

ダム貯水池における生物現象と現象発生に伴う課題

島根大学教育学部 大谷修司

はじめに

宍道湖や島根県のダム貯水池ではアオコやカビ臭が問題となり，種組成の継続的な調査や，その原因解明や対策がなされている。本発表では，島根県大田市の山間部に位置する三瓶ダムにおいて，2004年～2017年までアオコやカビ臭が発生する時期を中心に植物プランクトンの種組成を調べたので，優占種やアオコやカビ臭原因種について報告する。また，2017年6月と9月に三瓶ダムから藍藻類のカビ臭生産種の分離・培養を試みたのでその結果もあわせて報告する。

1. アオコ形成種の特徴と発生時期

アオコとは，湖沼で藻類が大発生する現象のひとつで，特に水面に集積し，水の色が濃い緑色を呈する場合をいう（渡辺他編，1994）。三瓶ダムでは藍藻類，渦鞭毛藻類，黄金藻類，珪藻類，緑虫類，緑藻類が出現するがアオコ形成時期は藍藻類が優占する。アオコが発生しない時期は珪藻や緑藻の種が増加する傾向にある。アオコを形成する藍藻類は原核生物であり，光合成色素としてクロロフィル a の他，フィコシアニンを有するため細胞は青緑色の種が多い。しかし，大発生したアオコは緑色を呈す。

藍藻 *Microcystis* 属の種は7月から9月に優占種となることが多い。本属の種は球形の細胞が多数あつまり，コロニーを形成する。細胞にはアエロトープがあり，これが浮き袋の役割をするため水面に浮遊しやすい。種の分類形質は，細胞の大きさ，色，細胞の密度，コロニーの形，コロニー周囲の粘質の厚さなどであり，三瓶ダムからは *M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. novacekii*, *M. wesenbergii*, *M. sp.1*（未同定種）の5種が出現した。

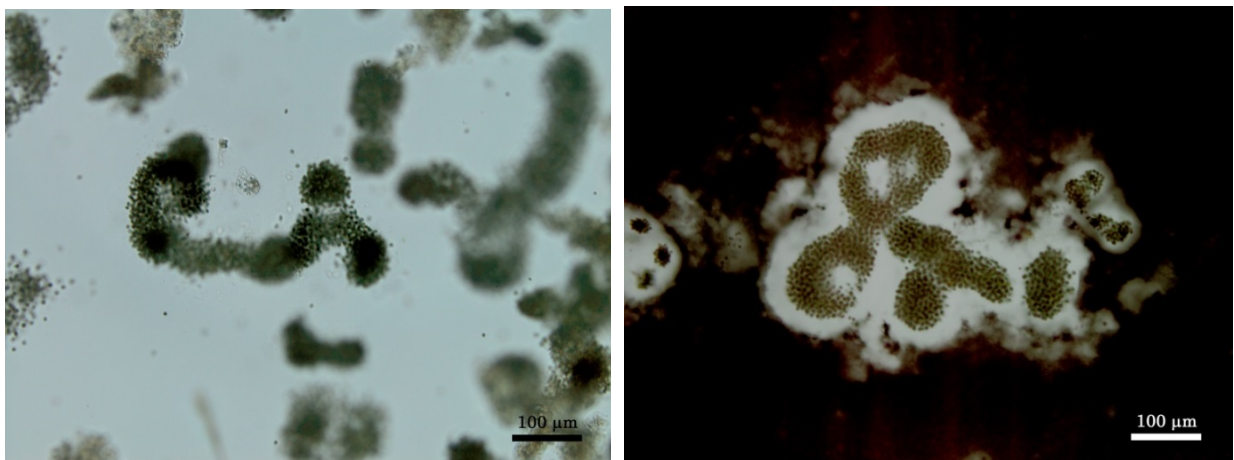


図1.アオコ形成種 *Microcystis aeruginosa*。左：細胞が密に集まったひも状コロニー。右：墨汁でコロニー周囲の厚い粘質が明瞭となった写真。三瓶ダム，2014年7月15日。

