

(10) ダム貯水池におけるアオコ発生に及ぼす *Anabaena* spp.の休眠細胞の影響

土田 幹隆^{1*}・野村 宗弘¹・増田 周平²・千葉 信男¹・
藤本 尚志³・中野 和典¹・西村 修¹

¹東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²前)東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

³東京農業大学大学院農学研究科 (〒115-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1)

* E-mail:tsuchida@eco.civil.tohoku.ac.jp

漆沢ダム湖におけるアオコの発生機構について、ダム湖底の休眠細胞に着目して現地調査を行った。その結果、休眠細胞は河川流入口付近にはほとんど存在しなかったが、ダムサイトに向かって徐々に増加し、ダムサイト付近では 2.9×10^4 cells cm^{-3} の休眠細胞が存在することがわかった。また、その発芽は、洪水期に備えてダム貯水位を低下させることにより、湖底が発芽に適した環境になることで引き起こされることが明らかとなった。なお、この発芽の時期は、ダム表層で*Anabaena* spp.の発生が観測され始める時期と概ね一致した。

Key Words : *Anabaena* spp. , *akinetes*, *germination*, *photon flux density*, *water temperature*

1. はじめに

閉鎖性水域における富栄養化は、アオコの発生といった藻類の異常増殖を引き起こす。特に霞ヶ浦、手賀沼、印旛沼、諏訪湖などに代表される湖沼では、主として藍藻類からなるアオコが発生し、水道水のかび臭や凝集・ろ過阻害といった利水上の問題、水産への被害、異臭問題、美観の低下を招き、深刻な問題となっている¹⁾。そのため、1982年に湖沼に係る全窒素および全リンの環境基準が設定されるなど、富栄養化した湖沼に対してその水質の改善対策がなされてきた。しかし、宮城県漆沢ダム湖では、人為的流入負荷のない中栄養湖であるにもかかわらず、藍藻類*Anabaena* spp.を主とするアオコの発生が毎年見られる²⁾。

藍藻類*Anabaena* spp.は増殖に不適な環境になると休眠細胞を形成・分離し、環境条件が整うと再び発芽し増殖を始める生態的特徴を持つ。すなわち藍藻類*Anabaena* spp.によるアオコ形成には、休眠細胞からの発芽と、その後の増殖という2段階のプロセスが考えられ、増殖に関しては多くの研究がなされている。一方、休眠細胞に関する研究事例は少なく、辻村らによる研究結果^{3,4)}のほ

か、海外における現地調査事例も少ない^{6,7)}。また湖内の環境因子から休眠細胞について評価した事例はほとんどないが、休眠細胞の発芽はアオコ発生の起点となっていることから、藍藻類の優占化等アオコ発生時期の評価、藻類の変遷を予測するうえで重要な情報と考えられる。

そこで本研究では、湖底の休眠細胞に着目し、採取した底泥を用いた発芽実験から湖底における休眠細胞の空間的分布を評価した。また、現地観測により得られた環境因子データを整理し、既往の発芽特性の結果と比較検討することで、漆沢ダムにおける藍藻類の発生について時期的、空間的な考察を行った。

2. 現地調査の概要

(1) 調査地点

本研究で調査対象としたダムは、宮城県北西に位置する漆沢ダム(北緯38°34'14", 東経140°38'29", 標高240 m)である。漆沢ダム湖は、流域面積58.9 km^2 、有効貯水量16,000千 m^3 、水表面積0.83 km^2 、幅約500 m、全長約4,000 m、平均水深約22 mのロックフィルダムで、鳴瀬川水域の総合開発を目的とした多目的ダムである。周囲を

山林に囲まれているため人為的流入負荷は存在せず、負荷の流入は鳴瀬川、唐府沢の2河川からのみであるが、夏季には藍藻類 *Anabaena* spp. を主としたアオコの発生がみられる。

(2) 調査方法

現地調査は藻類活性の高まる時期を考慮し、2008年6月10日から10月28日まで、約2週間毎に定期調査を行い、さらに連続調査を実施した。漆沢ダム湖の形状および観測定点を図-1に示す。観測定点は、河川流入口付近のStn.0からダムサイトに向かってStn.1, Stn.2, Stn.3, Stn.4の5地点とした。

