

アオコ発生機構の解明を目的とした藻類組成の
時空間構造の現地観測

鹿児島大学大学院・理工学研究科
小橋 乃子

鹿児島大学学術研究院・理工学域・工学系
安達 貴浩

アオコ発生機構の解明を目的とした藻類組成の時空間構造の現地観測

鹿児島大学大学院・理工学研究科 小橋乃子
鹿児島大学学術研究院・理工学域・工学系 安達貴浩

1. 本研究の目的

自然湖沼やダム湖におけるラン藻類の異常増殖（アオコ）は、水道水の異臭味や毒化の原因となるため世界各地で深刻な問題となっている。さらに、今後の地球温暖化の進行に伴って、アオコをはじめとした有害プランクトン・ブルームがより一層拡大することが指摘されている。

本研究で対象とする鶴田ダム貯水池の大鶴湖でも、度々アオコの大発生が報告されており、対応策として曝気循環装置が導入されているが、毎年必ずアオコが発生するとは限らず、また発生時期も年ごとに異なっている。このため、曝気装置を適切に運用するためにも、アオコの発生リスクを評価できる有効な指標が必要となっている。

以上のような背景の下、本研究では藻類の多様性と競合関係の時空間構造を現地観測によって明らかにし、アオコの発生指標としての適用可能性を検討した。

2. 現地調査の概要

2023年の5月から10月にかけて、計7回、鶴田ダム貯水池のダム堤体近傍（図-1のStn.A）を中心に水質調査を実施した。また、2023年10月10日には湖内7地点で採水を行った。水質については、水温、各種栄養塩、検鏡による植物プランクトン組成、サイズ分画したChl.a(蛍光測定)を測定するとともに（0.2もしくは0.7～5μm, 5～20μm, 20μm）、築地ら（2006）¹⁾の方法を参考に、HPLCを用いて植物プランクトンから抽出した13種の色素（Chlorophyll a (Chl a), Chlorophyll b (Chl b), Chlorophyll c₂ (Chl c₂), Chlorophyll c₃ (Chl c₃), alloxanthin (Allo), 19'-butanoyloxyfucoxanthin (But-fuco), β-carotene (β-Car), diadinoxanthin (Diadino), diatoxanthin (Diato), fucoxanthin (Fuco), 19'-hexanoyloxyfucozanthin (Hex-fuco), peridinin (Perid), zeaxanthin (Zea)：以後、括弧内に示す略記を使用する)を計測した。

3. 解析の概要

3. 1 植物プランクトン組成の推定

分析によって得られた色素 H 行列は、以下のように表記される。

$$H(p, n) = S(p, g) \cdot X(g, n) \quad (1)$$

ここで、 p は色素の種類、 n は観測データ数（解析試料数）、 g は植物プランクトングループの種類であり、 S は g 種の植物プランクトングループに

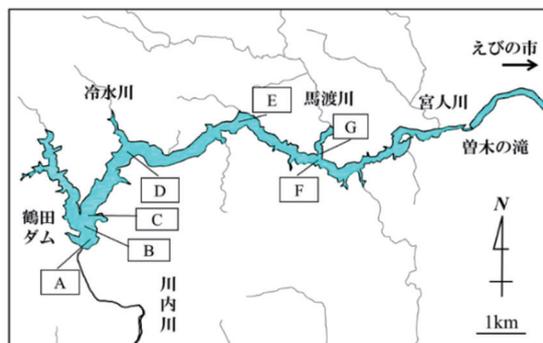


図-1 観測地点の概要

における p 種の色素含有比の行列, X は n 個の観測データにおける植物プランクトングループ g の組成を表す. 既往の知見等から S を設定することで, 解析的に X が得られることになる. このような解析手法について複数の提案がなされているが, 本研究では最も一般的に用いられている手法としてCHEMTAX²⁾を用いた.

3. 2 生物多様性指数の算定

種の多様性と生態系の安定性には正の相関があると言われおり, 多様性のダイナミクスが各水域における有害藻類ブルーム(HABs)の耐性を反映している可能性が指摘されている³⁾. このため, 本研究においても, 以下に示すShannon-Weaverの関数 H' を用いた生物多様度指数について調べた.

$$H' = -\sum P_i \log_e(P_i), \quad P_i = n_i/N \quad (2)$$

ここで, N は総個体数, n_i は i 番目の種の個体数である. また, 全 $Chl.a$ における大型の $Chl.a_L$ の割合 R_L を以下のように定義した.

$$R_L = Chl.a_L / Chl.a \quad (3)$$

ここで, $Chl.a_L$ は, 20 μ mより大きいサイズの $Chl.a$ 濃度, $Chl.a$ は, 0.2もしくは0.7 μ mより大きいサイズの全 $Chl.a$ 濃度である.

