

第3章 供用段階(ダム完成後)における富栄養化現象のモニタリング、要因解析及び対策

3.1 富栄養化現象への対応の流れ

富栄養化現象への対応には、「日常的な対応」「発生する可能性の高い時期の対応」「発生時の対応」「発生後の対応」の大きく4つの段階があり、各段階に応じて適切な対応を行う。

【解説】

ダム管理者は、ダム貯水池について日常的かつ継続的に観察・確認を行い、必要に応じて水質調査を実施することで、ダム貯水池の水質を把握することが重要である。こうした「日常的な対応」を行うことにより、ダム貯水池がダム供用直後の貧栄養状態*から富栄養状態へと移行し、富栄養化現象が発生した場合にも迅速で適切な対応が可能となる。

また、こうした「日常的な対応」に加え、既に富栄養状態となったダム貯水池やダム供用時の段階から富栄養化することが予測されていたダム貯水池の場合には、夏季等の富栄養化現象が「発生する可能性の高い時期の対応」「発生時の対応」「発生後の対応」も必要となる。これらの対応を行う場合は、必要に応じてダム管理者が、行政機関と連携してモニタリング計画の見直しや詳細な水質調査、対策の検討等を行うこととなる。

富栄養化現象の顕著な例であるアオコを対象とした対応について、「日常的な対応」～「発生後の対応」までの考え方をフロー図として整理すると、図23のとおりである。すなわち、「日常的な対応」により『アオコ発生の兆しを発見』し、「発生する可能性の高い時期」には『アオコの発生をいち早く察知』するための対応を行う。「発生時」には『できるだけ被害を発生・拡大させない』ために、発生状況の把握と発生要因の究明や解析を行い、水質改善対策の検討等を行う。「発生後」には、『次の発生時の対応を万全なものとするため』の検証・評価を行い、この結果を次回の対応に反映させるように取り組む。

*：供用直後の貧栄養状態：供用直後は貧栄養状態の場合が多いが、ダム貯水池となった土地からの栄養塩類の溶出によりダム貯水池が一時的に富栄養状態となる場合がある。これは、湛水初期の富栄養化といわれる現象である。

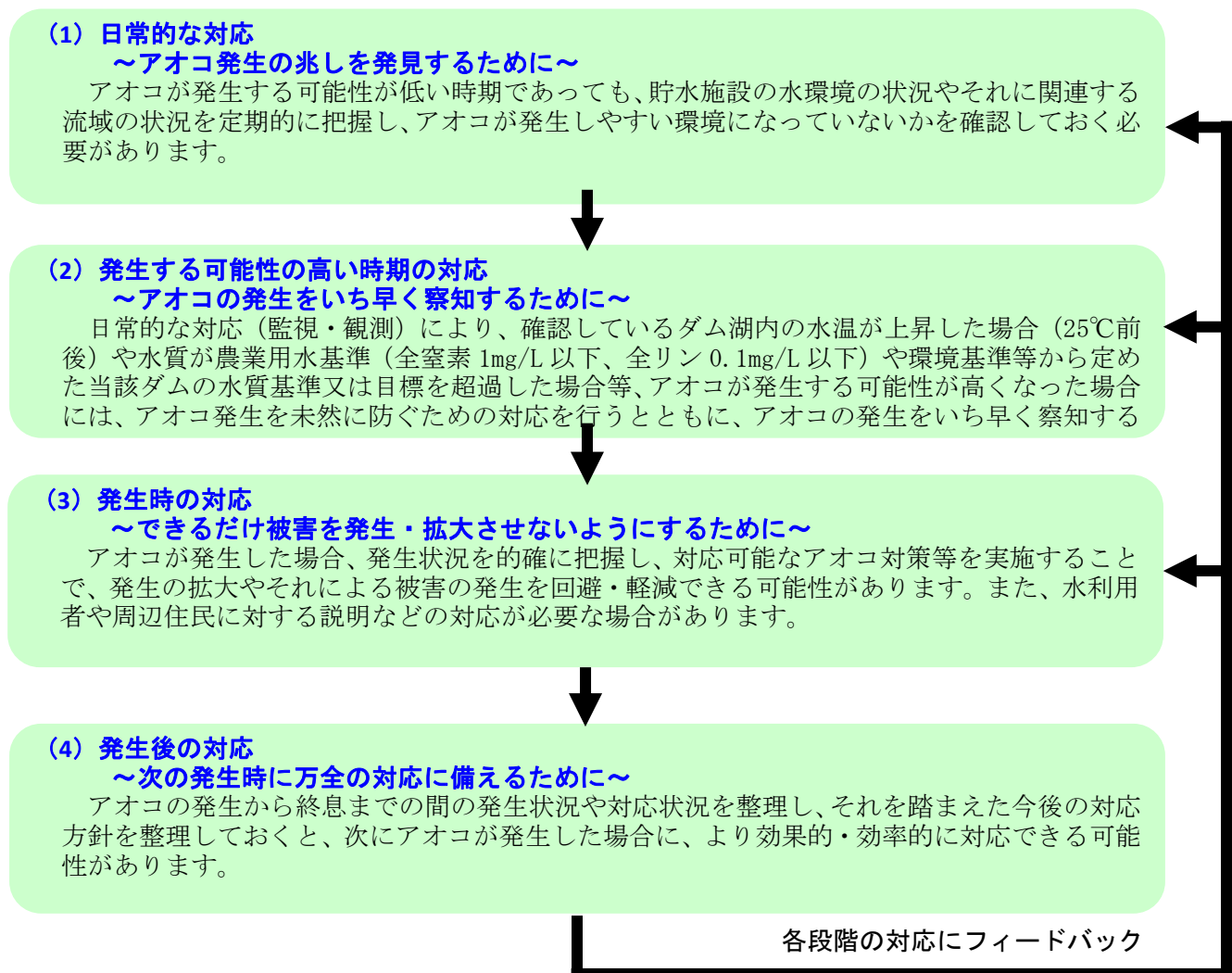


図 23 富栄養化現象への対応の流れ（アオコを例に）

3.2 影響面からの対策の必要性の判断

富栄養化現象が発生した場合には、発生源や発生状況の把握、原因物質の特定を行いつつ、特に影響範囲や程度について十分な状況把握を行い、対策の必要性・緊急性を検討して各種対応策の実施を判断する。

【解説】

富栄養化現象が発生した場合には、まず発生場所・面積・原因物質の状況を把握するとともに、利害者や地域社会に及ぼす影響の程度について、十分な状況把握を行い対策の必要性の可否等について、的確な判断を行う。

富栄養化現象による影響の程度や対策の内容はダム貯水池によって異なるが、富栄養化現象の顕著な例であるアオコの場合、表 20 に示す「アオコ発生による影響を受けやすいダム貯水池の特性」に当てはまる場合や、畑地かんがい等に影響が生じる可能性が高いクロロフィル a 濃度（P. 71 図 25 参照）が確認された場合などは影響の程度が大きくなることが懸念され、対策の必要性が高いと捉えることができる。

このような場合には、詳細な原因解明を待たずに可能な対策を早急に行うことが求められる場合もある。

一方、富栄養化現象が継続することが想定され、緊急対応だけでなく恒常的な対策が必要と考えられる場合には、発生要因の検討を行い、要因に適した対策を検討して実施することとなる。（詳細は 3.3.3 参照）なお、アオコが発生した場合に影響を受けやすいと考えられるダム貯水池の特性は、表 20 のとおりである。

表 20 アオコ発生による影響を受けやすいダム貯水池の特性

項目	影響を受けやすいダム貯水池の特性
水利用用途	・受益地の農業用水の全て、または大部分が当該ダム貯水池の水のみでまかなわれている。 ・多孔管やかん水チューブなどの目詰まりしやすいかん水装置を使ってかんがいしている圃場が多い。 ・当該ダム貯水池の水が、葉菜類や観葉植物のかん水に利用されている。 ・当該ダム貯水池の水が水道水の水源にもなっている。
周辺環境等	・当該ダム貯水池が人家の近くにある。 ・当該ダム貯水池周辺に公園やレジャー施設がある。 ・アオコの発生しやすい夏～秋にダム貯水池を利用したイベントがある。 ・当該ダム貯水池、またはその近隣下流域で漁業が行われている。 ・当該ダム貯水池の下流域で親水利用されている。
水質改善施設等	・水質保全設備が設置されていない、または設置されているが効果を発揮していない。 ・取水口が表層の位置にしかない。 ・選択取水設備が設置されていない。