M. aeruginosa はコロニーの形が最初は球形で、発達するにつれ垂鈴形、虫眼鏡状、ひも状、分枝するひも状、不定形へと変化する。細胞の径は 5-6 μm 、顕微鏡で観察すると細胞は暗緑色で細胞は密に集合する。墨汁を加えるとコロニー周囲に厚い粘質が認められる。

藍藻 *Dolichospermum* 属は真夏を除く 6 月や 10 月にアオコを形成した。本属の種は球形から楕円体の細胞が連なった糸状体で、細胞にアエロトープを有し浮遊する。糸状体には窒素固定を行う異質細胞を有し、休眠細胞であるアキネートを形成する。本属には糸状体の形態が類似し、アキネートの形態のみが明瞭に異なり、アキネートが形成されていない場合種の同定が困難な場合がある。

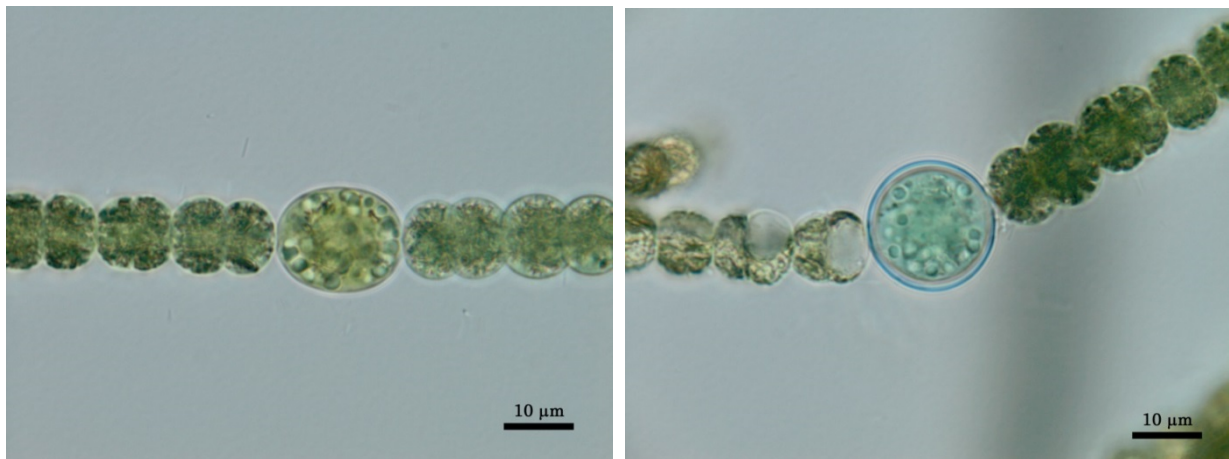


図 2. アオコ形成種 *Dolichospermum* 属の類似した 2 種。左：アキネートが楕円体の *D. planctonicum*。右：アキネートが球形の *D. smithii*。三瓶ダム，2014 年 10 月 10 日。

三瓶ダムではアオコの原因種は単一種が優占するがほとんどの場合複数の種からなり、年や季節によって優占種が異なっていた。下記に示すように 2012 年の 7 月、8 月や 2014 年の 6 月、7 月のように一月の間に優占種が交代したり、2004、2005 年に優占した種が最近では優占しなくなったりしている。

発生年月日	優占種
2004 年 9 月	<i>Microcystis novacekii</i>
2005 年 8 月	<i>Microcystis novacekii</i>
2012 年 7 月	<i>Microcystis ichthyoblabe</i>
2012 年 8 月	<i>Aphanizomenon</i> sp.
2013 年 8 月	<i>Microcystis ichthyoblabe</i>
2014 年 6 月	<i>Dolichospermum crassum</i> , <i>Dolichospermum planctonicum</i>
2014 年 7 月	<i>Microcystis aeruginosa</i>
2014 年 10 月	<i>Dolichospermum planctonicum</i> , <i>Dolichospermum smithii</i>
2015 年 7 月	<i>Microcystis</i> sp. 1