定期観測として、各観測定点において多項目水質計(AAQ1183; Alec電子)を垂下させ、水深方向に0.2m間隔でChl_a、水温を測定するとともに、バンドーン採水器を用いて所定の水深の採水を行った。さらに7月24日以降は光子計(MDS-MkVL; Alec電子)を用いて、各深度の水中光子束密度を測定した。なお、7月9日以前の湖底における光子量は以下の手順で補完した。まず、光子量の鉛直変化から、消散係数を7月24日以降の観測日毎に整理し、Rileyの式⁹⁾の形を基本として表層のChl_a濃度に対する消散係数の近似式を求めた。この式と空中光子データから湖底面の光子束密度を推定した。

連続観測として、メモリー式水温計(UJ2-001; Onset社)をStn.4の表層(S-0.5m)に係留し、水温を連続的に測定した。さらに、ダム事務所の屋上に風向・風速計(W214-Z1; 小松製作所)および光子計(MDS-MkVL; Alec電子)を設置し測定を行った。

ダム湖における貯水量、流入量および放流量のデータは宮城県大崎地方ダム総合事務所漆沢ダム管理事務所から入手した。また、藻類種の個体数データは、宮城県大崎広域水道事務所が、4月15日から11月11日まで約2週間毎に表層水をプランクトンネットを用いて測定したものを使用した。

なお、2004年から2007年までの水質、藻類種データは、前述と同様に測定、分析され、宮城県土木部「漆沢ダム・宮床ダム水質改善基礎調査」報告書に記載されたものから引用した。

(3) 分析方法

採取した試料水は、0.45 μmメンブレンフィルターにてろ過し、N,N-ジメチルホルムアミドにて抽出後、Lorenzenの吸光光度法を用いてChl_aを求め、定期観測における多項目水質計から得たChl_a値を校正した。

(4) *Anabaena* 休眠細胞の現存量調査

漆沢ダムの湖底における休眠細胞数の空間分布を把握

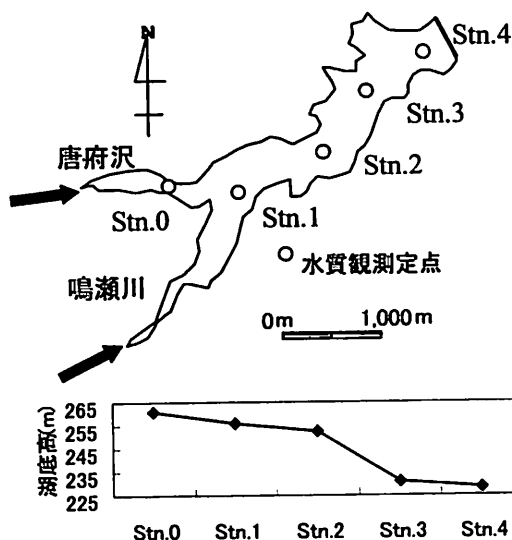


図-1 漆沢ダム湖の形状と観測定点

するため、発芽実験を用いた休眠細胞数の計測を行った。調査地点は定期観測と同じくStn.0~4の5地点とし、2008年9月5日に底泥の採取を行った。各地点において船上からエクマン・バージ採泥器を下ろして採泥し、葉さじでビニールバックに移して実験室に持ち帰り、冷蔵庫に保存した。

発芽実験は最確法(MPN法)を用いて行った。以下に手順を記す。試泥2 g-wetをCT培地100 mlで希釈したものを原液とし、それを3段階に希釈(1/10, 1/100, 1/1,000)したものを藻類培養用の試験管に入れた。これを温度20 °C, 5,000 lx, 明暗周期12L-12Dの条件下で培養した。培養開始後は、ほぼ1日毎に目視での観察、1週間毎に光学顕微鏡を用いて観察し、培養開始日から20日後までに栄養細胞のみられた試験管を陽性とした。最確数は最確数表から求め、これを各地点における発芽可能な休眠細胞数とした。さらに既往の研究において、培養条件を変えて実験した結果、発芽率が最適条件で約70 %であったこと⁹⁾を踏まえ、本研究では得られた最確数を0.7で除したものを休眠細胞の存在量とした。