3.3 各段階での対応

富栄養化現象への対応としては、ダムの供用開始段階では貧栄養、中栄養であっても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により、中長期的に富栄養に至ることが多い。このことから、水質及び富栄養化現象発生に影響する環境条件などを日常的に把握し、現象が発生する可能性が高い時期、現象の発生時、現象の発生後の各段階に応じて適切な対応を行う。

【解説】

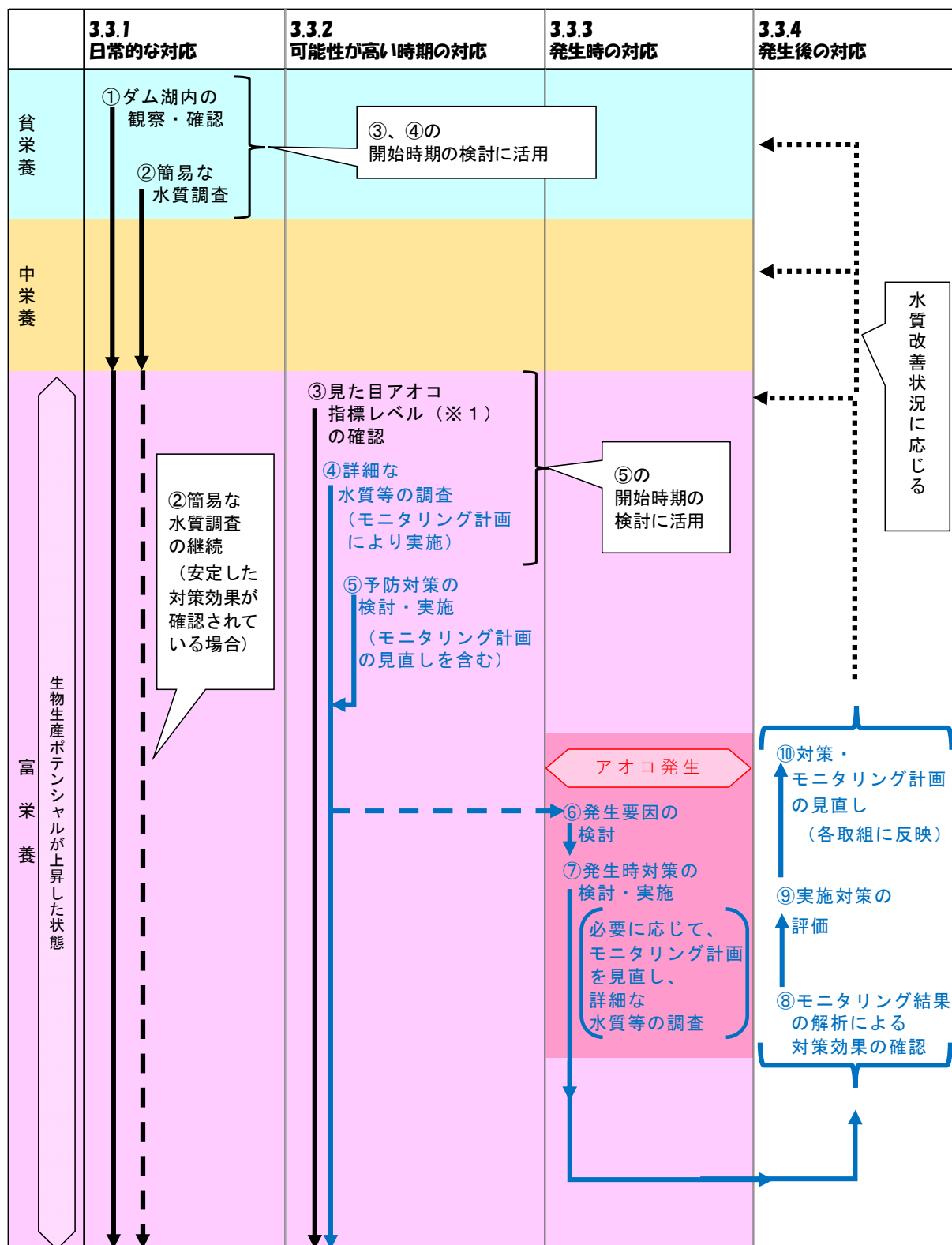
ダム管理者は、ダム貯水池において富栄養化現象発生の兆しを発見するために日常的かつ継続的にダム貯水池の状況を観察・確認するなどの対応を行う。富栄養化現象が発生しやすい時期には対応を強化し、例えばアオコが発生した際には、既に表示したとおり図 23 のフローに基づいて対策内容の検討・実施や効果確認等を行い、各段階で適切な水質が維持されるよう努める必要がある。

ここでは、

- 1) 富栄養化レベルが貧栄養・中栄養レベルの際に行う、「ダム貯水池内の観察・確認」、「簡易な水質調査」を継続的に行う『日常的な対応』
- 2) 富栄養状態に至ったダム貯水池内でのアオコレベルの確認、詳細な水質などの調査（モニタリング計画がある場合にはそれに沿った調査）、予防対策の検討実施を行う『発生する可能性が高い時期の対応』
- 3) アオコ発生が確認された場合には、発生要因の解析や対策の検討・実施、モニタリング計画の見直しを実施する『発生時の対応』
- 4) 発生中のモニタリング結果の解析による対策効果の確認、実施した対策の評価、対策・モニタリング計画の見直しが行われる『発生後の対応』

の4つの段階に分けて整理した。

これら各段階で取り組む具体的な対応のイメージは、図 24 に示すとおりである。



- ※1 アオコの状況を目視による確認で判断できるように、国立環境研究所が開発した指標(p71~73参照)
- ※2 ダム管理者が主に行う対応は、図中、黒文字、黒矢印
- ※3 ダム管理者が、行政機関(国、県、市町村)と連携して行う事が望ましい対応は、図中の青文字、青矢印

図24 各段階で取り組む具体的な対応のイメージ

3.3.1 日常的な対応

ダム貯水池の水利用状況や流域の状況等を定期的に把握し、ダム貯水池がアオコの発生しやすい状態に変化していないかを確認する。また、ダム貯水池の水質のうち、簡易的に測定できる項目について定期的に監視し、例えば水色の変化や透明度の低下の把握によって、富栄養化現象の発生の兆しを早期に発見する。

【解説】

富栄養化現象が発生する可能性が低い時期であっても、水の利用状況や流域の状況、ダム貯水池の水環境を定期的に把握し、それらの状況がアオコの発生しやすい環境に変化していないかを確認しておく必要がある。

(1) 水利用状況、土地利用等の状況確認

富栄養化現象が発生した場合の影響やダム貯水池の水環境への影響を考えると、現象が発生する可能性を早期に把握した方が良いため、ダム貯水池の水の利用状況や流域の土地利用等の状況を定期的に把握しておくことが大切である。表 21 に把握しておくべき内容について整理した。

ダム貯水池の種類・規模、管理体制や立地条件などに応じて可能な対応とその頻度は異なるが、定期的な巡回は、基本的な対応として取り組むことが大切である。また、現象発生と関係が深い今後の天気や降雨の予報についても情報収集を行い、ダム貯水池を取巻く流域や気象状況等の諸条件が藻類の発生しやすい条件になっていないかを確認することが必要である。