2. カビ臭形成種の特徴と発生時期

1) ジェオスミン

三瓶ダムに出現し、Watson 他(2016)のカビ臭等の総説に報告されている種としては、ジェオスミンを生産する *Dolichospermum crassum*, *D. planctonicum* の2種だけである。Watson 他(2016)は *Aphanizomenon* 属と *Pseudanabaena* 属の種がジェオスミンを生産種として報告している。両属の種は三瓶ダムに出現しており、ジェオスミン臭が発生した場合原因種として検討を要する。

・2017年6月の事例

三瓶ダムでジェオスミンが検出されると連絡あり、島根大学の調査チーム(島根県受託研究:島根大学清家先生代表)が6月22日に現地の調査を行い表層水の採集を行った。試料の中にはジェオスミン生産種として報告されている *Dolichospermum crassum* が優占していたため、本種1株をピペット洗浄法により分離培養した。カビ臭原因種として予想をたて培養に成功したものの、鼻ではこの培養株は無臭であった。今後、詳しく分析を進めていく。この試料には単列糸状体の *Cuspidothrix* 属と考えられる種が普通に出現しており、来年度は *Cuspidothrix* の培養にも取り組む予定である。

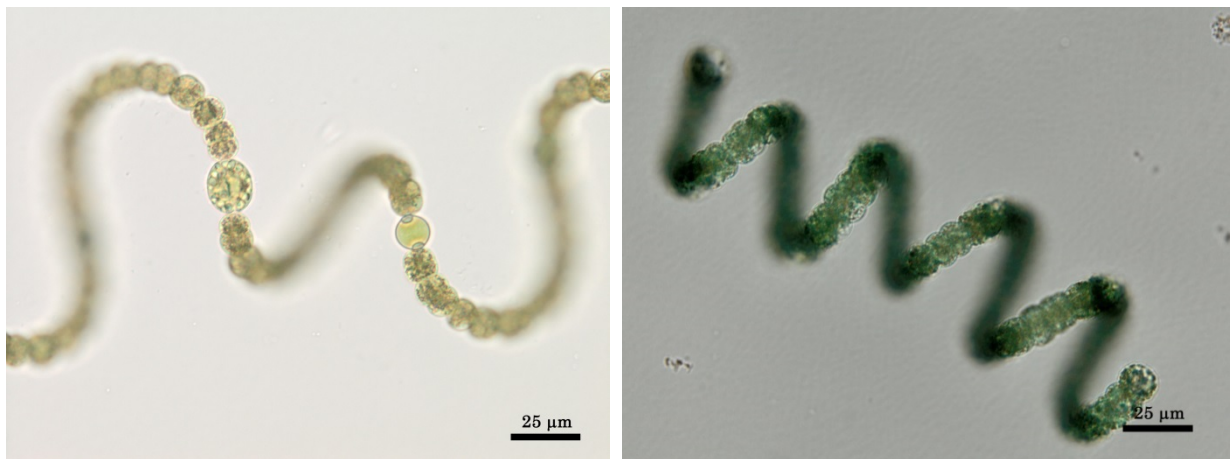


図3 *Dolichospermum crassum*。球形から楕円形の細胞が連なり規則正しい螺旋となる。左: 野外試料。三瓶ダム, 2014年6月19日。カバーガラスをかけたため螺旋がややくずれている。右: 三瓶ダム, 2017年6月22日の試料より分離培養したSD-2株。培養すると青緑色が濃い。

2) 2-MIB (2-メチルイソボルネオール)

Watson 他(2016)は2-MIBを生産する種として、*Pseudanabaena* 属の数種を報告している。まだ三瓶ダムでは種が確定していないが *Pseudanabaena* 属の種が出現しており、過去の三瓶ダムで2-MIBを生産した原因種の可能性がある。

