

第1章 富栄養化現象

1.1 富栄養化現象とは

富栄養化現象とは、人為的負荷によりダム貯水池へ窒素、リンなどの栄養塩類の供給が増加し、その結果、水域の栄養塩類濃度が徐々に高くなる「富栄養化」の過程と、富栄養化レベルが、貧栄養・中栄養を経て至った富栄養状態で発生する現象を指す。

【解説】

富栄養化とは、本来の意味では湖沼やダム貯水池などの閉鎖性水域が、長年にわたり流域から窒素化合物及びリン酸塩等の栄養塩類を供給されて、プランクトンや魚類が比較的少なく生物生産活動が活発ではない貧栄養から、中栄養を経て、栄養塩類の濃度が高く水域としての生物生産ポテンシャルが上昇した富栄養に遷移する自然現象をいう。

本書では、人為的負荷によりダム貯水池へ窒素、リンなどの栄養塩類の供給が増加し、その結果、水域の栄養塩類濃度が高くなる過程を「富栄養化」と表現し、富栄養に至っている状態を「富栄養状態」という。

富栄養状態に至った水域では生態系を構成する生物相が変化し、その変化は一般的には生物の多様性を減少させる方向に進む。極端な場合には、藍藻類*の一部の特定種などが著しく優占する生態系となり、水域に悪影響を及ぼす現象を二次的に引き起こすため、公害や環境問題として広く認識されるような影響が発生する場合がある。

本書で扱う「富栄養化現象」とは、上述した人為的負荷による富栄養化の過程と、富栄養化が進んだ結果として至った富栄養状態で発生する現象の両者を含むものとする。

また、富栄養状態となる原因である人為的負荷要因としては、流域から流入する生活排水・農業排水・畜産排水・工業排水など、多岐にわたると考えられている。

* : 藍藻は核という構造を持たない原核生物であるという点で、他の藻類や陸上植物と大きく異なります。そこで藍藻は原核生物の細菌類と同じ仲間と見なされ、最近ではシアノバクテリア、または藍色細菌と呼ばれることが多くなっています。(国立科学博物館／<https://www.kahaku.go.jp/research/db/botany/aoko/aokocontents/bunrui.html>)

1.2 富栄養化レベルとは

水中の栄養塩類濃度と生物生産の高低によって、栄養塩類濃度が低く生物生産の低い状態を貧栄養レベル、栄養塩類濃度が高く生物生産の高い状態を富栄養レベルと分類されている。また、貧栄養レベルと富栄養レベルの中間は中栄養レベルとして区分される。

【解説】

湖沼やダム貯水池における生態系ピラミッドの底辺を構成する藻類の発生・増殖は、水中の窒素・リンといった栄養塩類濃度に規定され、栄養塩類濃度と生物生産には密接な関係がある。この関係を基に水中の栄養塩類濃度が低く生物生産の低い状態を貧栄養レベル、栄養塩類濃度が高く生物生産の高い状態を富栄養レベルと分類されている。また、貧栄養レベルと富栄養レベルの中間を中栄養レベルとして区分することがある。

水中の栄養塩類濃度として全窒素*、全リンを基準とした湖沼やダム貯水池の富栄養化レベル（または「階級」）については、表1に示す通り複数の研究者、機関によって提案されている。この中で、坂本（1996）が提唱した貧栄養から富栄養レベルへの全窒素、全リンの階級を概念図として図化したものが図1である。

また、貧栄養、富栄養レベルの湖沼やダム貯水池における湖盆形態、水質・生物等の特性例を整理したものが表2である。

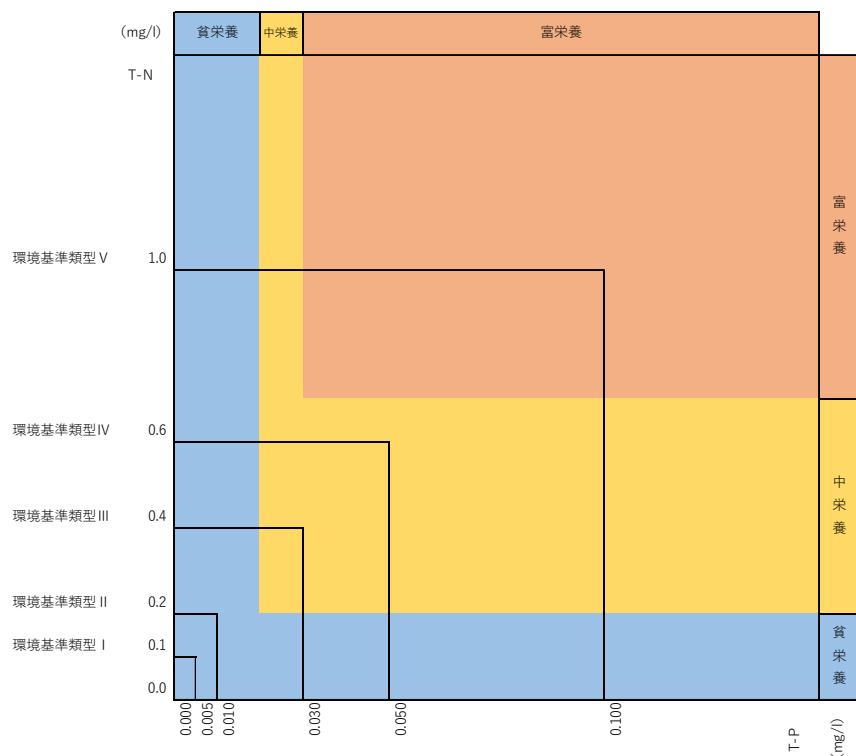


図1 全窒素、全リンによる貧栄養から富栄養への階級レベルの概念図

* 原則として、本文中は「全窒素」、表題・表中では、全窒素、T-N、T-N(全窒素)のいずれかの表記とした。「全リン」も同様に、本文中は「全リン」、表題・表中では、全リン、T-P、T-P(全リン)のいずれかの表記とした。

(坂本(1996)による)

表1 T-N、T-Pによる貧栄養から富栄養への階級レベル

	階級			出典
	貧栄養	中栄養	富栄養	
T-N (mg/L)	0.02~0.2	0.1~0.7	0.5~1.3	坂本 1966
	<0.4※	0.4~0.6※	0.6~1.5※	Forsberg & Ryding 1980
T-P (mg/L)	0.005~0.01	0.01~0.03	0.03~0.1	Vollenweider 1967
	0.002~0.02	0.01~0.03	0.01~0.09	坂本 1966
	<0.02		>0.02	吉村 1937
	<0.01	0.01~0.02	>0.02	US EPA 1974
	<0.012	0.012~0.024	>0.024	Carlson 1977
	<0.0125	0.0125~0.025	>0.025	Ahl & Wiederholm 1977
	<0.01	0.01~0.02	>0.02	Rest & Lee 1978
	<0.01	0.01~0.035	0.035~0.1	OECD
	<0.015※	0.015~0.025※	0.025~0.1※	Forsberg & Ryding 1980

注)※印は夏季(6月~9月)平均値

出典: 岩佐義朗編著「湖沼工学」(山海堂、1990)