表 21 日常的な対応：水利用状況、土地利用等の状況確認

項目	内容						
定期巡回	富栄養化現象が発生した場合には水利用者に影響が生じる可能性があるため、ダム貯水池の水利用状況について定期的に把握する。 【把握方法】 ・巡回、受益者等への聞き取り (あらかじめ聞き取り対象者を決めておくと効率的) 【ポイント】 ・農業利用以外（上水、工業用水等）も含めた水利用状況 ・農業利用では、利用作物やかんがい方法、当該ダム貯水池への依存割合 ・ダム貯水池周辺での親水利用の状況、イベント等がある場合はその予定						
流域の状況	流入水の水質は、流域内の発生負荷に大きく左右される。流域内の発生負荷は、流域内の土地利用、営農状況、法人格の農業法人の状況、並びに家畜排せつ物処理の状況に大きく影響されることから、これらの状況を定期的に把握する必要がある。 【把握方法】 ・巡回、住民・農家への聞き取り (あらかじめ聞き取り対象者を決めておくと効率的) ・把握した流域の土地利用や変化状況に基づく流域内の発生負荷の変化状況を迅速に把握し対応するためには、GIS による流域データベース整備と巡回等により得られたデータの更新が有用である。 【ポイント】 ・開発等による土地利用の変化はないか ・宅地、事業場等から汚濁水の流入がないか ・農地ではどのような作物が栽培されているか						
気象予報	今後の気温の推移や降雨の予想などについて短期的・中長期的な気象予測に関する情報を把握する。 【気象予報の種類】 ・毎日の天気予報、週間予報の他、長期的な予報として、以下のようなものがあり、インターネット等で入手可能。 長期予報の種類・発表日時： <table border="1"> <tr> <td>1 か月予報</td><td>毎週木曜日 14 時 30 分</td></tr> <tr> <td>3 か月予報</td><td>毎月 25 日頃 14 時</td></tr> <tr> <td>暖候期予報※</td><td>2 月 25 日頃 14 時</td></tr> </table> ※2 月に発表される 6～8 月の季節予報 発表内容：平均気温、降水量、日照時間、降雪量（冬季のみ） 情報入手先：気象庁 WEB サイト（防災気象情報－季節予報） http://www.jma.go.jp/jp/longfcst/	1 か月予報	毎週木曜日 14 時 30 分	3 か月予報	毎月 25 日頃 14 時	暖候期予報※	2 月 25 日頃 14 時
1 か月予報	毎週木曜日 14 時 30 分						
3 か月予報	毎月 25 日頃 14 時						
暖候期予報※	2 月 25 日頃 14 時						

(2) ダム貯水池の水質状況等の確認

富栄養化現象の発生の兆しを早期に発見するためには、日頃からダム貯水池の水質の状況を定期的に観察・確認し、水質状況等を観測することが必要である。

表 22 にダム貯水池の監視・観測すべき具体的な調査概要について整理した。

ダム貯水池の種類・規模、管理体制やダム貯水池の立地条件などに応じて可能な対応は異なるが、水面の監視と水温測定は、基本的な対応として取り組むことが大切である。

表 22(1) 日常的な対応：ダム貯水池の水質状況等の確認

項目	内容
基本的な考え方	日常的にダム貯水池の状況を観察・確認し、変化の兆しを早期に発見するためには、調査の継続が重要である。そのためには、効率的で経済的な簡易な方法による観測が有用である。 一方、富栄養化現象が発生した場合の対応にも利用可能な観測値の蓄積も必要である。 こうしたことから、日常的には効率的で経済的な簡易な水質調査（目視や簡易水質検査キット等）を継続実施し、年 1 回程度は公定法[*]による調査を行うことが望ましい。
ダム貯水池の水面状況	ダム貯水池の水面の状況について<u>週 1 回程度の頻度</u>で監視する。 【監視方法】 ・目視、写真撮影 【ポイント】 ・濁水や汚濁水の流入等による水の色の変化やプランクトンの増殖による水の色の変化 ・降雨や受益地での水利用による水位の変化 ・水は滞留していないか ・流木などの浮遊、溜まり状況（アオコが発生した場合に集積する場所となる可能性の事前把握）
ダム貯水池の水温、透明度、簡易な水質測定	植物プランクトンの増殖に関係が深いダム貯水池の水温について<u>週 1 回程度の頻度</u>で測定する。同一地点において、透明度の測定や簡易な水質測定を行う。 【観測方法】 ・水温：水温計による測定 ・透明度：透明度板による測定 ・簡易な水質測定項目と方法：簡易水質検査キット（COD（低濃度）、アンモニア態窒素[*]、硝酸態窒素、オルトリン酸態リン[*]、pH、電気伝導率などを簡易に測定できる水質テスター機器や、バックテスト[®]等） 【ポイント】 ・原則として、同一時間・同一地点で測定を継続する。 ・代表点として湖心部または最深部の測定を行い、さらに湖形状などに応じて上流部やアオコの発生しやすい箇所等の測定を追加する。 ※湖心部または最深部での測定が困難な場合は、陸上から測定できる地点で定点観測を行う。 ・水温：観測水深は表層（水深 0.5m 程度）とする（さらに、下層の水温も観測することで、水温躍層の形成を把握することができる）。 ・水が動きにくい入り込んだ場所は水温が高い可能性があるため注意が必要。日頃の測定により、どの場所がどの程度水温が高いかを把握しておく。 ・透明度：水温観測地点で測定する。 ・簡易な水質測定項目：水温観測地点で測定するか、ポリビンに採水し陸上に戻ってから測定する。観測水深は表層（水深 0.5m 程度）。

注）※：バックテスト[®]では、「アンモニア態窒素」は「アンモニウム態窒素」、「リン酸態リン」は「りん酸態りん（低濃度）」の表記となっています。

表 22(2) 日常的な対応：ダム貯水池の水質状況等の確認

項目	内容												
以下は、可能な範囲で実施しておく、より望ましい。													
ダム貯水池の公定法による水質測定	富栄養化現象の発生予防、発生時の原因特定および対策の検討のために、定期的にダム貯水池の水質状態を把握する。												
	貧栄養状態の場合は年1回夏季、富栄養状態の場合安定した対策効果が確認されている場合は月1回～年4回四季程度。												
	富栄養化現象との関連から見た主な観測項目は以下のとおりであるが、予算的難しい場合には最低限CODは測定する。												
	<table><tr><th>項目</th><th>測定意義</th></tr><tr><td>クロロフィル a (Chl-a)</td><td>アオコを形成する植物プランクトンの指標。アオコの発生程度を把握する上で役に立つ。</td></tr><tr><td>窒素 (T-N等) リン (T-P等)</td><td>水の富栄養化の指標。これらは植物プランクトンの栄養源となるので増殖の可能性を把握する上で役に立つ。</td></tr><tr><td>SSまたは濁度</td><td>水の濁り・透明度の指標。植物プランクトンの発生程度を把握する上で役に立つ。</td></tr><tr><td>COD</td><td>水の有機汚濁の指標。植物プランクトンの発生程度を把握する上で役に立つ。</td></tr><tr><td>pH</td><td>酸性・アルカリ性の度合の指標。植物プランクトンが多いと光合成を行う日中に pH が上昇する (CO₂の消費による)。</td></tr></table>	項目	測定意義	クロロフィル a (Chl-a)	アオコを形成する植物プランクトンの指標。アオコの発生程度を把握する上で役に立つ。	窒素 (T-N等) リン (T-P等)	水の富栄養化の指標。これらは植物プランクトンの栄養源となるので増殖の可能性を把握する上で役に立つ。	SSまたは濁度	水の濁り・透明度の指標。植物プランクトンの発生程度を把握する上で役に立つ。	COD	水の有機汚濁の指標。植物プランクトンの発生程度を把握する上で役に立つ。	pH	酸性・アルカリ性の度合の指標。植物プランクトンが多いと光合成を行う日中に pH が上昇する (CO ₂ の消費による)。
	項目	測定意義											
	クロロフィル a (Chl-a)	アオコを形成する植物プランクトンの指標。アオコの発生程度を把握する上で役に立つ。											
	窒素 (T-N等) リン (T-P等)	水の富栄養化の指標。これらは植物プランクトンの栄養源となるので増殖の可能性を把握する上で役に立つ。											
	SSまたは濁度	水の濁り・透明度の指標。植物プランクトンの発生程度を把握する上で役に立つ。											
	COD	水の有機汚濁の指標。植物プランクトンの発生程度を把握する上で役に立つ。											
	pH	酸性・アルカリ性の度合の指標。植物プランクトンが多いと光合成を行う日中に pH が上昇する (CO ₂ の消費による)。											
【観測方法】													
・公定法※による測定													
【ポイント】													
・原則として、同一時間帯・同一地点での測定を継続する。													
・代表点として湖心部または最深部の測定を行い、湖形状などに応じて上流部やアオコの発生しやすい箇所の測定を追加する。													
※湖心部または最深部での測定が困難な場合は、陸上から測定できる地点で定点観測を行う													
・観測水深は表層（水深 0.5m 程度）とする。													

※公定法：公定法とは分析化学・微生物培養の分野において成分の定性分析、定量分析、微生物の培養検出を行う際、国際機関、国家若しくはそれに準ずる公定試験機関、研究所において指定された方法であり、当該表で示した COD 等の水質汚濁に係る環境基準項目については、環境省（庁）告示による水質調査に係る測定方法である。