・2004年（平成16年）10月の事例

1996年の三瓶ダム運用開始から8年後2004年に初めて三瓶ダムで2-MIBによるカビ臭が報告されたが、この時、三瓶浄水場（10月21日の試料）から *Pseudanabaena* 属の1種が確認された。湖水の100倍濃縮試料を顕微鏡観察して相対頻度で「非常に多い、多い、普通、少ない、非常に少ない」の5段階に分けて記録をしているが、このときの頻度は「普通」であった。10月26日の三瓶ダム湖水試料では、「非常に多い」、「多い」の種はなく、珪藻の *Aulacoseira granulata* が「普通」と記録されており、*Pseudanabaena* sp.は「少ない」であった。この時、各層採水がされており、どの水深も細胞数は少ないが、表層、水深8mと水深12mで出現し、水深20mでは出現しなかった。*Pseudanabaena* sp.の場合、細胞数が少なくても微量で水道水が臭うのか、採水のタイミング等で細胞数が少なかっただけなのか理由はわからないままである。培養によってこの種が2-MIBを生産するか否かを明かにし、生産する場合は、2-MIB放出の機構やどの濃度でカビ臭として感じるのかなどを明らかにする必要がある。当時、三瓶ダムの水道のカビ臭原因種は *Phormidium tenue* として報告されていたが、琵琶湖から分離保存されていた *Phormidium tenue* 培養株の詳しい分類学的研究によって、現在では *Pseudanabaena* 属の種とされている（Niiyama 他, 2016）。



図4. *Pseudanabaena* sp.は細長い単列の糸状体で、細胞の幅2-2.5 µm 長さ4-9 µmであり、細胞間の隔壁部にはくびれを有す。細胞隔壁の近くにアエロトープを有す。左：生試料。右ホルマリン固定試料。固定すると細胞間の隔壁部のくびれが明瞭となる。三瓶浄水場，2004年10月21日試料。

・2017年（平成29年）9月の事例

三瓶ダムで2-MIBが検出されたとの連絡あり、島根大学の調査チーム（島根県受託研究：島根大学清家先生代表）が9月1日に現地の調査を行い表層水の採集を行った。試料では糸状藍藻の *Limnothrix* sp.が優占していたが、2-MIB生産種として報告されている *Pseudanabaena* 属の種が少ないものの出現していたので、希釈法と寒天平板法により分離培養した。その結果、現在合計6株が培養できており、*Pseudanabaena* 属の培養株は形態から

3つのタイプに分けられた。いずれも鼻での確認段階であるが、2-MIB臭が認められた。今後、形態と遺伝子解析から種を確定し、分析により2-MIB臭を確認する予定である。

