

## 琵琶湖のプランクトン異常発生 of 歴史

一瀬 諭 (第 21 回学会賞 (2018 年))

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

(元・特命研究員、現・会計年度任用職員)

### はじめに

この度の新型コロナウイルス (COVID-19) 感染症の蔓延により、本年度開催予定の日本水処理生物学会第 57 回大会は来年度に延期となった。

この大会延期に伴い、今回『いま水処理生物学を考える』というテーマのもと、特集号を発刊して下さることになり、私も浅学ながら寄稿させて頂いた。

第二次世界大戦当時、首相として英国の舵を取り、ヒトラーから世界を救った男として知られるウィンストン・チャーチルは「過去を広く深く見渡すことができれば、未来も広く深く見渡すことができるであろう」<sup>1)</sup>と述べている。

私が半世紀近く取り組んできた琵琶湖のプランクトン調査研究の中で特定のプランクトンが大量発生する現象に幾度も遭遇してきた。このプランクトン異常発生も琵琶湖生態系の過去を広く深く見渡すための一知見であり、今後、同様の異常発生が発生したり、さらにその水域の水質評価をするためにはたいへん貴重な知見となると考え、過去のデータを掘り起こし、今後、プランクトンや水質および水処理生物について調査研究を進められる学生さんや研究者の方々のご参考になれば幸いである。

さて、湖沼の水環境問題はプランクトンの異常発生を伴うことが多い。プランクトンの現存量は増殖と死滅のバランスによって決まり、植物プランクトンの場合は光合成による増殖と動物プランクトンによる摂食のバランスによって、現存量がコントロールされている。このバランスの変化に伴い、琵琶湖のプランクトン種はここ 50 年たらずの間に異常発生を繰り返し、大きく変化してきたと言える。

これは、明らかに琵琶湖集水域の社会経済活動の影響も受けていると考えられ、今、琵琶湖の自然はプランクトンの発生を通して私たちに重要なシグナルを発信してくれているのではないだろうか？

私の恩師、故根来健一郎博士は 1945 年当時から琵琶湖のプランクトン異常発生について報告<sup>2)</sup>されている。特に固有種であり絶滅危惧種となっている原生動物有殻アメーバーのピワツボカムリは 1961 年の 8~10 月には琵琶湖北湖で非常に多く分布していたことが記載<sup>3)</sup>されている。

### 2. 方法

滋賀県においても 1975 年から現在に至るまでプランクトン定期調査を継続実施している。その中で私が経験してきたプランクトン異常発生事例について述べてみたい。さらに、異常発生とはならずとも新聞紙上を騒がした水道水の異臭味障害の原因となった種類の発生や、ろ過障害となった種類の発生事例についても併せて述べたい。

プランクトン調査は、原則として琵琶湖環境科学研究センター発行のプランクトンモニタリング調査マニュアル<sup>4)</sup>に沿って実施した。

琵琶湖内で発生したプランクトンの異常発生事例については、淡水赤潮となる種類の発生事例を〔A〕と分類し、アオコとなる種類の発生事例を〔B〕と分類した。また、水道水の異臭味障害となる種類の発生事例を〔C〕、ろ過障害となる種類の発生事例を〔D〕と分類し、合計16事例についてまとめた。

さらに、プランクトンではないが、過去に大きな水環境問題ともなった付着藻類や糸状藻類、湖底におけるマンガン酸化物構造体についても参考として4事例述べてみたい。

### 3. 結果と考察

今回、過去約50年間におけるプランクトンの異常発生事例等について調査した結果<sup>5)</sup>、表1に示したようにDのろ過障害を起こした発生事例が14事例と最も多く、Aの赤潮現象は1事例、Bのアオコ現象は5事例、Cの異臭味障害は4事例であった。

これらプランクトンの発生は水環境異常のシグナルと捉えるべきであると考えられた。また、図1に(a)~(l)に琵琶湖におけるプランクトンの異常発生原因種の写真を記載した。