3. 結果及び考察

(1) 藻類種の変遷

表層における藻類数(cellsまたはfilaments mL⁻¹)、水温、貯水位、降水量の時系列変化を図-2に示す。藻類種の変遷に着目すると、まず4月中旬から6月中旬にかけて珪藻類の優占がみられた。その後7月下旬にかけて珪藻類、緑藻類の数は減少した。

7月8日には *Anabaena* spp. を主とする藍藻類が出現し始

め、7月24日には優占化した。このように珪藻類の表層からの消失から藍藻類の優占に至るまでの期間に、表層から優占種といえる藻類がいなくなる現象は例年続いているものであり²⁾、2008年も同様の傾向を示した。

8月7日には、過去5年間で最大値となる、*Anabaena* spp. を主とする9,230 filaments mL⁻¹の藍藻類が観測され、アオコの状態となった。また、8月5日の表層のChl*a*は5863 μg L⁻¹であった。*Anabaena* spp.優占の状態は8月20日の定期観測日まで継続し、8月下旬の降雨の後にアオコは消失した。

9月9日の時点では再び珪藻類が優占しており、以後、初冬まで珪藻類が優占種として存在した。

(2) *Anabaena* 休眠細胞の現存量

発芽実験の結果から得られたダム湖内各地点の休眠細胞の現存量を表-1に示す。河川流入口付近のStn.0には休眠細胞はほとんど存在していないことがわかったが、Stn.1では1 cm³あたり12.1 cells、ダムサイトに向けておよそ1オーダーずつその数を増やし、最もダムサイト寄りのStn.4においては、 2.9×10^4 cells cm⁻³の休眠細胞が存在することが明らかとなった。琵琶湖における調査では、数十～数百 cells cm⁻³というオーダーであり⁹⁾、アオコの発生が著しい湖沼においても10⁴ cells cm⁻³ほどの値であった³⁾という報告から、本調査における休眠細胞数は他の水域と同レベルであるとともに、同じ水域でも地点により差があることがわかった。

図-3に、北風を0度とした風向のデータを示した。現地では山側からダムサイト側へ吹き降ろす南西の風が卓越しており、水中で増殖したアナベナの栄養細胞は、この風によりダムサイト側へ運ばれ、ダムサイト近傍の表層にアオコが集積する様子が多く見られた。その過程において休眠細胞を形成、分離し沈降することで、湖底における休眠細胞の空間分布が形成されるものと考えられた。

(3) *Anabaena* 休眠細胞の発芽の可能性

時期的、空間的な休眠細胞の発芽の可能性を評価するため、発芽実験から得られた休眠細胞の空間分布と現地調査における調査日毎の湖底の水温および光量子の変化について整理した。

Stn.0は休眠細胞がほとんど存在しないという結果から、この地点での発芽の可能性は少ないと考えられた。これはStn.0が河川流入口付近に位置するため、季節的な貯水位の変動により干出することで天日干しの効果⁹⁾を受けていることや河川水に常時底泥が流されることにより休眠細胞も流されてしまっていると考えられた。定期観測においても6月24日、7月24日、8月20日、9月24日、10月

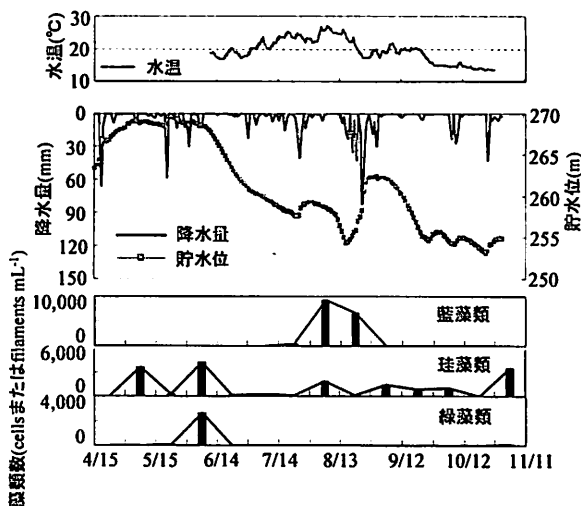


図-2 2008 年の水温、降水量、貯水量、藻類数の時系列変化

表-1 底泥 1cm³中に含まれる休眠細胞数

station	最確数(akinetes cm ⁻³)
stn.0	<3.2
stn.1	12.1
stn.2	4.0×10^2
stn.3	2.9×10^3
stn.4	2.9×10^4