4. 結果

4. 1 植物プランクトンの観測結果

観測によって得られた植物プランクトンの検鏡結果を図-2に示す. これを見ると, 2021年9月から2023年5月までは, 検鏡で見られるような大型の藍藻類は発生しておらず, 緑藻と珪藻が優占することが多かったことが分かる.

4. 2 植物プランクトン組成の解析結果

CHEMTAX²⁾を用いて, 観測によって得られた色素データから植物プランクトン組成の解析を行った. Jeffery *et al.* (1997)⁴⁾によると, 珪藻には $Chl.a_1$ を持つ種と $Chl.a_3$ を持つ種が存在する. また, 渦鞭毛藻についても含有する色素の特徴が異なるものがある. このため, まずはこれらの違いを考慮し, 藍藻, 緑藻, ユーグレナ藻, クリプト藻, 珪藻a, 珪藻b, 黄金緑藻, 渦鞭毛藻a, 渦鞭毛藻bの9グループを対象に組成を調べた($p=13, g=9$: Case1). 解析結果は $Chl.a$ ベースで表記されるため, 細胞密度とは直接比較はできないものの, 緑藻が優占していた2021/10/11 (図-2中の緑藻1), 2022/8/24 (緑藻2)では, 緑藻よりも藍藻が多く, 藍藻が明

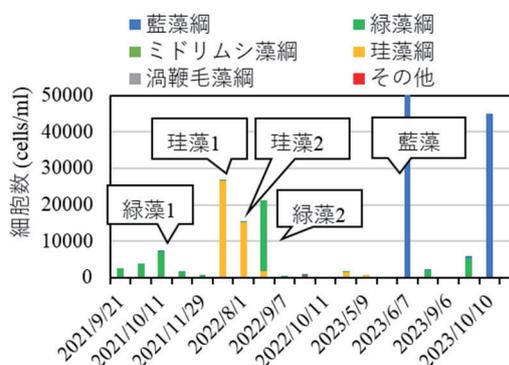


図-2 植物プランクトン組成

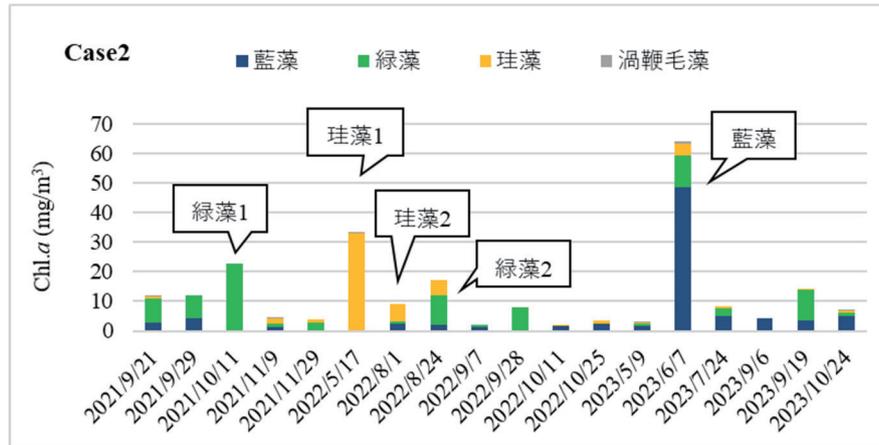


図-3 植物プランクトン組成の解析結果 (Case2)