3.3.2 発生する可能性の高い時期の対応

富栄養化現象が発生する可能性が高くなったと考えられる場合には、水面の状況、水温の監視にあわせて、「見た目アオコ指標レベル」(p. 71～75 コラム参照)を用いてその発生状況を把握する。

また、水質改善対策の検討材料とするため、詳細な水質調査を実施するとともに、取組可能な範囲で富栄養化現象の発生を予防する対策に取り組む。

【解説】

日常的な対応(監視・観測)により、確認しているダム湖内の水温が上昇した場合(25℃前後)や水質が農業用水基準(全窒素 1mg/L 以下、全リン 0.1mg/L 以下)や環境基準等から定めた当該ダムの水質基準又は目標を超過した場合等、アオコが発生する可能性が高くなった場合には、アオコの発生状況を把握するとともに、詳細な水質調査を内容とするモニタリング計画を作成し、この計画に基づいた調査を実施するなど、監視・観測を強化し、アオコをできるだけ発生させないための予防対策を講じることが必要である。

(1) アオコレベルの確認

富栄養化現象の早期発見・早期対応を行うためには、平常時よりも監視・観測する内容を強化して、それまでよりも詳細な対応をする必要がある。3.3.1 日常的な対応の中で行っている水面の状況に加えて、簡易水質検査キット等で簡易に測定できる水質項目(水温や濁度等)やアオコレベル(表 23)についても、できるだけ調査頻度を増やして観測することが必要である。コラム(5/5)に、監視・観測した結果の記録様式の例を記載している。

なお、アオコレベルとそのレベルに応じて生じる可能性のある被害・影響等は発生したアオコの種類も関係するが、レベル 2 以上では目視により確認が可能なことから景観的な影響が発生し、レベル 6 のアオコになると腐敗臭が発生するようになる*。

また、参考として表 24 及び図 25 にクロロフィル a 濃度からみた畑地かんがいへの影響を整理した。ここで示している水質濃度による影響の目安は、周辺環境や気象条件等により状況が異なるため、絶対的なものではないことに留意する必要がある。

*：見た目アオコレベル 6 は、湖面をアオコがスカム状に覆っている状態であり、岸際のみにはアオコが堆積している場合は、アオコレベル 6 ではなく、アオコの発生は終了したと考え、現場の状況を調査記録に留め、見た目アオコ指標調査対象としない。

表 23 発生の可能性が高い時期の対応：アオコレベルの概要

項目	内容
アオコレベル	水面の状況、水温の監視にあわせて、アオコレベルを観測する。 アオコは風の影響により容易に移動するため、アオコが集積しやすい場所（ゴミなどがたまりやすい岸辺や水が動きにくい入り込んだ場所）、過去にアオコが発生した場所は注意が必要である。 【監視方法】 ・アオコレベルは『見た目アオコ指標レベル』（詳細は p. 71～75 コラム参照）を用いて評価する。 ・目視による水面の観察のほか、レベル 0～1 については池水を白い柄杓やバットにすくい取って観察し評価する。

表 24 クロロフィル a 濃度からみた畑地かんがいへの影響（p12 の再掲）

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※3
		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	（許容限度※1）	（収量と臭気発生を考慮して設定）	霞ヶ浦	2
	40～50μg/L 以下	（適性限度値※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(1995)「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
2. 鈴木光剛(2003)「畑作物の水質環境-食の安全とおいしさを求めて」(p35～58, p129～168),
社団法人畑地農業振興会
3. 鈴木光剛(2001)「畑地かんがいの水質管理-その 1」, 209 号(p9～32), 畑地農業

影響項目			chl-aの濃度レベル											
単位 (μg/L)			0	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1000	
かんがい 施設管理面	施設障害 (目詰まり)	スプリンクラー												
		噴霧器												
		多孔管												
		点滴かんがい												
		かん水チューブ												
かんがい 用水利用面	品質低下	畑作物												
		施設園芸												
	悪臭（藻臭）													
	着色													

	影響が生じる可能性が高い
	影響が懸念される/要監視レベルである
	問題ないレベルである

図 25 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 24 から作図）



コラム (1/5) : ◆◆◆見た目アオコ指標レベル◆◆◆

◆『見た目アオコ指標レベル』とは◆

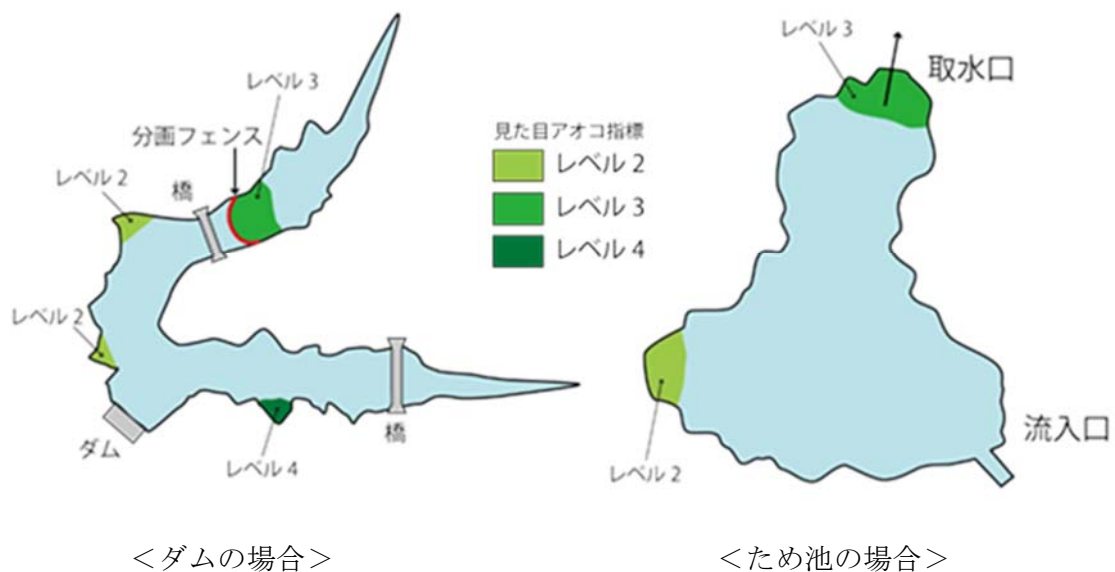
「見た目アオコ指標レベル」は、アオコの状況（程度）を目視による確認で判断できるように、レベル0～レベル6の7段階にレベル化したもので、国立環境研究所で開発された指標です。

「見た目アオコ指標レベル」は、誰でも確認することが可能なため、近年、池やダム貯水池における日頃の調査の中で、アオコの状況を確認する方法として、この「見た目アオコ指標レベル」が利用されています。

ダム貯水池内であっても、周辺環境や地形、風向や風速等の影響により、アオコのレベルは異なるため、多くの場合、同じダム貯水池内であっても複数のレベルが存在することが考えられます。特に、レベル4以上のアオコは、吹き溜まりなど、限定的な場所でみられることが多いため、アオコの状況を観測する際は、見た目アオコ指標レベルとともに、そのアオコレベルが見られた位置も整理します(下図の記録例参照)。

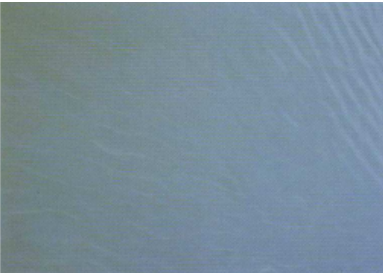
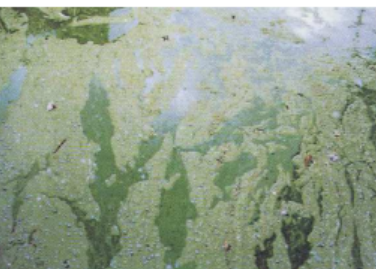
なお、アオコが風によって集積している場所は、調査対象として不適ですので、調査地点としないように注意してください。

◆発生場所とアオコレベル（見た目アオコ指標レベル）の記録例◆





コラム (2/5) ; ◆◆◆見た目アオコレベルの具体例◆◆◆

	
レベル 0 : アオコ発生は確かめられない。	レベル 4 : 膜状にアオコが湖面を覆う。
	
レベル 1 : アオコ発生が肉眼では確認できない。 (ネットで引く、または、白いバットに汲んで良く見ると確認できる)	レベル 5 : 厚くマット状にアオコが湖面を覆う。
	