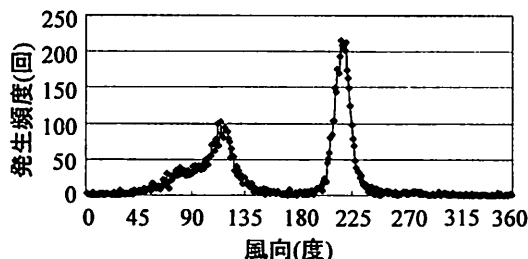


図-3 2008 年の風向きの発生頻度

16日は干出もしくは小型船で進めないほどの浅さになっていた。また、採取した試泥もほぼ砂質状で、細粒分はほとんどみられなかった。

各地点の湖底における光量子、水温および水深の経時変化を図-4に示す。光環境に関しては、既往の研究結果^{9,12)}をまとめると9～100 μmol m⁻² s⁻¹程度が発芽に最適であると考えられ、Stn.1のみ6月下旬から7月上旬の期間にかけて発芽の条件を満たしていることがわかる。水温に関しては、既往研究の結果^{9,12)}から12～24 °Cの範囲を最適とすると、Stn.1、Stn.2は7月24日にはこの範囲まで上昇していた。これは洪水期に備えるため、6月中旬から7月下旬にかけて10 m以上貯水位を下げていることに起因す

と考えられる。つまり貯水位を下げること、光環境において休眠細胞に有利な環境を作り出すことになる。光量子量と水深の関係はランベルト・ベールの法則に従うため、貯水位を下げるほど湖底に到達する光量子量は指数関数的に増大する¹⁾。さらに、貯水位を下げることは湖底の水温の上昇につながる。これは日射による水温の上昇が起こりやすくなることに加えて、湖底が水温躍層に接触し温度が急上昇することからの寄与が大きい。以上より、洪水期に備えて徐々に貯水位を低下させていることが休眠細胞の発芽に有利な環境を形成することになり、かつ貯水位をより低下させるほど、アオコ形成に至るまでの初期段階である休眠細胞発芽率の上昇を引き起こすことが示唆された。

Stn3およびStn4に関しては、観測期間を通じて湖底環境が発芽に最適になることはなく、通常のダム運用でこの深度付近の休眠細胞の発芽が起こる可能性は少ないと考えられる。しかし、Stn3、4付近の休眠細胞の数は膨大であり、かつ底質の性状は上流から運ばれて堆積した微細粒土砂である。角ら¹⁰⁾によれば、粘度・シルト主体の微細粒土砂は多少の流速で巻き上がるとされており、大きな出水が起こった場合、アオコ発生に繋がる危険性を有しているといえる。

(4) ダム貯水位とアオコ発生の関係

図-5に2004年から2008年の、6月中旬から7月中旬の平均貯水位と、各年の7月下旬から8月上旬にかけて観測される最大藍藻群数を示した。これより、貯水位を大きく下げた年に、藍藻類の発生数が大きくなる傾向が得られた。この理由として、貯水位を下げることで*Anabaena* spp.の休眠細胞の発芽に有利な環境が形成され、休眠細胞の発芽率が高まり、水中での初期細胞濃度が大きくなることによって、*Anabaena* spp.の優占化がより確実となることが考えられた。また、貯水位を下げた場合、通常湖底にあるはずの微細粒土砂が露出することにより、多少の降雨、流入によっても、栄養塩を多く含んだ微細粒土砂が湖内に回帰するとされており¹⁾、さらに出水や風波による巻き上げや移流、拡散等の物質移動による底泥中の懸濁態リンの回帰も起こりやすくなると考えられる¹⁰⁾。橋ら¹⁰⁾によれば、藍藻類は懸濁態リンを利用することができるため、貯水位低下によって懸濁態リンの流入が増すことで、発芽した糸状体の増殖を促進させることが考えられる。