表2 貧栄養、富栄養レベルの湖沼やダム貯水池の湖盆形態、水質・生物等の特性例

水質・生物等の項目	富栄養化レベル	貧栄養	富栄養
湖盆形態		深い、湖沼の幅が狭い 深水層は表水層より容量が大きい	浅い、湖沼の幅が広い 深水層は表水層より容量が小さい
水の物理的性質	水色	藍または緑色	緑~黄色
	透明度	5m以上	5m以下
水質	pH	中性付近	中性から弱アルカリ性 成層期に強アルカリ性になる場合がある
	溶存酸素	全層飽和に近い	表層は飽和または過飽和 底層は貧酸素化が起きる場合がある
	栄養塩濃度	TN < 0.20 mg/L TP < 0.02 mg/L	TN > 0.20 mg/L TP > 0.02 mg/L
生物	生産力	小、200 mgC/cm ² /day 以下	大、200 mgC/cm ² /day 以上
	クロロフィルa	0.3 ~ 2.5 mg/m ³ 10 ~ 50 mg/m ²	5 ~ 140 mg/m ³ 20 ~ 140 mg/m ²
	植物プランクトン	貧弱、珪藻が主な構成種	豊富、夏季に藍藻によるアオコが発生する場合がある
	動物プランクトン	貧弱、甲殻類が主な構成種	豊富、ワムシ類が増加し主な構成種となる
	ペントス	種数・量とも豊富 ユスリカ幼虫なども生存	種数が少ない ユスリカ、貧毛類が多い
	魚類	マス、ウグイが主な種	コイ、フナ、ウナギ、ワカサギが主な種
	沈水植物	少ない、深部にまで生育	多い、浅部のみ生育
底質	強熱減量(小)、珪藻骸泥	強熱減量(大)、骸泥~腐泥	

出典: 土木学会環境工学委員会、環境工学に関わる出版準備小委員会編「環境工学公式・モデル・数値集」(土木学会、2004) p. 370 表 2-2.4.32

注) 本表は貧栄養と富栄養の両端を示したものであり、富栄養状態に向かう中栄養レベルの湖沼やダム貯水池はこの中間の状態の特性を示す

1.3 ダム貯水池における富栄養状態による影響

1.3.1 富栄養状態で発生する影響

富栄養状態では、水域の栄養塩類濃度が高いため、藻類の増殖による透明度の低下、水色の変化、昼間のpHの上昇等の水質変化が生じる。さらに特定の藻類の増殖が進むと、アオコ等の生物異常発生現象が顕在化し、それに伴いかんがい用水の水質低下等のかんがいへの影響、景観阻害や悪臭の発生等のかんがい以外への影響が発生する。

【解説】

富栄養状態では、藻類の増殖による透明度の低下、水色の変化、pHの上昇等の水質変化が生じる。さらに、水温や日射量等の気象条件や流入水量等の水理条件等が特定の藻類の増殖に適した場合には、アオコや淡水赤潮等といった生物異常発生現象として顕著化する場合がある。こうした状況が生じると、水質としては農業用水基準等の評価項目であるpHやCOD濃度の上昇が起こり、水質基準や目標値を超過し、かんがい用水の水質低下につながる可能性がある。また、アオコや淡水赤潮等といった生物異常発生は、水面を覆うことによる景観阻害や死滅による腐敗臭等の発生、魚類のへい死、利水面ではろ過障害やカビ臭の発生として影響する。

さらに、富栄養状態のダム貯水池において、水温成層により底泥付近が貧酸素状態となると、栄養塩類に富んでいる底泥から栄養塩類が溶出しやすくなる。こうした栄養塩類の溶出は、ダム貯水池の富栄養状態を促進させることとなり、水質悪化が更に進行するケースも生じる。

1.3.2 代表的な生物異常発生現象の一つであるアオコ発生による影響

富栄養状態で発生する代表的な生物異常発生現象の一つであるアオコとは、富栄養化が進んだ湖沼やダム貯水池などの閉鎖性水域で、水温が20°C以上になる初夏から初秋にかけて、ミクロキスティスやアナベナなどの藍藻類が異常増殖して、水面が青藍色の粉で覆いつくされたようになる現象であり、透明度が低下するばかりでなく、かんがい利用、レクリエーション施設としての利用、魚類や底生生物、上水などへの影響が発生する。

【解説】

アオコとは、富栄養レベルの湖沼やダム貯水池などの閉鎖性水域で、水温が20°C以上になる初夏から初秋にかけて、ミクロキスティスやアナベナなどの藍藻類が異常増殖して、水面が青藍色の粉で覆いつくされたようになる現象である。さらに藍藻類の増殖と集積が著しい場合は、増殖した藍藻類は水面上に緑色のマット状として形成される。この現象は、貧栄養、中栄養レベルのダム貯水池においても一時的な栄養塩類の大量流入時、極端な渇水や高温の長期化等といった水理・気象条件によっては、局所的に発生する場合がある。

アオコが発生すると、透明度が低下するばかりでなく、かんがい利用にあたっては、葉菜

類などへの藻類付着による農作物の品質低下や、点滴かんがい施設の目詰まり等の施設障害を引き起こす可能性がある。

ダム貯水池をレクリエーション施設として利用する場合には、透明度の低下による景観阻害、アオコがえらにつまることによる魚類等の窒息死、アオコ等の藍藻類の死滅時に発する腐敗臭による悪臭などで利用価値が低下する場合もある。

また、アオコ等の藍藻類の死滅後の分解には酸素が消費されるが、過剰に酸素が消費された場合には、底質の溶存酸素濃度が低下し、魚類や底生生物などのへい死が引き起こされることもある。

その他、アオコ等の藍藻類の種によっては肝臓毒、神経毒などの有害な化学物質が作られる他、上水道の水源として利用される場合には、ろ過障害やカビ臭として上水への影響が生じることもある。

アオコが発生した場合のかんがい等への影響については、図 2 に示すとおり整理される。なお、アオコの増殖特性等の詳細については、1.4.1 生物異常発生の発生要因を参照されたい。