レベル 2 : うっすらと筋状にアオコの発生が認められる。 (アオコがわずかに水面に散らばり肉眼で確認できる)	レベル 6 : アオコがスカム状 (厚く堆積し、表面が白っぽくなったり、紫・青の縞模様になったりすることもある) に湖面を覆い、腐敗臭がする。
	見た目アオコ指標 湖内で一番集積量の多いところ、多い時間帯でその量を以上のようなレベルで分ける。 霞ヶ浦研究会
レベル 3 : アオコが水の表面全体に広がり、所々パッチ状になっている。	

出典：霞ヶ浦河川事務所「見た目アオコ指標」



コラム (3/5) ; 国立環境研究所「見た目アオコ指標レベル」活用事例

秋田県では、八郎湖の写真を用いて簡略化した『見た目アオコ指標レベル（八郎湖版）』を作成して、アオコ発生から終息までの期間のアオコの状況（発生位置とレベル）を把握しています。

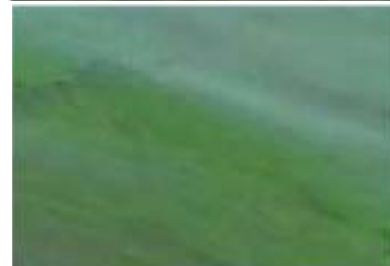
見た目アオコ指標（八郎湖版）

- レベル 0 : 発生は認められない
レベル 1 : 肉眼で確認できない
(ネットを引く、または、白いバットに汲んで良く見ると確認できる)
レベル 2 : うっすらと筋状

- レベル 3 : パッチ



- レベル 4 : 膜状



- レベル 5 : マット状



- レベル 6 : スカム状



※この指標は、国立環境研究所が提唱する見た目アオコ指標を元に作成しました。

出典：秋田県「美の国あきたネット 見た目アオコ指標（八郎湖版）」
<https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/3860>



コラム (4/5) ; ◆◆◆監視・観測の記録様式例◆◆◆

調査者 :
調査日 :

天候 : (前日の天候 :)

No.	調査地点	調査時刻	気温(℃)	水温(℃)	見た目アオコ指標レベル	風向	臭気	水の色	備考
例	取水口付近	10:00	27	23	0	南西	藻臭	緑	

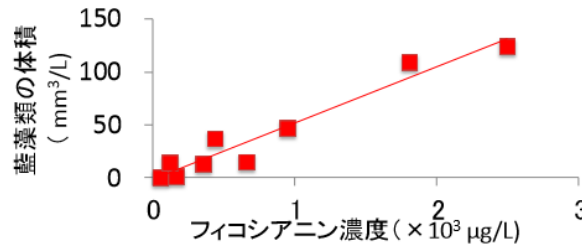




コラム (5/5) ; ◆◆◆もう一つのアオコ現存量の指標「フィコシアニン」◆◆◆

◆アオコ現存量の指標としてのフィコシアニン

代表的なアオコ現存量の定量的な指標として「クロロフィル a 濃度」がありますが、その他の定量的指標として「フィコシアニン濃度」があります。フィコシアニンは、アオコの原因となるミクロキスティスやアナベナなどの藍藻類に含まれている色素で、フィコシアニン濃度と藍藻類の体積（藍藻類の量）の間には相関があることが報告されています※1。



左フィコシアニン、右クロロフィル
(リン酸緩衝液で抽出) (エタノールで抽出)

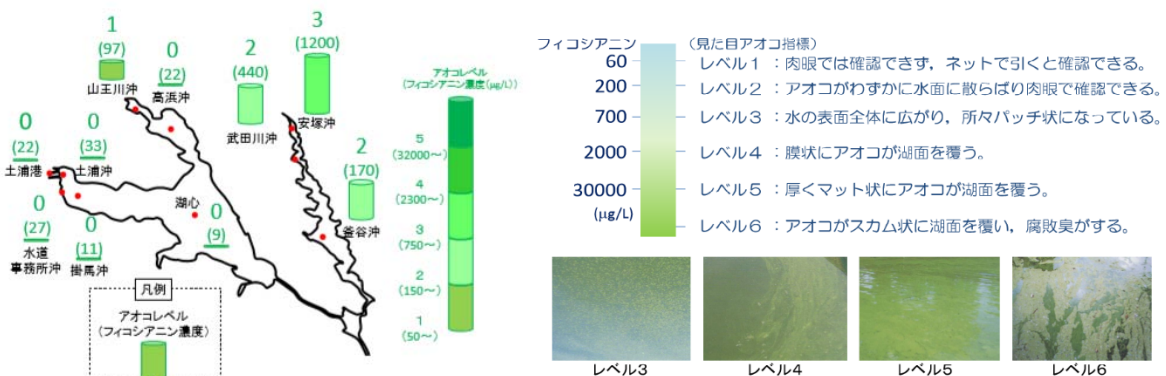
(平成24年6月～8月の霞ヶ浦における調査)

※1：出典：茨城県霞ヶ浦環境科学センター「平成 25 年度における霞ヶ浦のアオコ発生状況とその要因」

https://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/seikatsukankyo/kasumigauraesc/O4_kenkyu/shoukai/seika/H25documents/result_announcement_05.pdf

◆見た目アオコ指標とフィコシアニン濃度によるアオコ現存量の報告

「フィコシアニン濃度」と、アオコ現存量の定性的な指標である「見た目アオコ指標」の 1 ～6 レベルには一定の関係が報告されています※2。霞ヶ浦では、アオコ発生時期にはアオコ情報として、見た目アオコ指標とフィコシアニン濃度の調査結果がアオコ情報として WEB で公表されています※3,4。



<出典※3>

<出典※4>

※2：出典：小日向他「フィコシアニンを指標とした霞ヶ浦のアオコの発生状況と発生要因について」(2012、茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報、No.8)

https://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/seikatsukankyo/kasumigauraesc/O4_kenkyu/shoukai/nenpou/documents/nenpo2012_06.pdf

※3：出典：茨城県霞ヶ浦環境科学センター「平成 30 年度アオコ情報 No.7」(2018)

https://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/seikatsukankyo/kasumigauraesc/O4_kenkyu/aoko/documents/20180727_aoko_07.pdf

※4：出典：茨城県霞ヶ浦環境科学センター「平成 25 年度における 霞ヶ浦のアオコ発生状況とその要因」

https://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/seikatsukankyo/kasumigauraesc/O4_kenkyu/

(2) 詳細な水質等の調査

ダム貯水池が富栄養状態となり、新たな水質改善対策に取り組む必要があると想定される場合には、2.2で示した数値シミュレーションモデルを用いて、新たな環境保全措置の検討を行うため、富栄養化現象の発生の可能性が高い時期から調査を行い、詳細な情報を把握する必要がある。

詳細な水質等の調査は、前述した「日常的な対応」(p66、67の表21、22)に上乗せする調査であり、調査項目は、表25に示した内容を基本とし、異常発生する生物の構成、生物異常発生水域、発生時期、発生期間等を迅速かつ的確に把握する。

なお、この詳細な調査は対策を検討する場合に必要な調査であり、実施した水質改善対策によって安定した効果が確認されている場合には、3.3.1 日常的な対応で示した簡易的な簡易水質検査キット等を用いた調査等により水質等の状況を把握する。