具体的に見ると1977年5月に北湖において黄色鞭毛藻に属する *Uroglena americana*(a) による淡水赤潮に初めて遭遇し、翌年の1978年5月15日には近江舞子棧橋付近で9,500 群体/ml<sup>6)</sup>と多くの *U. americana* を計数した。その後、県行政も琵琶湖の富栄養化対策を真剣に考えるようになり、富栄養化防止条例(滋賀県琵琶湖の富栄養化の防止に関する条例)の制定に至った。しかしながら、1983年8~9月にかけて南湖の広い水域でアオコ現象が初めて確認され、1985年9月19日には *Anabaena affinis* (*Dolichospermum affine*(b)) が南湖の20のモニタリング地点全域で増加し、平均3,100 群体/mlと多く計数<sup>7)</sup>され、各地点でアオコ現象が確認された。

さらに、1989年7月には北湖において通常の植物プランクトンが殆ど観察されないのに透明度が低下し、クロロフィル-a量が多いと言う不思議な現象に遭遇し、その湖水を落射蛍光顕微鏡や走査型電子顕微鏡で観察した結果、桿菌状の *Synechococcus* sp. (長さ約1  $\mu$  m、直径約0.6  $\mu$  m(c)) が1989年7月3日北湖大浦湾の定点で最高460万細胞/mlと計数<sup>8)</sup>された。この水域ではこの超微細なピコ植物プランクトンにより湖水の粘性が認められ黒っぽいコーヒー色を呈していた。さらに、同時期に琵琶湖北湖湖岸域ではこれまでに例がないほどの広域に約200万尾におよぶアユの大量斃死<sup>9)</sup>が発生した。

この時期をきっかけとして植物プランクトン相に大きな変化が認められ、中でも全体のプランクトン現存量に占める藍藻の割合<sup>10)</sup>が大きくなってきた。特に *Aphanothece clathrate* (d) は1998年8~9月に800 群体/ml以上各地点で計数された。本種は各細胞が1  $\mu$  m程度の微細な細胞であるが200~2,000細胞が密集し、さらにこの細胞を直径200  $\mu$  m~500  $\mu$  mの無色透明で寒天質状の粘質鞘に包まれた群体を形成する。

1998年の8月の定期水質調査時の分析ではCODが8月で3.8mg/L、9月で3.7mg/Lと非常に高く<sup>11)</sup>、多量の粘質鞘を有した本種の大量発生によりCODが上昇した可能性が推

察された。

1994年の平成の大渇水では、琵琶湖の水位は6月頃から急激に下がり続け、9月15日には観測史上最低の-123cmを記録した。その結果、8月22日～10月4日までの44日間にわたって取水制限が行われ、北湖岸でも初めてアオコ現象が確認されるようになった。

1998年8月27日には長浜港内においても *Microcystis wesenbergii*(e)が4,900 群体/ml、9月9日には *M. aeruginosa*が5,600 群体/mlを計数し<sup>12),14)</sup>、この水域では緑色のペンキを流したようなアオコ現象が毎年のように発生するようになった。

さらにこの大渇水以降、湖岸帯では糸状性の付着緑藻である *Spirogyra* sp. (f) や *Oedogonium* sp. が大発生し湖岸に打ち上げられるようになり、異臭も発生し沿岸の付着藻類相にも異変<sup>13)</sup>が生じるようになってきた。

南湖岸においても1998年からアオコの水色が緑色から黒色に変化する不思議な現象が認められるようになった。検鏡した結果、長いものは群体長が数cmにもおよぶ大型糸状性藍藻 *Oscillatoria kawamurae* (g) の発生によるものであった。

本種は1940年に故根来健一郎博士によって新記載<sup>14)</sup>された種類であり、琵琶湖での初めての確認は1991年8月に同氏によって本水処理生物学会で発表された。1998年8月には津市北際川湖岸で5,300 群体/mlと多くの群体を計数<sup>15)</sup>した。