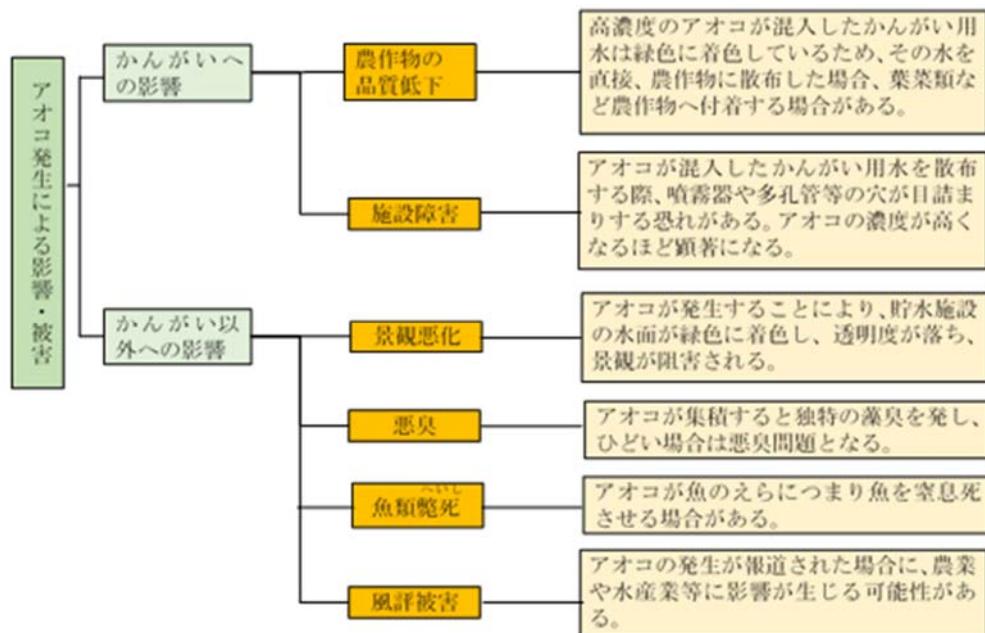


図 2 アオコ発生によるかんがい等への影響・被害

出典：鈴木光剛「畑作物の水質環境 食の安全とおいしさを求めて」（社団法人畑地農業振興会、2003 年）
鈴木光剛 研究代表者「畑地かんがい用水の水質とその適正限界」（平成 5, 6 年度科学研究費補助金研究成果報告書）
井芹寧「ダム貯水池における淡水赤潮とアオコの発生機構および対策について」（九州技報第 23 号、1998 年 7 月）
(公材) 環境科学技術研究所「湖沼における窒素の循環」（環境研ミニ百科第 50 号、http://www.ies.or.jp/publicity_j/mini_hyakka/50/mini50.html）

【アオコ発生による影響に関する被害事例】

平成 21 年度に全国の農業用貯水施設（143 施設）の管理者を対象に行ったアオコ発生による影響に関するアンケートによれば、23%の施設で被害があったとの回答がありました（図① 参照）。被害の内容としては、悪臭、景観悪化の順に多く、次いでかんがい施設の目詰まり等の施設障害という回答が多くなっていました（表① 参照）。

アオコ発生の程度がひどい場合には、悪臭等の被害が生じ、新聞等で報道されているケースもあります（【アオコ被害に関する新聞記事】参照）。

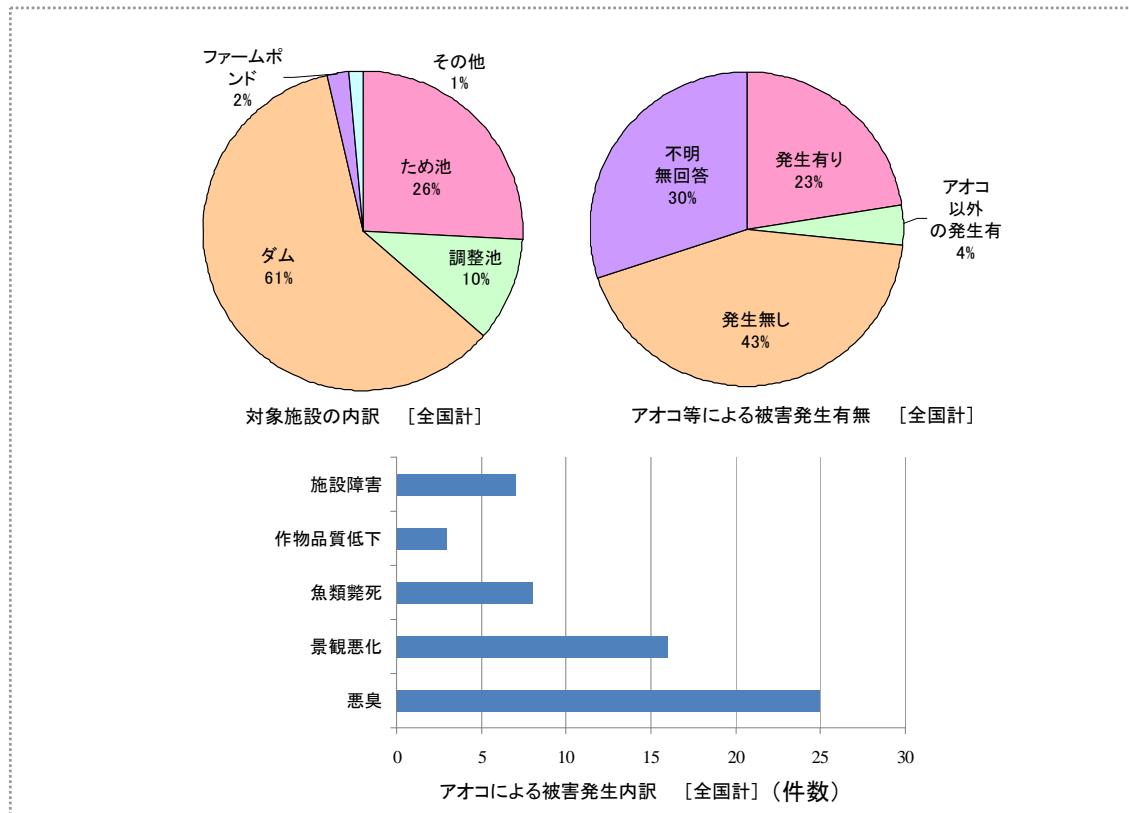


図 ① 水質被害の発生状況（データ出典：H21 施設管理者アンケート）

表 ① アオコ発生による影響・被害の内容（データ出典：H21 施設管理者アンケート）

区分	影響・被害の内容
かんがいへの影響	<ul style="list-style-type: none"> 農作物の風評被害 点滴かんがい施設の目詰まり ストレーナーの目詰まり
かんがい以外への影響	<ul style="list-style-type: none"> 近隣住民から異臭により家の窓が開けられない等の苦情 貯水施設内における魚の斃死 景観の悪化に対する苦情（特に貯水施設が親水利用されている場合は影響が大きい） 貯水施設下流の浄水場においてろ過障害が発生 水道用水に異臭が発生