表 25 詳細な水質等の調査概要

項目	内容
調査項目	・水温、pH、DO(溶存酸素量) ・COD、SS(浮遊物質)、T-N(全窒素)、無機態窒素(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸性窒素)、T-P(全リン)、無機態リン(オルトリン酸態リン) ・クロロフィルa ・植物プランクトン ・生物異常発生水域目視記録
調査地点	・水温、pH、DO(溶存酸素量)、COD、SS(浮遊物質)、T-N(全窒素)、無機態窒素(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸性窒素)、T-P(全リン)、無機態リン(オルトリン酸態リン)、クロロフィルa、植物プランクトンについては、原則として環境基準点が設定されている場合はその地点、環境基準点が設定されていない場合は、ダム貯水池水質を代表すると考えられる地点(以下、ダム貯水池基準地点)、及び生物異常発生水域とし、必要に応じて、ダム貯水池内に調査地点を追加(以下、ダム貯水池補助地点)する。 ・生物異常発生水域目視記録については、ダム貯水池全域を対象とする。
調査深度	■水温、pH、DO(溶存酸素量)については、以下を基本とする。 ・ダム貯水池基準地点、生物異常発生箇所及びダム貯水池補助地点において、水面から0.1m、0.5m、1m、以下1m毎の点を原則とするが、深水層において水温等の変化が小さい場合は、その状況に応じて、適切な間隔としてもよい。 ■COD、SS(浮遊物質)、T-N(全窒素)、無機態窒素(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸性窒素)、T-P(全リン)、無機態リン(オルトリン酸態リン)、クロロフィルaについては、以下を基本とする。 ・ダム貯水池基準地点、生物異常発生水域及びダム貯水池補助地点において、表層(水面から0.5mの点)、1/2水深(全水深の1/2の点)、底層(底上1mの点)の3層とする。 ■植物プランクトンについては、以下を基本とする。 ・ダム貯水池基準地点、生物異常発生水域及びダム貯水池補助地点において、表層(水面から0.5mの点)の1層とする。
調査頻度	■水温、pH、DO(溶存酸素量)については、以下を基本とする。 ・<u>原則として春季～秋季1回/週、冬季1回/月。</u> ■COD、SS(浮遊物質)、T-N(全窒素)、無機態窒素(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸性窒素)、T-P(全リン)、無機態リン(オルトリン酸態リン)、クロロフィルa、植物プランクトンについては、以下を基本とする。 ・<u>6月～9月は2回～1回/月を目安とする。</u> ■生物異常発生水域目視記録。 ・<u>原則として1回/日、長期化した場合は1回/週</u>

注)「詳細な水質等の調査」は、「日常的な対応」(p66、67の表21、22)に上乗せする調査の位置づけであるので、調査の立案に当たっては留意されたい。

(3) 予防対策の検討・実施

富栄養化現象の発生を抑制するためには、ダム貯水池内を植物プランクトンが増殖しにくい環境条件にするような取組を検討し、実施する必要がある。例えば、夏季に発生する水温躍層が原因であれば、浅層曝気により水温躍層を破壊することにより、植物プランクトンが増殖しにくい水温環境を創出し、富栄養化現象発生の可能性を低減する方策の検討を行う。

検討においては、(1)、(2)の調査結果から水温躍層による流動抑制、底層の貧酸素化による栄養塩類の溶出等が富栄養化現象発生の要因と想定された場合には、その要因に対して効果が得られるような対策案を選定する。例えば、曝気循環施設等の水質改善設備が設置されているダムでは、富栄養化現象の発生の可能性が高い時期にこれら施設を稼働させることによって、湖内の鉛直方向の流動を促進させ、水温勾配を弱くし、発生を予防することができる。

また、水質改善施設を設置していないダムの場合でも水利用に支障が生じない範囲で、湖内の流動を促進する水位管理を行うことも予防対策となる。

表 26 予防対策

項目	内容
予防対策	・曝気循環施設の稼働、湖内の流動を促進する施設の稼働により植物プランクトンの増殖を抑制する。 ・流入部への分画フェンスの設置によりダム貯水池内の水の動きをコントロールし、ダム貯水池表層への栄養塩類の供給を抑制する。 ・遮光（ネット、シート等）により植物プランクトンの増殖を抑制する。 ・ダム貯水池の水位を下げて滞留時間を短縮することにより植物プランクトンの増殖を抑制する。 （表 14 水質保全対策一覧 参照）

※富栄養化対策手法については、他の対策も含めて、本図書の巻末参考（p. 参考-2～p. 参考-6）に整理している。

3.3.3 発生時の対応

ダム貯水池が富栄養状態となり、アオコ発生が頻繁に発生する等の富栄養化現象の発生が確認された場合には、発生した時期の水質状況から、富栄養化現象の発生要因を検討するとともに、この結果等を踏まえて、富栄養化現象を抑制する対策を検討し実施する。また、対策内容が変更となる場合などにはモニタリング計画の見直しを行う必要がある。

【解説】

富栄養化現象の発生時には、さらなるアオコレベルの上昇や発生範囲の拡大を防止するために、3.3.2による適切な状況把握と対応を継続させるとともに、富栄養化現象が発生した要因を検討し、検討結果やダム貯水池の立地条件、安全性・経済性等を踏まえた上で、水質改善対策を検討・立案し、モニタリング計画を適宜見直す必要がある。なお、計画の見直しに当たっては、IoT技術を利用したアオコの濃度レベル監視システムの研究（参考資料：IoTを利用したアオコ監視システム参照）も進んでいることから、こうした最新の監視システム開発動向も参考にし、低コストでアオコ監視が可能となる計画見直しも有用である。

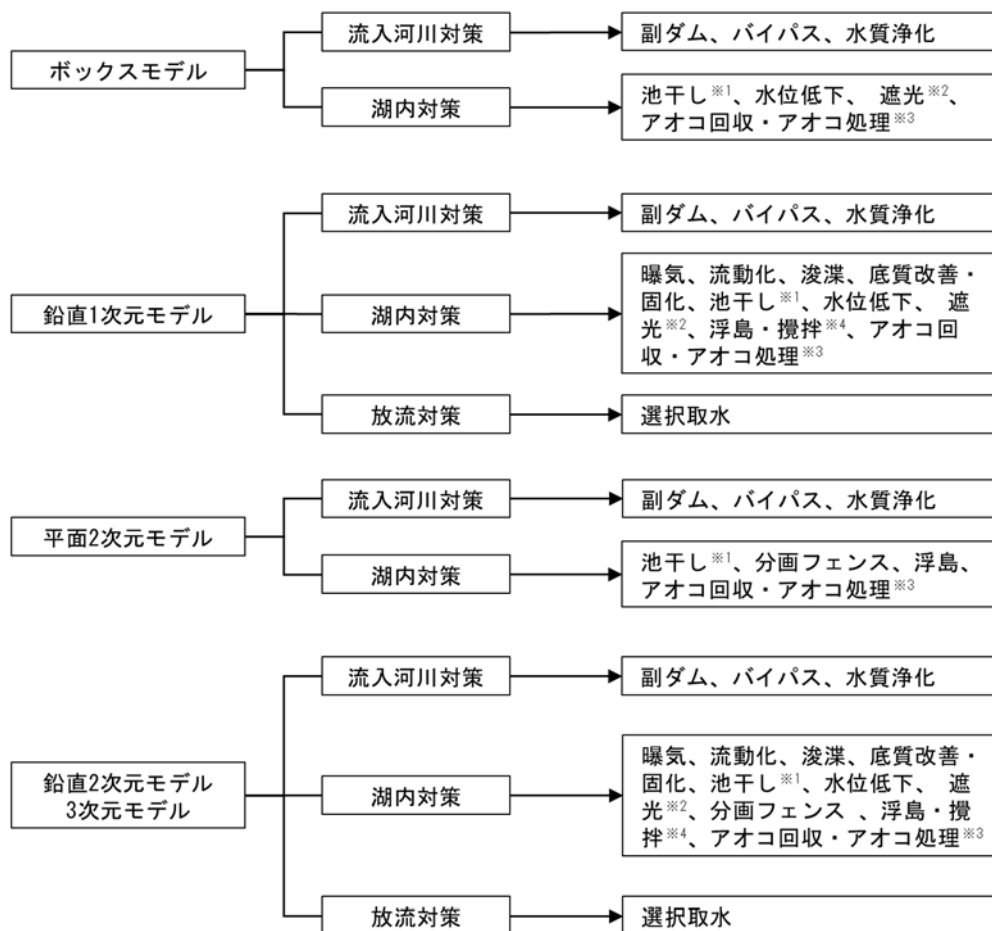
(1) 発生要因の検討

発生した富栄養化現象への対策を検討するためには発生要因を特定し、その要因に応じた対策を行うことが重要となる。

3.3.2(1)(2)で示した各種調査により得られたデータ、3.3.1で日常的に得られているデータ、加えて発生に大きく影響する要因となる日射量、水理面では滞留状況、躍層の発生状況等を踏まえた発生要因の解析・検討を行う必要がある（検討事例1参照）。また、富栄養化現象を起こしている植物プランクトンはそれぞれの種により、増殖しやすい水質や日射量等の条件（至適条件）が異なるため、種を踏まえた検討を行うことが非常に重要である（表27、図27参照）。