1998年頃から南湖や北湖のエリ網に付着藻類がべったりつきエリ漁が思うようにできないとの漁業者から報告がされるようになった。底泥上やエリ網付着性藍藻の分布について調査を実施した結果<sup>16)</sup>、琵琶湖におけるエリ網の付着物量の原因はやカビ臭問題を引き起こしている原因は付着性糸状藍藻の *Phormidium* sp. (h) の増加によるものであることが明らかになった。これらはエリ網を洗ってもなかなか落ち難く、さらにカビ臭物質である 2-MIB (2-メチル-イソ-ボルネオール) も検出された。

2010年には北湖沖帯で操業されている刺し網漁にも早朝、刺し網を入れてから数時間の間に網に色が付き刺し網漁が思うようにできないと漁業者から報告されるようになった。現地調査の結果<sup>17)</sup>、緑藻に属する糸状藻類のヒザオリと呼ばれる *Mougeotia* sp. (i) が刺し網の目に付着し、それが湖流の流れに影響を受け集積し、さらには、本種のねばねばとした粘質鞘が他の生物遺骸や無機粒子なども多く付着させていることが明らかとなった。

1999年4～7月にかけて琵琶湖で透明度が急激に良くなる現象が認められ、大型のミジンコが増加したことで沖帯の透明度が各地点で10m以上と急に改善したと考えられた。通常、この時期に出現する *Daphnia* 属はほとんどが頭の尖った *Daphnia galeata* であるのに対して1999年4月からは体長1.5～3.5mmにも達する大型のミジンコの出現が確認され、湖水のろ過作業中に肉眼でもはっきり確認<sup>18)</sup>できるようになった。1999年6月22日、北湖中央部表層の定期調査では14 個体/Lを計数<sup>18)</sup>して調査員を驚かせた。この種類は富山大学の田中晋教授および当時京都大学の占部城太郎教授に同定をお願いした結果、北米やヨーロッパの湖沼に分布する *Daphnia pulicaria* (j) であることが明らかとなった。

さらに10月になるとこれまでのアオコ監視パトロールでは全く観察されたことのない

*Aphanizomenon flos-aquae* (k) が大量発生するようになった。本種は北方由来のプランクトンと考えられ、アオコパトロールが終わる 10 月中旬から増加が始まり 11 月中旬まで続くような種類であった。特に本種は浮上性が強く、1999 年 10 月 20 日の大津市雄琴港内では 130 万群体/ml と極めて多数の群体が計数<sup>19)</sup>され、その黄緑に変色した水域では本種による塊状の集合体が多く確認された。

2000 年代にはいと北湖水深別調査時の深層部において直径 20~40  $\mu\text{m}$  の赤褐色微粒子が大量に観察されるようになり、湖水のろ過作業にも障害を生じた。この微粒子はマンガン酸化物の構造体である Metallogenium と呼ばれ、底層部ではきわめて溶存酸素量が少ない水層で発生していることが確認されている。2002 年 10 月 31 日の北湖深層部 Metallogenium の分布調査では水深 90m の湖水から 2,700 個/ml の Metallogenium 粒子を計数<sup>20)</sup>した。

さらに 2016 年には全国的にも報告例がなかった大型緑藻の *Micrasterias hardyi* (l) が秋季から突然大量に発生<sup>21)</sup>した。本種は 175  $\mu\text{m}$  以上の大きさを平面的で勳章に似た形をしており、中央部に深い切れ込みがあり各半細胞には 6 本の腕状突起がある。オーストラリアやニュージーランドなどから報告<sup>22)</sup>されているが日本の湖沼からは報告例がなかった種類である。調査を始めた 1978~2010 年までの 33 年間には全く確認されず、2011 年 11 月 7 日に南湖中央地点で初めて本種が確認され、その後、2016 年 11 月~2017 年 1 月にかけて琵琶湖各地点で大量に発生し、最高値は 2016 年 11 月で今津沖中央地点の水深 5m 層で最高 119 細胞/ml を計数した。