【アオコ被害に関する新聞記事】

見出し	新聞記事の概要	備考
アオコで水道水に異臭 宝塚市民から苦情相次ぐ	<p>宝塚市は24日、市民から「水道水が土臭い」といった苦情が22日以降64件寄せられたと発表した。市上下水道局によると、苦情は市惣川浄水場（同市すみれが丘4）の配水地域からで、水源の貯水池に「アオコ」が異常発生したことが原因とみられる。同局は人体に影響はないとしている。</p> <p>同局は22日から、活性炭を增量しており、24日午後5時現在、臭気の数値は正常に戻っているという。</p>	2011/8/25 神戸新聞朝刊
霞ヶ浦、悪臭に苦情 アオコ回収追い付かず	<p>『土浦市、休み返上で作業』</p> <p>霞ヶ浦・北浦でアオコが大量発生している問題で、腐敗して悪臭を放つアオコが土浦市内の河川でも増え続けており、市民から市に苦情が殺到。市はお盆休み返上で回収に当たる。</p> <p>市民からは「臭い」、「窓を開けられない」、「洗濯物や布団を干せない」などといった苦情が12日までに数百件寄せられている。</p>	2011/8/13 茨城新聞朝刊
アオコ：館林で大量発生 苦情で県、市が除去対策	<p>館林市の城沼や鶴生田川などでアオコが大量に発生し、近隣住民から「窓を開けると悪臭が家中に広がる。何とかしてほしい」と苦情が寄せられている。アオコがこれ以上広がるのを防ごうと、県と市などは除去対策に乗り出している。</p> <p>『城沼でコイ浮く』</p> <p>アオコは水全体を緑色や茶褐色に変色させる微小な藻類。水温が25~35度に上昇し、栄養分を含んだ家庭からの排水が流入すると大量に発生する。放置すると繁殖し、過密状態が続くと腐敗して悪臭を放つ。城沼では酸欠で死んだコイなどが多数、浮かんでいる。</p>	2005/7/20 毎日新聞地方版群馬
アオコ田瀬湖（東和）覆う 悪臭・酸欠・景観も損なう 過去最大の発生 魚の被害報告なし	<p>東和町の田瀬湖で、植物プランクトンが異常増殖する「アオコ」が、過去にない規模で大発生している。現在は湖面一面が緑色の状態だ。アオコの大発生は湖水が滞留しやすいダムの機能上の問題に加え、今夏の好天が要因とみられる。かんがい用水への影響や淡水魚の死滅被害などは確認されていないが、悪臭や景観・湖面利用上の支障が懸念され、北上川ダム統合管理事務所は監視を強化している。湖畔には釣り公園やヨットハーバーもあり、関係者は頭を痛めている。</p>	2005/9/24 岩手日報朝刊
アオコ大量発生、緑川ダム 7月からの少雨と猛暑原因 悪臭に観光客から苦情も	<p>下益城郡砥用町の緑川ダムの湖面に微小藻類アオコが大量に発生、いたる所で湖面が黄緑色に変色している。アオコは七月中旬から見られるようになり、八月中旬に最も繁茂した。ダム湖では10年ほど前からほぼ毎年アオコが発生しているが、町によると「ここまで異常に変色したのは初めて」という。</p> <p>ダム湖畔にキャンプ場がある砥用町は「観光客から悪臭がするとの苦情を受けている。このような状態が長く続くと町のイメージダウンになる」と頭を抱えている。</p>	1998/9/3 熊本日日新聞朝刊
アオコ勢力衰えず 湖岸に吹きだまり悪臭被害の心配も 網走湖	<p>網走湖のほぼ全域で発生が観測された植物プランクトンの異常発生・アオコは、確認してから三日たった二日も、依然衰えを見せていない。風下の湖岸沿いには、吹き寄せられたアオコがたまり始め、水面は緑色に染められている。</p> <p>またアオコが多く吹き寄せられているのは、網走市呼人地区から女満別町湖南地区を中心とした湖の東側。風に流されながら、時速一キロ以下のペースでゆっくり漂っており、悪臭の被害が心配される。</p>	1996/9/3 北海道新聞朝刊

1.4 生物異常発生の発生要因と環境への影響

富栄養状態のダム貯水池で生じる環境や利水への影響には、生物の異常発生そのものに起因する景観や利水障害等と、異常発生した生物の死滅によって生じる悪臭発生等があり、その発生要因は異なる。

【解説】

富栄養状態のダム貯水池で生じる利水や環境への影響としては、利水面では農業用のかんがい用水としての水質低下、かんがい施設の目詰まり等の大きな影響が発生する。上水利用もされているダム貯水池では、ろ過障害やカビ臭として問題となる場合もある。また、景観などの環境問題としては、ダム貯水池での藻類の異常繁殖によりダム貯水池の水面が変色することによる景観悪化や異常繁殖した藻類の死滅により発生する悪臭が問題となる。

こうした影響の原因となる生物異常発生の発生要因と影響について、以下に記載する。

1.4.1 生物異常発生の発生要因

生物異常発生とは、一般に特定の藻類の異常増殖によりダム貯水池の水面で顕著な変色が確認された状態を指す。これらの現象の発生要因は、第一に、流域の土地利用等の変化（森林の農耕地化、農耕地の宅地化、工場や畜舎等の増加など）によって流入水質が変化し、結果として流入水の栄養塩類の増加によりダム貯水池が富栄養化することがあげられる。それに加えて特定の藻類の増殖に適した水温や日射量等の気象条件が整ったり、水理条件としての流入水量の増減なども関係するほか、ダム貯水池内の生物の相互作用等も関係することから、発生要因は複雑である。

【解説】

富栄養状態のダム貯水池で、水温が上昇する初夏から初秋にかけて、水面が緑色の粉をふいたようになり、ひどい場合は、緑色のペンキが厚い層で広がったように見える場合がある。このような現象のことを「アオコ」と呼び、主に藻類の異常増殖が原因となって発生する。

藻類の異常増殖による水の着色を「水の華」と呼ぶが、「水の華」には前述の「アオコ」のほか、水面が赤褐色等に着色する「淡水赤潮」が知られている。

アオコを例にとれば、藻類のうち主に藍藻類が原因と言われているが、藍藻類の異常増殖がすべてアオコの原因となるわけではなく、藍藻類の中でも群体を形成する等の特徴を持つ一部の種類が原因藻類となる。

水の華の原因藻類の例を表 3 及び図 4 に示す。



図 3 アオコの発生状態

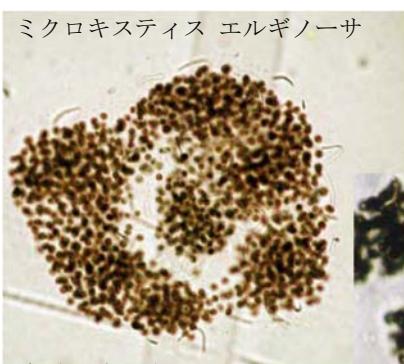
表 3 水の華（アオコ及び淡水赤潮）の原因藻類の例

現象	原因藻類	主な種類
アオコ	藍藻類	ミクロキスティス、アファニゾメノン、アナベナ等
	緑藻類	クロレラ、セネデスマス、クラミドモナス等
淡水赤潮	珪藻類、緑藻類	
	渦鞭毛藻類、ユーグレナ藻類等	セラティウム、ペリディニウム、ユーグレナ、ウログレナ等の赤色、赤褐色、黄褐色の色素体を持った種類
	動物プランクトン	ミジンコ、ゾウミジンコ

出典：ダム貯水施設の水環境 Q&A なぜなぜおもしろ読本（財）ダム水源地整備センター

ミクロキスティス属

粒状の細胞体が球状・立方体状に群体を形成。



細胞の大きさ：2.5～9.5 μm



細胞の大きさ：
4.0～7.0 μm

アファニゾメノン属

円筒形の細胞体が細長い群体を形成。



細胞の直径：
4.0～7.0 μm
細胞の長さ：
5.0～15.0 μm

アナベナ属

粒状の細胞体が糸状体あるいは束状の群体を形成。



細胞の
大きさ：
5.0～
14.0 μm



アナベナ フロスアクアエ
細胞の直径：
4.0～8.0 μm
細胞の長さ：
6.0～8.0 μm

※藍藻類の種類は形状の特徴からある程度は判別することができる。なお、藍藻類の色は発生段階により緑色から茶色に変化します。

出典：滋賀県琵琶湖・環境科学研究センター、一瀬 諭「琵琶湖アオコの同定法、計数法、評価法」（平成17年、<https://plankton-lakebiwa.com/seminar/seminar051130pre.pdf>

図 4 アオコの原因となる主な藍藻類

原因の一つであるミクロキスティスを例にとれば、水温が20°Cを超えると増殖速度が増加し、25°Cを超えると異常増殖が始まることが知られている。また、藻類が増殖するためには活発に光合成を行う必要があり、十分な日射量が必要となる。したがって、ミクロキスティスは梅雨明け後の夏に異常増殖してアオコを生じさせ、秋になり水温や日射量が低下すると衰退していくといった消長サイクルを持つ。