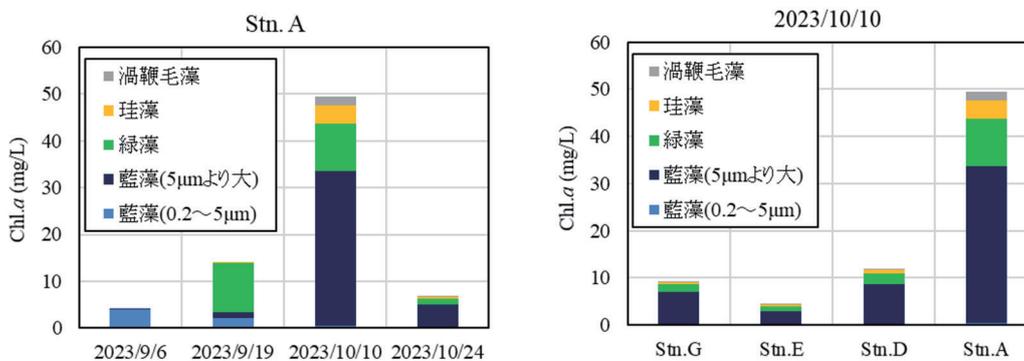


図-4 植物プランクトン組成の解析結果 (左図：Stn.Aの経時変化, 右図：2023/10/10の空間分布)

らかに優占していた2023/6/7 (藍藻)では、3分の1程度がクリプト藻と黄金緑藻として推定される等、良好な結果は得られなかった (図示省略) . そこで、次に、検出する植物プランクトングループを藍藻、緑藻、珪藻、渦鞭毛藻に限定し($g=4$), 対象とする色素についても小松・千賀(2009)⁵⁾とWright(2017)を参考に、Chl a, Chl b, Diadino, Fuco, Perid, Zeaの $p=6$ に減少させたCase2の解析を行った (図-3) . この結果、藍藻が優占していた2023/6/7 (藍藻)では緑藻や珪藻がやや過大評価されているように見えるものの、2021/10/11 (緑藻1)や2022/8/24 (緑藻2)でも、明確な緑藻の優占が見られることから、概ね妥当な結果が得られたものと判断した.

以上のように、概ね良好な解析結果が確認できたことから、得られた結果を基に、Stn.Aにおける植物プランクトン組成の経時変化と2023/10/10における空間構造を調べた (図-4) . Stn.Aの経時変化を見ると、2023/9/6時点ではほとんどが $5\mu\text{m}$ 以下の小型の藍藻だったものが (検鏡では藍藻類は検出されず)、次第に大型化し、10/10にピークを取った後、減少している様子が見て取れる. また、ピーク後は大型の藍藻が多く、群体化した藍藻類(*Microcystis aeruginosa*)が残存していたものと考えられる. この時、緑藻類も同時に増殖しており、藍藻類が飛躍的に増殖しアオコ

化した9/19から10/10の期間においても、ある程度の緑藻や珪藻と共存していたことが分かる。一方、2023/10/10の植物プランクトンの空間構造を見ると、堤体近傍のStn.Aで最もChl.a濃度が高くなるものの、湖内全域で大型の藍藻類が発生している状況や緑藻や珪藻と共存している様子も空間的に大きく変化していないことが分かった。

4. 3 生物多様性指数の解析結果

図-5に生物多様度指数 H' と大型 $Chl.a_L$ の割合 R_L 、藍藻類、珪藻類の細胞密度の時系列を示す。基本的には、藍藻の増殖時に H' は低下、 R_L は増加している様子が見て取れる（つまり、藍藻増殖時には生物多様性は下がり、細胞は大型化する）。ただし、2015年4月や2022年4月ように、 H' が低下し、 R_L が増加した時に必ず藍藻が増殖するとは限らず、珪藻が増殖している場合もあることが分かる。中国の太湖で調べられた生物多様性指数では、アオコが独占的に増殖している状況では0.13（式(2)の値に換算すると0.09）と、非常に低い値を取ることが報告されている⁶⁾。このため、アオコ発生の指標として、 H' や R_L を適用できるかどうか検討するために、大鶴湖のStn.A表層における藍藻類の細胞数と H' および R_L の関係を調べた（図示省略）。この結果、藍藻細胞数が多くなると、 H' は低くなり、 R_L は高くなる（生物多様性は下がり、細胞サイズは大きくなる）という図-5と一致した傾向が確認され、その閾値は H' および R_L のいずれについても、概ね0.5程度であることが分かった。このため、全ての観測データを対象に(全データ数71)、(1)「 $H' < 0.5$ の時に藍藻類が存在する割合」、および(2)「藍藻類が存在する時に、 $H' < 0.5$ となる割合」を調べると、それぞれ52.4%、42.3%となった。なお、ここでの「藍藻類が存在する」とは、藍藻類が低密度で存在している時（アオコ化する前の状況）も含めている。このため、生物多様性を下げる要因は藍藻以外の植物プランクトンの発生状況にも影響されていること（図-5）、例えば藍藻が優占している場合でも珪藻や緑藻と競合している場合があることから（図-4）、このような値となったものと考えられる。一方、(3)「 $R_L > 0.5$ の時に藍藻類が存在する割合」、および(4)「藍藻類が存在する時に、 $R_L > 0.5$ となる割合」を調べると、62.1%と69.2%となり、 H' よりも高い値となった。このような相違が生じた理由として、2017年5月のように、小型の珪藻が優占する場合にも H' が低下することが考えられる。また、 H' は検鏡により植物プランクトンを同定する作業が必