このように私の知る限り琵琶湖では約 50 年間の間に 20 事例の微生物による異常発生が確認されたが、これらの現象は、栄養塩濃度や透明度といった物理・化学の環境項目の測定のみでは検知が難しく、琵琶湖の水環境の変化を把握する上で十分ではないことを意味している。特に琵琶湖の水環境問題は植物プランクトンの異常発生に起因している可能性が高いことから、植物プランクトンそのものの季節変化をモニタリングしないと、発生したプランクトンの対策が取れないどころか問題そのものを知ることすらできない。

前述のように、プランクトンの現存量や優占している種類は非生物環境要因と生物環境要因によって決まるため、湖沼で生じる様々な水環境の異変を把握し、要因を理解しつつ対応を図っていく上でこれらの継続的な監視が必要である。

滋賀県はプランクトンの長期のモニタリングに多くの経験と実績を有し、水環境における諸課題において常に国内外をリードしてきた。これは偏に琵琶湖環境に対する県民の理解があったためであるといえる。

移り変わりの早い現代社会において、継続的環境モニタリングは明確な成果が見えにくいこともあって、コスト削減対象になりがちである。しかしながら、時々刻々と変化する環境は、今、モニタリングしなければ、後から把握評価することはできないということを十分に理解し、環境モニタリングを着実に継続するとともにモニタリングデータを有効活用することにより、よりよい水環境の創造に資することを願ってやまない。

表1 琵琶湖におけるプランクトン異常発生事例<sup>(註)</sup> (1959-2016、一瀬諭他)

発生確認	プランクトン・付着藻類	北湖	南湖	備考(原因生物など)	分類
1959 (昭和34年)	クロステリウムの大量発生		○	<i>Closterium aciculare</i> var. <i>subprorum</i> (ろ過障害: 緑藻)	D
1961 (昭和36年)	スタウラストルムの大量発生		○	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> (ろ過障害: 緑藻)	D
1969 (昭和44年)	カビ臭生成プランクトン発生		○	<i>Phormidium tenue</i> (臭気物質2MIB: 藍藻)	C
1977 (昭和52年)	淡水赤潮の大規模発生	○	○	<i>Uroglena americana</i> (生ぐさ臭: 黄色鞭毛藻)	A.C.D
1983 (昭和58年)	南湖におけるアオコ初発生		○	<i>Anabaena affinis</i> (アオコ形成種: 藍藻)	B
1989 (平成1年)	ピコ植物プランクトンの大量発生	○		<i>Synechococcus</i> sp. (超微小種: 藍藻)	D
1993 (平成5年)	ゴンフォスフェリアの大量発生	○		<i>Gomphosphaeria lacustris</i> (群体性: 藍藻)	D
1994 (平成6年)	北湖におけるアオコ初発生	○		<i>Microcystis aeruginosa</i> (アオコ形成種: 藍藻)	B
	アオミドロの大量発生	○	○	<i>Spirogyra</i> sp. <i>Oedogonium</i> sp. (緑藻)	D
1998 (平成10年)	アフノテーケの大量発生	○		<i>Aphanothece clathrata</i> (藍藻)	D
	オシラトリアのアオコ初発生		○	<i>Oscillatoria kawamurae</i> (藍藻)	B.D
	エリ網付着性藍藻の大量発生	○	○	<i>Phormidium</i> sp. (臭気物質2MIB: 藍藻)他	C
1999 (平成11年)	アフアニゾメノンのアオコ初発生		○	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (藍藻)	B.D
	大型ミジンコの大発生	○		<i>Daphnia plicaria</i> (透明度: 甲殻類)	—
2002 (平成14年)	湖底でのメタロゲニウム大量発生	○		<i>Metalogenium</i> (マンガン酸化物構造体)	D
2008 (平成20年)	ディモルフオコックスの大量発生		○	<i>Dimorphococcus lunatus</i> (ろ過障害: 緑藻)	D
2010 (平成22年)	刺し網付着性緑藻の大量発生	○	○	<i>Mougeotia</i> sp. (刺し網に付着: 緑藻)他	—
2012 (平成24年)	スタウラストルムの大量発生	○	○	<i>Staurastrum dorsidentiferum</i> var. <i>ornatum</i> (ろ過障害: 緑藻)	D
2016 (平成28年)	オシラトリアのカビ臭大発生	○		<i>Oscillatoria raciborskii</i> (臭気物質2MIB: 藍藻)	B.C
	ミクラステリアスの冬季の大発生	○	○	<i>Micrasterias hardyi</i> (ろ過障害: 緑藻)	D