アオコの増殖しやすい環境の特徴は、図5のようにまとめられるが、これは図6に示すような発生メカニズムを持つためである。アオコの発生は、気温の上昇、日射量の増加、それらに伴う水温の上昇や、降雨量の減少に伴う流入水量の減少など気象変化に影響をうけるほか、流域の土地利用の変化等による栄養塩類の流入量の変化や、ダム貯水池底からの栄養塩類の供給量の変化、ダム貯水池内の水理特性の変化による影響を受けている。

さらに、図7に示すとおり他の植物プランクトンとの競合による影響のほか、魚類や動物プランクトンによる捕食など、様々な生き物が相互に関係して増殖するため、水質や気象等の条件が同じでも増殖や衰退の時期が異なったり、年によってアオコが出現したり、しなかつたりするため、アオコを含めた生物異常発生（消長）を単純に予測することは難しい。

アオコが増殖しやすい環境

- 適度な水温であること：藻類の光合成による細胞増殖速度は一般に水温の上昇とともに高くなるが、ある限界を超すと低下する。
- 日射が十分あること：藻類の成長には十分な光を必要とする。水中照度は水深によって低下するため、光が十分な場所で増殖し、光の減少につれて暫減する。強光下では逆に光合成が低下する強光阻害という現象もある。
- 豊富な栄養塩があること：栄養塩類は生物の増殖に不可欠な塩類であり、主に貯水池では、りんや窒素が藻類の細胞増殖への寄与が高い。
- 滞留時間が十分にあること：貯水池の滞留時間が短ければ、藻類が増殖する前に流出するため、異常な増殖は起こらない。OECDの報告書（1982）では滞留時間が3～5日以内だと増殖しないとしている。

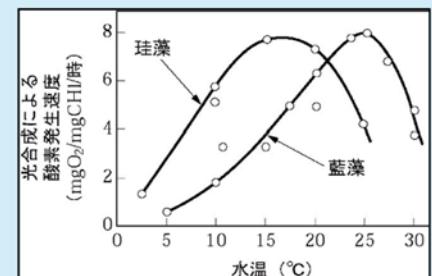


図6：珪藻および藍藻の光合成-水温曲線

出典：有賀祐勝「水界植物群落の物質生産II—植物プランクトン—」（共立出版、1973、p.51、
湖沼の珪藻および藍藻の光合成-温度曲線）

OECD「Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control」（OECD、1982）

図5 アオコが増殖しやすい環境の特徴

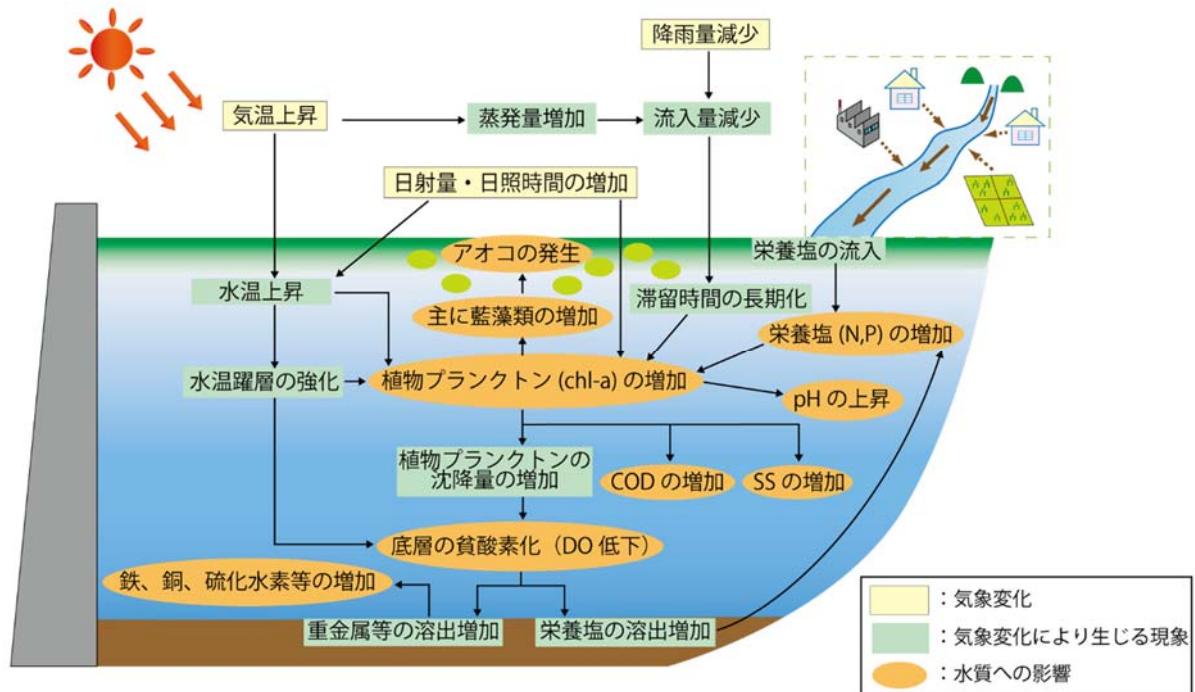
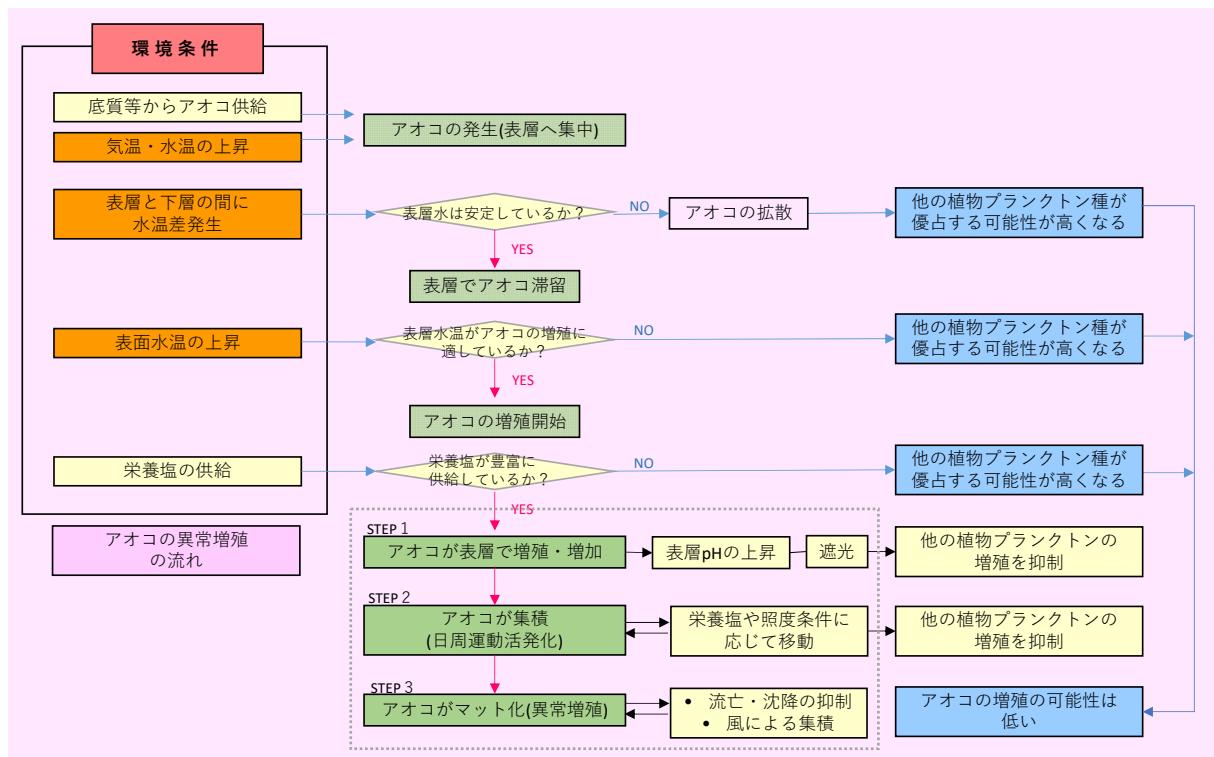


