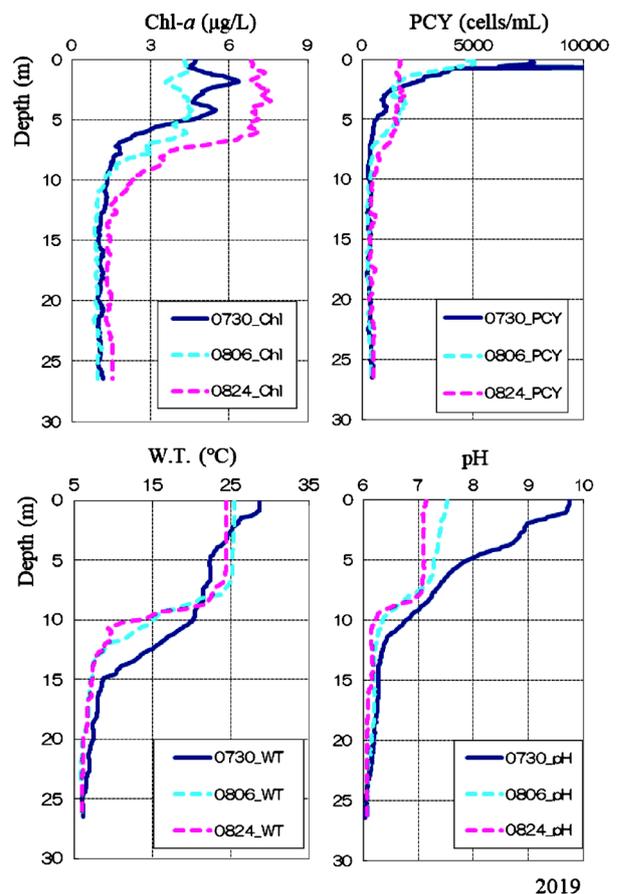


図 6 気泡式循環装置運用後の水質変動

6 まとめ

貯水池の水質モニタリングは 20 年以上前から大きな改善はなく、現在多くの貯水池で実施されている観測データは、多くとも 1 日数回、深度 1 m 間隔の水質

データの蓄積しかない。また計測した生データは吐き出すのみであり、十分に活用されていないのが現状である。しかし、筆者らが本稿で示したように、貯水池に即した観測項目と観測方法を選択することにより、ターゲットとする現象の把握が容易となり、それに伴う対策技術の構築へと発展できることをここに提唱した。

筆者らは、貯水池のラン藻類の異常増殖に対する水質モニタリングでは、水温、溶存酸素、電気伝導度、クロロフィル *a*、フィコシアニン、濁度、pH、酸化還元電位の8項目について、深度方向5 cm 間隔で1日当たり最低6回の鉛直観測を行っている。また、それらの計測結果を可視化し、水質改善対策技術へとつなげるべく検討を重ねている。

7 今後の展望

筆者らは、これまでの結果を整理し、気泡式循環による水質変動をクラスター分類することで、AIを用いた運転支援システムの構築を目指している。貯水池の重要性は、近年の極端な気象変動を考慮すれば、治水のみならず利水面でも重要となるが、筆者らの開発した水質計自動昇降装置は、その貯留水の品質保全にも配慮できる有用なツールとして利用されることが期待される。

謝辞 本稿を執筆するにあたり、清家 泰教授（現島根大学エスチュアリー研究センター客員教授）に助言頂いた。ここに

記し感謝の意を表する。

文 献

- 1) 増木新吾, 若林健一, 高橋 智, 別所 大, 戸島邦哲, 國井秀伸: 水環境学会誌, **35**, 151 (2012).
- 2) A. E. Walsby: *Microbiol. Rev.*, **58**, 94 (1994).
- 3) C. S. Reynolds: "Vegetation processes in the pelagic: A model for ecosystem theory", (1997) (Ecology Institute, Oldendorf/Luhe), (Germany).
- 4) 若林徹哉, 一瀬 諭: "普及版やさしい日本の淡水プランクトン図解ハンドブック", (2008) (合同出版株式会社).
- 5) C. J. Watras, A. L. Baker: *Hydrobiologia*, **169**, 77 (1988).
- 6) 鮎川和泰, 古里栄一, 三上育英, 清家 泰: 貯水池におけるアオコの初期発生挙動, 第83回日本陸水学会(岡山)講演要旨集, 3C-11, (2018).
- 7) 国土交通省河川局河川環境課 (2005) 曝気循環施設及び洗濯取水設備の運用マニュアル(案), (平成17年10月).
- 8) 鮎川和泰, 本橋佑季, 古里栄一, 清家 泰, 中澤 暦, 永淵 修: 貯水池におけるアオコの抑制・気泡循環最適運用の考察(1) 第54回日本水環境学会(岩手)年会講演集, 1-B-09-4, (2020).



鮎川和泰 (Kazuhiro Ayukawa)
環境システム株式会社〒660-0083 兵庫県
尼崎市道意町7-1-3 ARIC512)。島根大
学大学院総合理工学研究科博士後期課程単
位取得退学。理学修士。《現在の研究テ
マ》貯水池における気泡式循環装置運転支
援プログラムの開発。
E-mail: Kaz-a@venus.dti.ne.jp

会社ホームページURL:

www.hydrolab.co.jp