(註) プランクトン以外の付着藻類、糸状藻類、マンガン酸化物構造体を含む

分類 [A] 淡水赤潮となる種類の発生事例

[B] アオコとなる種類の発生事例

[C] 水道水の異臭味障害となる種類の発生事例

[D] ろ過障害となる種類の発生事例と分類した。

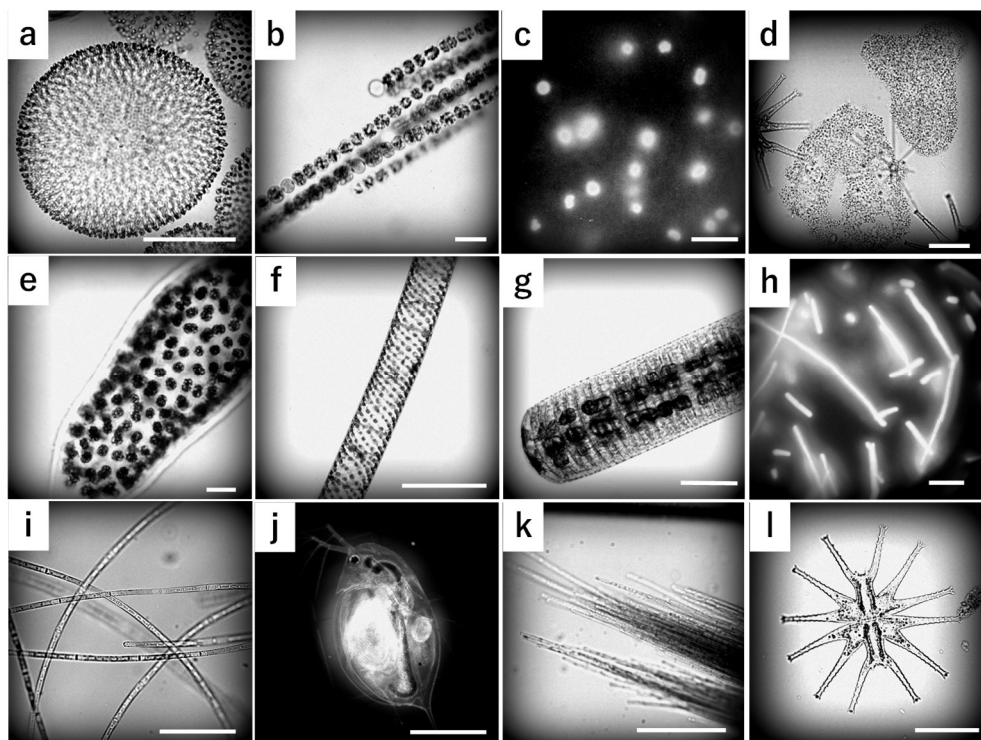


図1. 琵琶湖におけるプランクトン異常発生の原因種 (a) ~ (l)

- a. *Uroglena americana*(100 $\mu$ m) b. *Anabaena affinis* (10 $\mu$ m) c. *Synechococcus* sp. (10 $\mu$ m)  
 d. *Aphanothece clathrate* (50 $\mu$ m) e. *Microcystis wesenbergii*(10 $\mu$ m) f. *Spirogyra* sp. (50 $\mu$ m)  
 g. *Oscillatoria kawamurae* (50 $\mu$ m) h. *Phormidium* sp. (20 $\mu$ m) I. *Mougeotia* sp. (100 $\mu$ m)  
 j. *Daphnia pulicaria* (1mm) k. *Aphanizomenon flos-aquae* (50 $\mu$ m)  
 l. *Micrasterias hardyi* (50 $\mu$ m) ( $\mu$ m) =写真内スケール