図 6 アオコ発生とそれに伴う水質への影響の仕組み



※このフローはアオコの増殖過程を示しています。気温・水温や栄養塩類といった環境条件によってアオコは増殖し、照度や風による影響を受けて、さらに増殖・集積します。また、異常増殖して厚いマット状（層状）になったアオコが湖面を覆うと、景観・悪臭等の問題が深刻になります。アオコの増殖により、他の植物プランクトンの増殖は抑制されます（p. 71～75、見た目アオコ指標レベル参照）。

図 7 アオコの増殖メカニズムと異常増殖に至る環境条件

1.4.2 生物異常発生に伴うかんがいへの影響

富栄養状態のダム貯水池におけるアオコ等の生物異常発生に伴う利水面への影響としては、農業用水基準の超過等のかんがい用水としての水質低下が懸念されるほか、かんがい施設の目詰まり等が発生する可能性もある。

【解説】

既存の調査・研究によると、畑地かんがいへの影響としては、表4、図8に示すとおり、クロロフィルa濃度として16.8μg/L以上で用水での悪臭が報告され、500～1000μg/L以上でかんがい施設の目詰まりが生じたとの実験結果も報告されている。

表4 クロロフィルa濃度からみた畑かんがいへの影響

影響を引き起こす濃度レベル	水質基準許容濃度	影響の内容 () 内は基準値等の設定根拠		調査地	出典※33
		影響概要等	詳細		
16.8μg/L以上		用水に影響	用水に悪臭を感じる ※作物への悪臭の影響は見られない	霞ヶ浦	2
22～24μg/L以上		用水に影響	用水に悪臭を感じる	霞ヶ浦	1
20～30μg/L		収量低下	用水に悪臭を感じる (腐敗したアオコの場合)	霞ヶ浦	3
30μg/L以上		用水に影響	スイカの収量等に微妙に影響	霞ヶ浦	2
83μg/L以上		施設障害	用水が青色に発色する	霞ヶ浦	2
500～1000μg/L以上		用水に影響	かんがい施設の目詰まりを起こす	実験 (霞ヶ浦)	2
9000μg/L以上		用水に影響	用水に悪臭を感じる (生きているアオコの場合)	霞ヶ浦	3
	30～47μg/L以下	(許容限界※1)	(収量と臭気発生を考慮して設定)	霞ヶ浦	2
	40～50μg/L以下	(適性限界値※2)	(作物、散水施設、色、臭気などを考慮して設定)	霞ヶ浦、馬淵川	2

*1 「許容限界」とは、引用した文献において用いられていた、アオコの限界濃度に関与する因子として挙げられる「水色」「臭気」「かんがい施設の目詰まり」「栽培実験(収量等)」のそれぞれの面を許容する閾値を満足する、許容限界濃度についての呼称。

*2 「適正限界値」とは、引用した文献において用いられていた、「作物の品質及び安全性」「栽培環境条件」「作物生産条件」について調査検討を行い、選定された畑地かんがい用水の適正な水質限界値についての略称。

*3 出典：

1. 鈴木光剛「畑地灌漑用水の水質とその適性限界」(平成5,6年度科学研究費補助金研究成果報告書、1995)

2. 鈴木光剛「畑作物の水質環境-食の安全とおいしさを求めて」(社団法人畑地農業振興会、2003)

p35～58, p129～168

3. 鈴木光剛「畑地かんがいの水質管理-その1」(「畑地農業」209号、畑地農業振興会、2001) p9～32

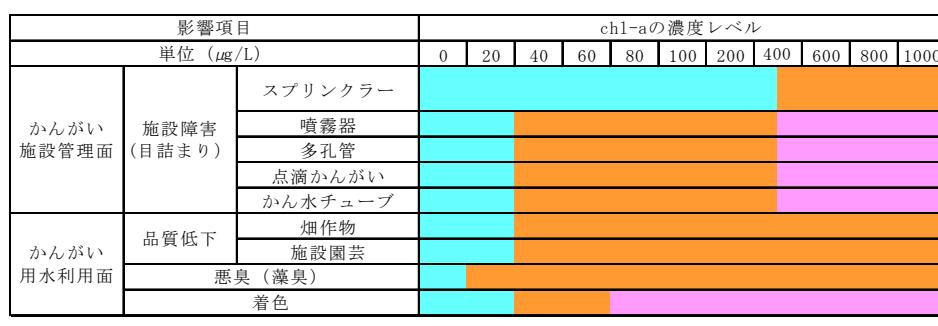


図8 クロロフィルa濃度レベルからみた影響項目との関連(表4から作図)

1.4.3 生物異常発生に伴う悪臭の発生要因

藍藻類や放線菌の一部の種が、悪臭の原因となる物質を生成し、放出することによって、悪臭が発生する。悪臭の原因物質としては、2-メチルイソボルネオール（2-MIB）やジエオスミンがよく知られている。2-MIB等の悪臭は上水道利用のあるダム貯水池でカビ臭ともいわれる。

【解説】

悪臭を発生させる生物として、藍藻類や一部の藻類、植物性鞭毛虫類、放線菌等の菌類などが確認されている。

悪臭は、これらの生物の生体内に含まれている貯蔵物質（主に油様性物質）や、これらの生物が死んで分解されることで放出される物質が原因となって発生する。農産物への着臭は確認されていないが、ハウス等における悪臭が作業環境を悪化させることがある。

近年報告が多い生物と悪臭の原因物質は、フォルミディウムテヌエ（*Phormidium tenue*）やオシラトリアテヌイス（*Oscillatoria tenuis*）、シュードアナベナ（*Pseudanabaena*）などの藍藻類が原因となって発生する 2-メチルイソボルネオール（2-MIB）と、アナベナ属などの藍藻類やストレプトミセスなどの放線菌（*Streptomyces* 属）が原因となって発生するジエオスミンがある。

2-MIBについては、人が異臭と感じる閾値が 5ng/L と言われ、水道水質基準として 10ng/L が設定されている。また、ジエオスミンについては人が異臭と感じる閾値が 10ng/L と言われ、水道水質基準として 10ng/L が設定されている。

なお、2-MIB とフォルミディウムの関係については次頁の参考に示すような知見があり、フォルムミディウムが 100～1000 細胞数/ml を超えると、水道水質基準としている 10ng/L 以上の 2-MIB 濃度が増える傾向にある。

生物異常発生が無くとも悪臭発生する事例が一部のダム等で報告されているが、これは放線菌が原因と考えられている。放線菌は、ダム貯水池内にわずかに存在するだけで悪臭の発生原因になりうるが、その発生の原因は不明な所が多い。