4. まとめ

本研究では、漆沢ダム湖における現地調査から、休眠細胞の発芽および*Anabaena* spp.の増殖の機構についての

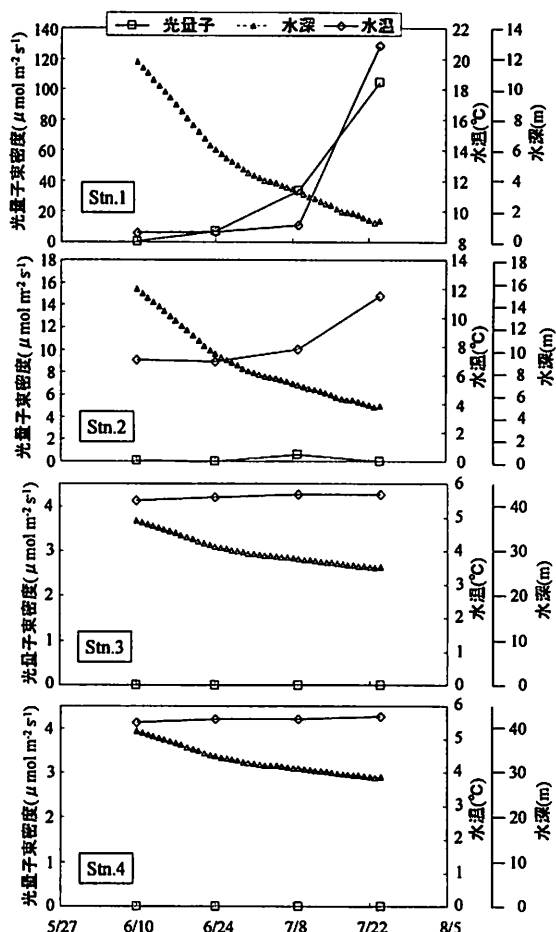


図-4 各地点の湖底における光量子、水温および水深の経時変化

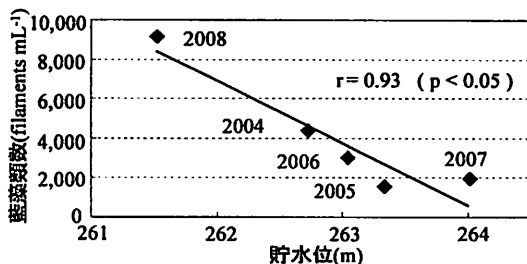


図-5 6月中旬から7月中旬の平均貯水位に対する最大藍藻群数

検討を行った。以下に本研究から得られた知見を示す。

- ・河川流入口付近において休眠細胞はほとんど存在しなかったが、ダムサイトに向かって徐々に数を増やし、ダムサイト付近では 10^4 cells cm^{-3} のオーダーの休眠細胞が存在していることがわかった。
- ・貯水位を下げ始める6月下旬から7月中旬の期間に、湖底における光、水温が休眠細胞の発芽に適した環境となることがわかった。また、現地観測ではこの後に*Anabaena* spp.の栄養細胞が確認された。さらに、貯水位