## 引用文献

- 1) ウィンストン・チャーチル：COVID-19 に関する情報（新興感染症の歴史），日本予防理学療法学会，1874-1965（2020）
- 2) 根来健一郎：琵琶湖の植物性プランクトン，滋賀県植物誌，275-330（1968）
- 3) 一瀬諭，若林徹哉他：琵琶湖固有種ビワツボカムリ (*Diffflugia biwae Kawamura*, 1918) の分布と消長について，滋賀県立衛生環境センター，39，57-63（2004）
- 4) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター：プランクトンモニタリングマニュアル：環境監視部門生物圏担当，3-10（2015）
- 5) 一瀬諭，池田将平他：琵琶湖におけるプランクトン異常発生の歴史，日本水処理生物学会第54回大会講演要旨集，56（2017）
- 6) 若林徹哉，一瀬諭他：1977年に琵琶湖で発生した赤潮について，13,163-164（1977）
- 7) 一瀬諭，森田尚他：琵琶湖における「水の華」モニタリング調査 I，滋賀県立衛生環境センター，22，103-118（1978）
- 8) 一瀬諭，若林徹哉他：ピコプランクトンの異常発生，ピコプランクトンの分布，日本水産学会，ピコプランクトン異常発生とアユの大量斃死シンポジウム，61(6)，932-933（1995）
- 9) 京都新聞：琵琶湖におけるアユの死は200万尾。1989.7.4（1989）
- 10) 一瀬諭，池谷仁里他：琵琶湖に棲息する植物プランクトン総細胞容積および粘質鞘容積の長期変動解析，日本水処理生物学会誌，49-2，65-74（2013）
- 11) 藤原直樹，一瀬諭他：琵琶湖におけるCODの上昇と藍藻 *Aphanothece clathrate* の増殖について（1998年7月～9月），滋賀県立衛生環境センター所報，34,40-46（1999）
- 12) 一瀬諭：プランクトンの長期変動と富栄養化，応用生態工学研究会研究発表会講演要旨集，S2，123-126（2000）
- 13) 松岡泰倫，一瀬諭他：琵琶湖湖岸部の糸状付着性緑藻類について，滋賀県立衛生環境センター所報，30,84-88（1995）
- 14) 根来健一郎：1991年秋の琵琶湖のアオコ，日本水処理生物学会誌，28,129-130（1992）
- 15) 一瀬諭，若林徹哉他：琵琶湖における水の華発生状況について，*Oscillatoria kawamurae* の増殖，滋賀県立衛生環境センター所報，34,84-90（1999）
- 16) 琵琶湖北湖沿岸帯湖底における泥質化の現状と藻類・アオコ形成種の分布，用水と排水，46,(5)，39-49（2004）
- 17) 大前信輔，森田尚：春から夏における刺網への藻類等の付着現象と付着物組成，環境省平成22年度環境研究総合推進費成果集（D-1004），74-78（2010）
- 18) 一瀬諭，若林徹哉他：琵琶湖に出現した大型ミジンコの *Daphnia pulicaria* 繁殖試験について，滋賀県立衛生環境センター所報，35,88-93（2000）
- 19) 一瀬諭，若林徹哉他：琵琶湖における *Aphanizomenon flos-aquae* の出現について，滋賀県立衛生環境センター所報，35,83-87（2000）
- 20) 一瀬諭，若林徹哉他：琵琶湖深層部の微生物由来マンガン酸化物構造体 *Metallogenium* sp. の発生，用水と排水，48,(5)71-79（2006）
- 21) 一瀬諭，池田将平他：琵琶湖における *Micrasterias hardyi* の季節性とその動向，第55回，日本水処理生物学会別巻要旨，B-08，38（2018）
- 22) P. A, Tyler：Taxonomy of Australian freshwater algae.1.The genus *Micrasterias* in South-Eastern Australia, British Phycological,5:2, 211-234（1970）