悪臭に関しては、ダム貯留水の使用目的に上水が含まれる場合には、特に注意が必要である。

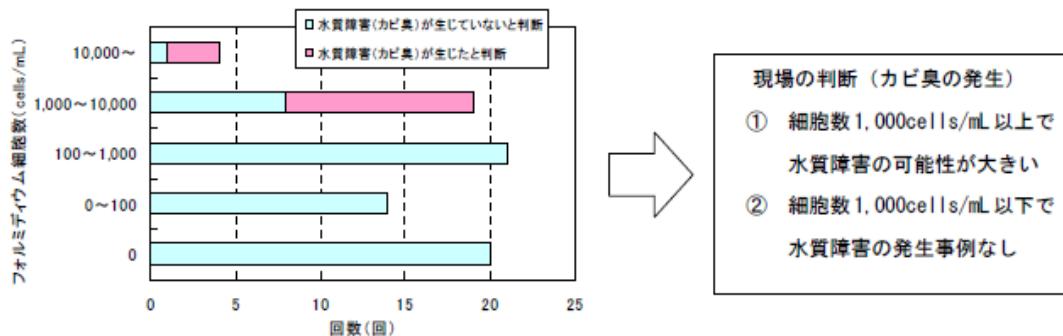
【参考】カビ臭の発生とフォルミディウム属の細胞数との関係

(3) カビ臭の発生とフォルミディウム属の細胞数との関係

以下に、現場の判断と細胞数の関係を示す。

Phormidium 細胞数が 1,000cells/mL 以下の場合には水質障害の発生はみられなかった。

しかし、Phormidium 細胞数が 1,000cells/mL 以上であると水質障害の発生がみられ、細胞数が 10,000cells/mL 以上では、水質障害と判断されているケースが多い。

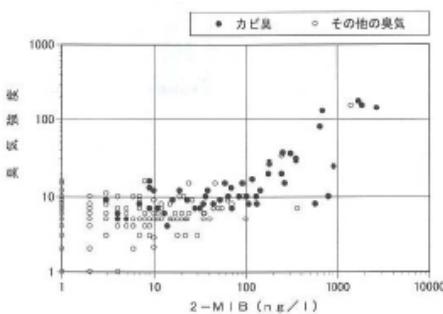


(細胞数の分類：○○より大きい～○○以下)

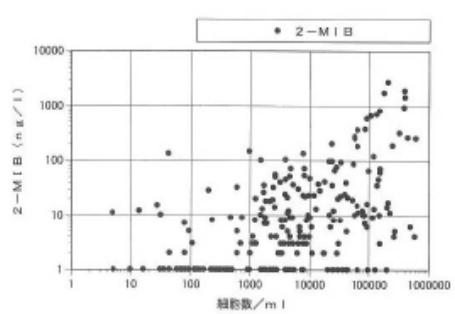
図 4.12.3 Phormidium 細胞数と水質障害（現場の判断）の状況

1. 文献事例でのフォルミディウムとカビ臭の関係

- 2-MIB 濃度が 10ng/l を超えるとカビ臭と認識される頻度が増加する傾向。
- フォルミディウムが 100~1000 細胞/ml を超えると、10ng/l 以上の 2-MIB 濃度が増える傾向。



臭気強度と 2-MIB 濃度の関係



2-MIB 濃度とフォルミディウム発生量の関係

出典：工藤勝弘・河上智行・山田正：ダム貯水池におけるフォルミディウムとカビ臭、水文・水資源学会誌、Vol.17、No.4、pp.331-342、2004

2. 水道法に基づく水質基準

- 2-MIB 濃度が 10ng/mL 以下

出典：国土交通省河川局河川課「曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル案」(国土交通省、平成 17 年 10 月)

1.5 富栄養状態に至りやすいダム貯水池の特性

富栄養状態に至りやすいダム貯水池の特性は、滞留時間が長い、表層水温が温まりやすい、流域からの栄養塩類の流入量が多い等が挙げられる。

【解説】

富栄養状態に至りやすいダム貯水池の特性は、表 5 に示すとおりである。

滞留時間が長くなるという水理条件、高い表層水温等の水温条件によるものや、湖底への有機物の堆積等の底質条件によるものほか、畜産業・工場・農地等の流域からの排出負荷が多い等の栄養塩類条件によるものもあり、流域の経済活動自体やその変化が富栄養状態に至る引き金となる場合がある。

このため、このような特徴があると考えられた場合には、富栄養状態に移行するのを防止するような対応を検討して実施する。

表 5 富栄養化現象が発生しやすいダム貯水池の特性

条件	ダム貯水池の特性	備考 (藻類異常増殖 (アオコ発生) 条件)
水理	<ul style="list-style-type: none"> 滞留時間が長い。 (ダム貯水池で 5 日間程度以上¹⁾) 流入水の大規模な出水頻度が少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> 滞留時間が長いと、藍藻類がダム貯水池の外へ流出しにくいため、アオコが発生しやすい
水温	<ul style="list-style-type: none"> 貯水施設に日陰がなく、表層水温が温まりやすい。 初夏から初秋にかけて、貯水施設内の表層と下層の間に水温 (密度) 差による層 (水温躍層) が生じやすい (これにより上下層の水交換が進まないため表層が高水温になりやすい)。 	<ul style="list-style-type: none"> 藻類は高水温 (25°C 程度) を好む種が多く、光が届く表層水温が高温になることで藻類が増殖しやすく、アオコが発生しやすい
栄養塩類 (窒素・ リン濃度、 N/P 比)	<ul style="list-style-type: none"> 流域からの栄養塩類の流入量が多い。(特にリンの濃度) 畑・樹園地の施肥が多い。 代かき、田植え時期の水田からの排水の流入が多い。 生活排水、畜産排水の流入が多い。 N/P 比²⁾が 7~10 程度になっている。 * 湖沼・ダム貯水池の水中における全窒素 (T-N) と全リン (T-P) の濃度の比率。 	<ul style="list-style-type: none"> 藻類の栄養となる窒素、リンが豊富にあると藻類が増殖し、アオコが発生しやすい。 藻類は、一般に N/P 比 7~10 程度のとき増殖しやすい²⁾。
底質	<ul style="list-style-type: none"> 底質がヘドロ化等により、悪化している。 建設年度が古い (堆積している有機物が多い)、または長期間浚渫を実施していない。 底層の溶存酸素 (DO) 濃度が低い (リンの溶出を促進する)。 	<ul style="list-style-type: none"> 湖底からの栄養塩類の供給が多いと、藻類の増殖が促進される。 アオコの原因藻類は、水温が低下すると湖底に沈降し、越冬するため、これが底質に多く蓄積されていると、アオコが発生しやすい。

*1: 井芹 寧「ダム貯水池における淡水赤潮とアオコの発生機構および対策について」(「九州技法」

第 23 号、(一社)九州地方計画協会、1998)

*2: 岩佐義朗編著「湖沼工学」(山海堂、1990)p. 275

1.6 物理・水環境と発生種の特性

生物異常発生や悪臭の発生を左右する物理・水環境の要因として、水温(季節変化と日変化、水温成層の発達など)、光(日照時間、水中照度、透明度)、水質(栄養塩類、pHなど)、水の動き(鉛直混合、湖内流動)などが挙げられ、発生種ごとにその適性が異なる。