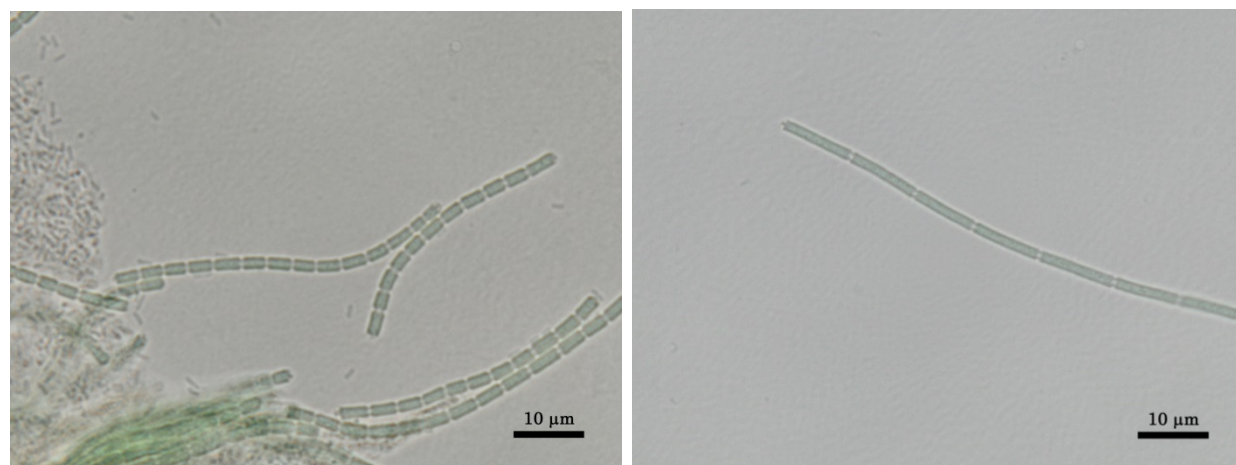


図5. *Pseudanabaena* 属の培養株。左：*Pseudanabaena* sp.1 (SDS-3株)。細長い単列の糸状体で、細胞の幅2 μm 長さ2.5-5 μm、細胞の長さとの比は1.5-2.5であり、細胞間の隔壁部には明瞭なくびれを有す。右：*Pseudanabaena* sp.2 (SDS-5株)。幅1.5 μm 長さ6-12 μmであり、細胞の長さとの比は4-8であり、細胞間の隔壁部には明瞭なくびれを有す。培養株の細胞の長さとの比に注目すると見分けやすい。三瓶ダム、2017年9月1日試料より分離。

おわりに

宍道湖では2007年～2009年にかけてジェオスミンによるカビ臭が問題となった。島根県と島根大学が共同で調査を行い、宍道湖で藍藻 *Coelosphaerium* sp.の細胞数が増加すると湖水のジェオスミン濃度が増加すること、密度勾配法により比重で藻類をいくつかの層に分けたところ本種が多い層からジェオスミンが高い濃度で検出されたことから *Coelosphaerium* sp.が原因生物と推定し報告した (Godo 他, 2011)。本種が原因生物であることが強く推定されたが、確定するためには本種がジェオスミンを生産することを確認する必要があった。2009年の宍道湖湖水から *Coelosphaerium* sp.の無菌培養株が分離され、この培養株を用いた研究が進められた。この培養株がジェオスミンを生産することや遺伝子解析により、近縁種との関係も明らかにされた。培養株を用いた研究と野外調査の結果とあわせて宍道湖における2007年～2009年にかけてのジェオスミン臭は藍藻 *Coelosphaerium* sp.によるものと結論づけて報告した (Godo 他, 2017)。ダム湖でも宍道湖の場合と同様に現地調査に加えて、培養株の分離保存を行うことで、カビ臭の原因生物が特定でき、カビ臭の発生機構や対策が進むことが期待できる。今後も培養株の分離保存を行いながら研究を進めていく予定である。

謝辞

本発表では、島根県県央県土整備事務所、大田事業所の三瓶ダム植物プランクトンの試料やアオコやカビ臭の発生時期のデータを使わせて頂いた。ここにお礼申し上げます。

引用文献

- Godo, T., Ohtani, S., Saki, Y. & Ishitobi, Y. (2011): Detection of geosmin from *Coelosphaerium kuetzingianum* separated by a step density gradient medium from suspended materials in water in Lake Shinji, Japan. *Limnology* 12, 253–260.
- Godo, T. , Saki, Y., Nojiri, Y., Tsujitani, M., Sugahara, S., Hayashi, S., Kamiya, H., Ohtani, S. & Seike, Y. (2017): Geosmin-producing species of *Coelosphaerium* (Synechococcales, Cyanobacteria) in Lake Shinji, Japan. *Scientific Reports Scientific Report 7*: 41928.
- Niiyama, Y., Tuji, A, Takemoto, K. & Ichise, S. (2016): *Pseudanabaena foetida* sp. nov. and *P. subfoetida* sp. nov. (Cyanophyta/Cyanobacteria) producing 2-methylisoborneol from Japan. *Fottea, Olomouc.* 16(1): 1-11.
- 渡辺真利代, 原田健一, 藤木博太編 (1994) : アオコ その出現と毒素. 東京大学出版会, 257pp.
- Watson, S. B., Monis, P., Baker, P. & Giglio, S. (2016): Biochemistry and genetics of taste- and odor-producing cyanobacteria. *Harmful Algae* 54, 112–127.