が下がるほど、休眠細胞が豊富な場所が発芽に適した環境に変わっていき、藻類増殖が助長される可能性が示唆された。

謝辞：現地調査を実施するにあたり、宮城県大崎地方ダム総合事務所漆沢ダム管理事務所ならびに大崎広域水道事務所麓山浄水場の方々にご協力を頂きました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 須藤隆一 編著：水環境保全のための生物学, pp. 239-254, 産業用水調査会, 2004.
- 2) 増田周平, 野村宗弘, 坪根史佳, 千葉信男, 藤本尚志, 中野和典, 西村 修：漆沢ダム湖におけるアオコ発生メカニズムに関する検討, 環境工学研究論文集, Vol. 45, pp. 103-112, 2008.
- 3) Shigeo Tsujimura, Takuya Okubo: Development of *Anabaena* blooms in a small reservoir with dense sediment akinete population, with special reference to temperature and irradiance, Journal of Plankton Research, Vol. 25, No. 9, pp. 1059-1067, 2003.
- 4) 辻村茂男：「アオコ発生における底泥中の休眠細胞の役割解明とその除去方法の検討」報告書, 2003.
- 5) Shigeo Tsujimura: Reduction of germination frequency in *Anabaena* akinetes by sediment drying: a possible method by which to inhibit bloom formation, Water Research 38, pp. 4361-4366, 2004.
- 6) Peter D. Baker: Role of akinetes in the development of cyanobacterial populations in the Murray River, Australia, Mar. Freshwater Res, 50, pp. 265-279, 1999.
- 7) R. M. Head, R. I. Jones, A. E. Bailey-Watts: Akinetes germination and recruitment of planktonic cyanobacteria from lake sediments, Verh. Int. Ver. Limnol, 26, pp. 1711-1715, 1998.
- 8) J・N・クレマー, S・W・ニクソン (中田喜三郎訳)：沿岸生態系の解析, pp. 53-54, 生物研究社, 1987.
- 9) W. Braune: C-Phycocyanin – the Main Photoreceptor in the Light Dependent Germination Process of *Anabaena* Akinetes, Arch. Microbiol. 122, pp. 289-295, 1979.
- 10) Ann L. Huber: Factors Affecting the Germination of Akinetes of *Nodularia spumigena* (Cyanobacteriaceae), Applied And Microbiology, pp. 73-78, Jan. 1985.
- 11) B. H. Kim, W. S. Lee, Y. -O. Kim, H. -O. Lee and M. -S. Han: Relationship between akinete germination and vegetative population of *Anabaena flos-aquae* (Nostcales, Cyanobacteria) in Seokchon reservoir (Seoul, Korea), Arch. Hydrobiol, 163 1, pp. 49-64, 2005.
- 12) Wendy van Dok, Barry T. Hart: Akinete Germination in *Anabaena Circinalis* (Cyanophyta), J. Phycol. 33, pp. 12-17, 1997.
- 13) アレキサンダー・J・ホーン, チャールズ・R・ゴールドマン (手塚泰彦訳)：陸水学, pp. 43-44, 京都大学学術出版会, 1999.
- 14) 角 哲也, 井口真生子, 藤井智康：貯水池下流部に堆積した微細粒土砂の巻上げに関する実験的研究, 水工学論文集, 50, pp. 925-930, 2006.
- 15) 藤井智康, 見市智美：奈良県大迫ダム貯水池の水質特性および下流河川に及ぼす影響, 自然環境教育センター紀要, No. 8, pp. 9-20, 2007.
- 16) 佐藤敦久：水環境工学 浮遊物質からみた環境保全, pp. 22-228, 技報堂出版, 1987.
- 17) 橘 治国, 吉田邦伸, 井上隆信：都市近郊湖沼 (茨戸湖) における栄養塩の形態と藻類増殖, 水環境学会誌, Vol. 19 No. 2, pp. 132-139, 1996.

(2009.5.22 受付)

Influence of *Anabaena* Akinete on Algal-Bloom in Dam Reservoir

Mikitaka TSUCHIDA¹, Munehiro NOMURA¹, Shuhei MASUDA², Nobuo CHIBA¹
Naoshi FUJIMOTO³, Kazunori NAKANO¹ and Osamu NISHIMURA¹

¹ Graduate School of Civil Engineering, Tohoku University

² Pre-Graduate School of Civil Engineering, Tohoku University

³ Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture

To reveal the mechanisms of algal bloom in Urushizawa dam reservoir, field investigation about *Anabaena* akinete and environmental factors in the lake was conducted. As a result, although no akinete was found around the river mouth, the nearer the dam, the more number of akinetes existed. Finally, 10⁴ digits of *Anabaena* akinetes per 1cm³ sediment existed on the lake bottom. And it was revealed that the optimum environment for akinete germination was formed by lowering the reservoir level for preparing the flood season. Furthermore, this period is almost same time when the trichome began to be found in the surface water.