【解説】

生物異常発生の代表的な例であるアオコについては、表 6 に示すとおり気象条件や水理条件、水温・水質条件などが一定の要件を満たすと発生しやすくなることが知られている。さらに、これらの要件は発生種ごとに異なり、アオコ原因藻類の一つであるミクロキスティスは、表 7 に示すとおり他の種類より高水温(25°C以上)、強日照を好み、また窒素が多い水質を好む等の特性を有する。

また、悪臭については、原因藻類であるフォルミディウムテヌエやオシラトリアテヌイスは、過去の発生事例から水温が 15~30°C、窒素が十分に存在し、日射が差し込む状態のときに悪臭の原因物質を放出している。

表 6 アオコが発生しやすい条件

条件	内容
気象条件	<ul style="list-style-type: none"> 日平均気温が25°Cを超えると予測される。 今後ある程度の期間、ダム貯水内の攪乱・混合を引き起こすような降水量が見込めないと予測される。 <p>※ダム貯水池によってこの現象が起きる条件が異なるため、定量的な基準を提示することが難しいことから、ダム貯水池ごとに流動特性から判断する必要がある。一方、降水量は流域から流入負荷量にも影響するため、降雨強度にも留意が必要である。</p>
水理条件	<ul style="list-style-type: none"> 少雨・渇水傾向で流入水量が減少し、水位が低くなっている。 貯水施設内の水が停滞している。 <p>※滞留時間が5日を超えるとアオコ発生が懸念される。</p>
水温・水質条件	<ul style="list-style-type: none"> 窒素、リン濃度が共に十分高い。 水温が一定の基準*を超えると予測される。 <p>※水温20~25°Cでアオコが発生し、25°Cを超えると大増殖が懸念される。</p> <ul style="list-style-type: none"> 表層と下層の水温差が大きくなり、水温成層が発達している。 クロロフィルa濃度が一定の基準*を超過した。 <p>※クロロフィルa濃度20μg/L程度で、水中にアオコの微小群体が散らばって浮遊している状態とされている。</p>

出典: 花里孝幸「地球温暖化と湖のプランクトン群集」(「陸水学雑誌」61巻1号、2000)

OECD「Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control」(OECD、1982)

田中賢之介 他「湖山池の水質変動に及ぼす気象要因の影響」(鳥取県衛生研究所)

琵琶湖河川事務所「アオコの発生についてQ&A」

水資源開発公団試験所「貯水池の水質」(昭和61年5月)

表 7 アオコ原因藻類の生態学的特徴

水質障害		アオコ	アオコ・カビ臭		
原因藻類	属名	ミクロキスティス属	アナベナ属		アファニゾメノン属
		Microcystis aeruginosa Microcystis wesenbergii Microcystis ichthyoblae	螺旋型	直鎖型	
	写真				
生物学的特徴	鉛直分布	ガス胞による浮力により表層に集積し、表水面を膜状に覆う。	ガス胞による浮力により表層に集積するが、膜状になるのは稀。	ガス胞による浮力により表層に集積するが、スカム状にはならない。	
	最適水温	25°C	23°C	23°C(但し、8°C以上で増殖できる)	
	pH	8以上			
	光要求性	高い	やや低い	低い	やや高い
	栄養塩	DIN濃度0.1mg/L以上、TN:TP比22~29で優占	異質細胞により窒素制限を受けない TN:TP比22以下で優占	異質細胞により窒素制限を受けない 比較的リン制限に強い TN:TP比22以下で優占	
	備考	Microcystis aeruginosaは藍藻毒素microcystinを生成することが多い。	かび臭物質geosminを生成する。		

注) 日本では microcystin による影響は確認できていない。

出典: 四国地方整備局松山河川国道事務所「第2回石手川ダム水質検討委員会説明資料」(平成27年10月)



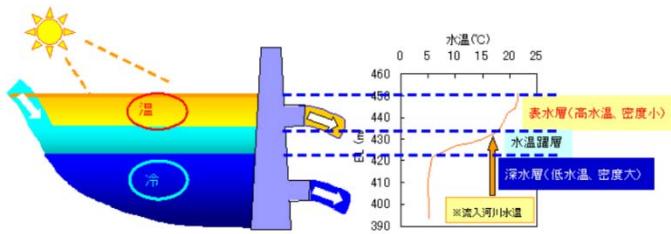
◆夏期停滞期の夏のダム貯水池水温は、水温成層が発達し3層に分かれる

表水層：水深5～7m程度までの高水温の層。風による攪拌や気温の日変化に伴う対流で混合されるので層内はほぼ等温になる。

変水層：表水層の下に続く鉛直混合の及ばない層。

上からの熱伝導で水温は徐々に上昇するものの、受ける熱量は深層ほど少ないため、水深を増すにつれて水温が急降下する。上下の温度差が最大となる層を「水温躍層」という。

深水層：変水層の下に続く最深層。上からの熱が伝わりにくいで夏も低温(多くの場合15°C以下、極端な場合は4°C)を保つ。

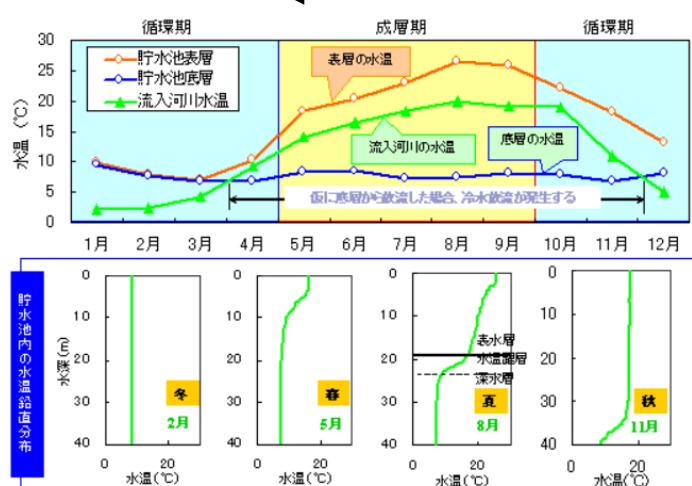


図① 夏期停滞期の夏のダム貯水池水温

◆ダム貯水池内の水温鉛直分布は季節や出水により変化する

春に太陽の輻射により表面から水温が上昇し、夏にかけ表面の水温がさらに上昇する。風や気温変化により表層がある程度混合した表水層となるが、下層とは徐々にしか混合しないため水温躍層が形成され、深水層は水温が低いままとなる。秋には表層から大気中に熱が放出されるため、表層の水温低下とともに表層の密度が上昇し自然対流による鉛直混合が発生する。このため、混合層を拡大しながら水温が低下していく。そして、冬には下層まで完全混合となつたまま全体として水温が低下していく。年間の水温が4°Cを挟んで上下する温帶のダム貯水池や湖では、対流で水が鉛直に混合される時期(循環期)と水が停滞する時期(停滞期)が交互に発生する。

→冬季停滞期→春季循環期→夏季停滞期→秋季循環期→



図② ダム貯水池水温の季節変化の例

出典：水源地ネット「ダム貯水池の水質問題」<http://dam-net.jp/backnumber/011/contents/gijyutsu.html>
茨木県霞ヶ浦環境科学センター「霞ヶ浦への招待 ファイル8：湖の水温」
https://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/seikatsukankyo/kasumigauraesc/04_kenkyu/introduction/documents/08.pdfより作成