検討に当たっては水質予測モデルを利用するとともに、他のダム貯水池事例や文献も参考にしながら行う。水質予測モデルを用いて検討を行う場合には、アセス段階で構築したモデルを参考に検討を行うことが多いが、アセス段階で使用したモデルでは検討を行う対策を表現できないことも想定される（検討事例2,3,4参照）。各モデルが表現できると考えられる対策は、図26(図22の再掲)に示すとおりである。

この検討において予防対策を実施している場合は、この対策効果が反映された調査データとなっていることに留意する必要がある、予防対策を実施していないときの調査データがある場合はこれと比較検討することにより、予防対策効果の検証が可能である。追加対策を検討する際にはこのことに十分に留意する必要がある。



※1：池干しの効果を検討し、モデルに反映する必要がある

※2：全面を遮光する場合は既存モデルでも表現可能、一部遮光を行うためには、モデルの改造が必要

※3：どのモデルでも表現可能であるがモデルの改造が必要

※4：空間的な評価は3次元モデルが必要

図 26 数値シミュレーションモデルと対応する水質保全対策（図 22 の再掲）

表 27 状況変化要因の考察にあたっての指標と参考となる既往知見

指 標		既 往 知 見
物理環境	表層水温 (°C)	・藍藻類は高水温を好む種が多い ・藍藻類の中でもミクロキスティスは高温（20℃以上）を特に好む ・アナベナ、オシラトリア、Phormidium はミクロキスティスよりも低い水温を好む ・Phormidium は 20℃を下回っても発生。Phormidium 属にはアンテナ色素の違いに応じて PC と PE があるが、PE が主体であれば循環期でも出る可能性がある。 ・アフアニゾメノンは、23～29℃で増殖が最適となる。
	水温勾配 (°C/m)	・0.5℃/m を上回ると水質障害が生じるレベルでミクロキスティスが増殖する恐れがある(10000 細胞/mL を超える可能性がある)。 ・ミクロキスティスは湖水が混合していると増殖できなかったが、アナベナは物理的な攪乱には比較的強いと考えられる。
	流入量、放流量 (回転率) (回/月)	・降雨が少なく、流動が落ち着き静穏な時期にアナベナが増殖。
水質環境	T-N (mg/L)	・0.03mg/L がアオコの発生限界
	T-P (mg/L)	・0.003mg/L がアオコの発生限界
	DIN (μg/L)	・アナベナ、アフアニゾメノンは窒素固定能力があるため、水中の窒素が欠乏していても大気中の窒素ガスを栄養素に変換できる。
	T-N/T-P (-)	・T-N/T-P 比が 60 以下のときは、アナベナやアフアニゾメノンのような窒素固定できるものが優占し、T-N/T-P 比が 60 以上ではミクロキスティスやオシラトリアなどの窒素固定をおこなわないといわれるものが優占する ・Phormidium は T-N/T-P 比 20-25 が多い。ミクロキスティス、アナベナ、オシラトリアは 10-15 が多い。
	T-N/DIN (-)	・ミクロキスティス aeruginosa の優占水域では、DIN や DIN/DIP 比が低く、T-N(全窒素)/DIN 比が非常に高い(100 前後)。 ・ミクロキスティスは DIN が低く T-N/DIN や DON/DIN 比が高い時期に高密度で出現し、その出現密度のピークは T-N/DIN や DON/DIN 比のピーク期(7 月と 9 月)とほぼ一致した。 ・水温が 25℃以上の場合には供給 N/P 比が低い時に、ミクロキスティスが優占する。
	T-N × T-P 換 算 (μg at/L)	・T-N×T-P 換算で 93 (μg at/L) 以上ではミクロキスティス属や Phormidium 属が、約 2-93 (μg at/L) の範囲内ではアナベナ属やアフアニゾメノン属が bloom として出現しやすい。

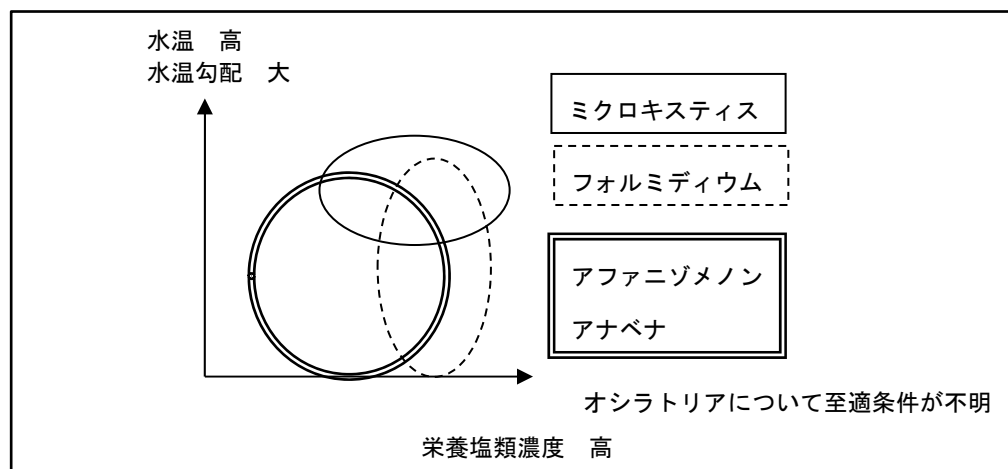


図 27 主なアオコの優占種の至適環境のイメージ



参考資料：IoT を利用したアオコ監視システム

IoT 利用型アオコ監視システムでは、現場に行かずにアオコの状態を確認することができ、さらに、アオコ対策（処理）装置の遠隔操作も可能となる。ここでは、研究段階の低コストを目指したアオコ監視システムを挙げる。

(1) マイコン Arduino+濁度センサーによるアオコの直接的モニタリング

写真 1 に示す 5 段階のアオコ濃度の水に対する、濁度センサー (DFRobot 社製, SEN0189, 写真 2) の出力とアオコ群体密度の関係は、図①のように 1 対 1 の関係がある。

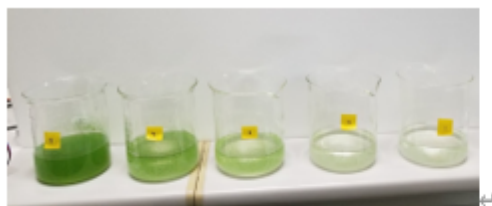
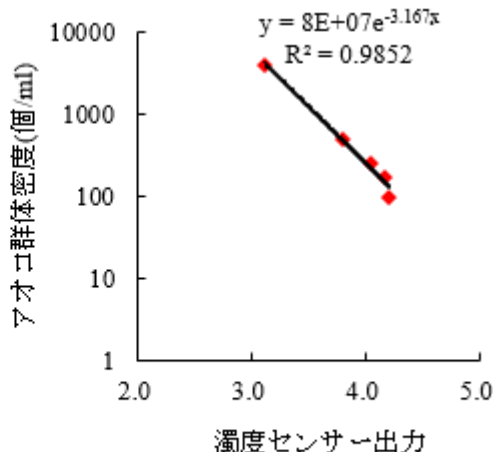


写真 1 校正実験に用いた水

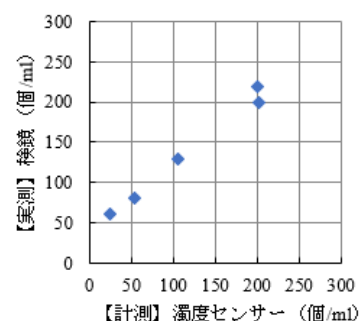


写真 2 濁度センサー



図① 濁度センサー出力値とアオコ群体密度の関係

このシステムを用いた現場におけるアオコ濃度の連続モニタリング結果では、比較的低い濃度 (300 個/ml 以下) のアオコでは、濁度センサーによる計測値は検鏡による実測値と線形関係にある (図②)。