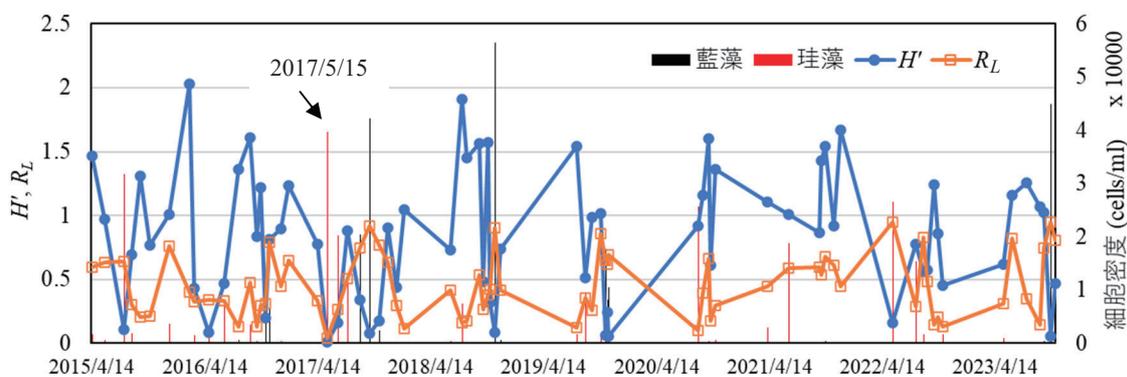


図-5 生物多様性指数 H' と R_L 、藍藻・珪藻の細胞密度 (Stn.A, 表層)

要なものに対し、 R_L の測定はサイズ分画したChl.a濃度の測定によって得られるため、データの取得し易さには大きさ相違がある。以上のことから、藍藻類（アオコ）発生の指標としては、 H' よりも R_L の方が適しているものと考えられる。

5. 結 論

本研究により、HPLCを用いた色素分析によって、大鶴湖で最も頻繁に出現する藍藻、緑藻、珪藻、渦鞭毛藻を検鏡調査と同程度に識別することが可能となった。これにより、アオコの出現および消失時のデータをより詳細に取得できるものと考えられる。また、生物多様性指数 H' および本研究で新たに導入した大型植物プランクトンの割合 R_L と、藍藻類の発生状況を比較した結果、アオコが発生すると、 H' が低くなり、 R_L が高くなることが確認された。また、推定精度はあまり高くないものの、アオコ発生の指標として、 $R_L > 0.5$ が一つの目安となることが示唆された。

ところで、申請者らはセンサー計測によって、藍藻類の存在および小型のChl.a濃度を推定する手法を提案している⁷⁾。同手法を用いれば、センサー計測によって R_L の推定も可能であることから、藍藻類の推定と組み合わせることによって、より信頼性の高いアオコ推定指標を提案できるものと考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成をいただいた一般社団法人九州地方計画協会に深甚なる謝意を表します。また、本研究の現地調査を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局・鶴田ダム管理所の皆様にも多大なるご協力をいただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 築地ら(2006), *海洋理工学会誌*, 12, 27-35
- 2) Mackey, M. D. *et al.*(1996), *Marine Ecology Progress Series* 144, 265-283,
- 3) Roelke and Buyukates (2002), *Limnol. Oceanogr.*,47 (4), 1109-1118,
- 4) Jeffrey *et al.* (1997), *Phytoplankton pigments in oceanography*,
- 5) 小松・千賀 (2009), *海洋理工学会誌*, 15, 181-188,
- 6) 萩ら(2013), *土木学会論文集G(環境)*, Vol.69, No.3, 97-104,
- 7) 小橋・安達 (2019), *土木学会論文集B2(海岸工学)*, 75巻2号, I_1255-I_1260.