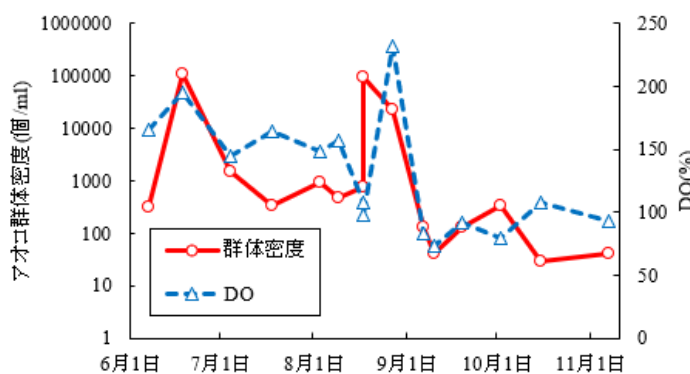


図② アオコ濃度の計測値と実測値の関係

(2) マイコン Arduino+標準的水質項目によるアオコの間接的モニタリング

アオコは水温、電気伝導度、pH、溶存酸素濃度などの水質項目に対し、物理的・生化学的に作用するが、その影響はアオコの濃度や活性に左右される (図③)。

水温、電気伝導度、pH、溶存酸素濃度は比較的安価なセンサーで測定可能であり、これら標準的水質項目とアオコ濃度の関係を数式化すれば、安価な IoT 利用型アオコ監視システムを構築できる。



図③ アオコ群体密度と溶存酸素飽和度の変化

【参考：植物プランクトン測定機器】

植物プランクトン量を現場で測定する機器としては、蛍光測定方式による製品がクロロフィルセンサー、クロロフィルメーター、クロロフィル濁度計等として販売されています。

また、植物プランクトン種を現場で測定する機器についても、蛍光励起スペクトルの測定により推測する機器も開発されています。調査に当たっては、測定技術や機器についての最新情報を入手し、調査目的、現場の状況、費用等を総合的に判断して計画することが重要です。

(2) 発生時対策の検討・実施

(1)に示した発生要因の検討を実施し、その結果を踏まえて、表 28 に示す富栄養化対策の適用性を参考にして実施可能な対策を立案する。対策の検討に当たっては、導入しようとする対策による水質改善効果について、水質予測モデルを用いて事前に把握することが有効である。そのためには、必要に応じて、数値シミュレーションに必要な詳細な水質調査の項目、調査頻度等を見直した上でモニタリングを一定期間行うなど、相応の期間を要する場合がある。事前予測を行う際には既に図 26(図 22 の再掲)に示したとおり、対策の種類によって適応が可能な水質予測モデルが限定・制限されることや、安全性、経済性なども考慮して実施する対策を決定する必要がある。例えば、鉛直 1 次元モデルで水質予測を行っていたダムでは、分画フェンスの表現を行うことができないため、新たに鉛直 2 次元モデルを組み直し検討を行う必要が発生し、費用と時間を要する。

他方、富栄養化現象が発生しその影響の程度が大きいと判断される場合には、3.2 でも述べたとおり (1)の発生要因の検討の実施にかかわらず、対応可能な対策を早急に実施することが重要である。例えば、新たに施設を設置する必要のない対策例としては、選択取水施設の取水深度の変更やアオコの回収等が挙げられる。また、アオコは風によって一部の沿岸に吹き寄せられ集積し、悪臭が発生する場合があるので、沿岸に吹き寄せられたアオコがみられる場合は、攪拌などの対応を行うことも悪臭発生の対策となる。

さらに、富栄養化現象が発生してしまった場合に、アオコによる悪臭やかんがい施設等への影響、被害、苦情等に備えて、水利用者・周辺住民に対する説明が必要となる場合がある。

表 28 富栄養化対策の適用性

対 策				ダム貯水池特性								参照頁 ※5
名称	対応段階 予：予防的対策 発：発生時対策	対策箇所		施設種別				最大水深(m) ※4				
		全体	局所	ダム	調整池	ため池	ファーム ポンド	1～ 5	5～ 10	10～ 30	30 ～	
副ダム	予・発	●		◎						◎	◎	参考 -2
バイパス	予・発	●		○	△	△		△	△	○		
浅層曝気 循環	予・発	●		◎	○					○	◎	
全層曝気 循環	予・発	●		◎	○					○	◎	
深層曝気	予・発	●		◎						◎	◎	参考 -3
流動化	予・発		●		○	◎		◎	◎			
浚渫	予	●		◎※1	○	○		○	○			
覆砂	予	●	●			△		△	△			
底質改善 底泥固化	予		●		○	○		○	○			参考 -4
池干し	予	●		○※1	◎	◎		◎	◎			
水位低下	予	●		○	○	△		○	○			
遮光	予・発		●		◎	○	◎	◎	○	○		
分画 フェンス	予・発	●	●	◎						◎	◎	参考 -6
選択取水	予・発	●		◎						◎	◎	
浮島	予・発		●	※2			△	△	△			参考 -5
アオコ 回収	発		●	◎※3	○	○		○	○	○	○	

凡例（施設種別、最大水深）

◎：対策実績があり、富栄養化現象の解消、低減効果が期待できる

○：対策の原理等から効果が期待できる

△：実績では効果は観られていないが、適正規模に設定することで効果発現する可能性がある

空欄：情報なし

※1：ダム上流部や流入部では実施可能である。

※2：ダム等の大規模貯水施設の場合、水質改善効果はあまり期待できないが、住民の意識啓発を期待して実施されている施設がある。

※3：入り江部や分画フェンス上流側などでは効果的である。

※4：施設の規模に応じて効果は異なる。ここでは、施設規模の一つの目安として最大水深による適用性を整理。

※5：巻末参考の頁



検討事例 2 ; 鉛直 1 次元モデルにより水質保全対策を検討した例

Aダムでは、鉛直 1 次元モデルを使用して、水質の現況再現計算を行った。用いた鉛直 1 次元モデルの概要は、図 ①に示すとおりである。

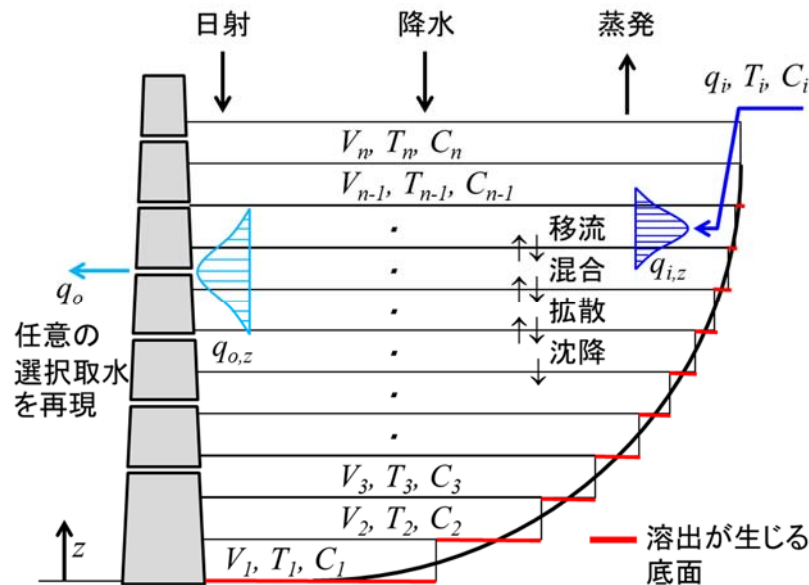


図 ① 鉛直 1 次元モデルの概念図

モデルではダム貯水池が水平方向に分割されたレイヤーで構成され、各レイヤーの水や熱、物質の量を再現し、時間方向に連続して計算することで物質の動きをシミュレートすることが可能である。貯水池表面積や貯水量は標高の関数として計算される。レイヤーの厚さは全て同じであり、各レイヤーの厚さは、貯水量全体の水収支に従って計算ステップ毎に決定される。

現況再現にあたっては、現地調査結果との整合を図るとともに、負荷源や流入物質ごとの削減対策を盛り込んだ効果算出が可能なモデルとするため、モデル構築当初に予定する水質改善対策による算出が可能な感触を掴むため、極端な対策の条件下（例：流域からの流入負荷量を 1/2 に設定）での計算結果から判断して鉛直 1 次元モデルを採用し、再現性を高めるため、現地観測結果とアメダス等既存データとの相関性を考慮したデータ補正を行うパラメータを決定した。

【水質予測モデルによる対策効果の検証結果】

水質改善対策として「深層取水」「流入負荷削減」「底質改善」について、水質予測モデルによって対策効果を検証した結果は以下の通りとなり、「取水深度を深層に変更する対策」の実行性が高いと考えられた。

項目	対策内容	検証結果〔() は H29.9 の藻類濃度に対する割合〕
深層取水	○ 取水深度を No.5 (EL.79.0m) の深い取水口に変更して取水	○ 温度躍層が深くなり、水温が高い層が厚くなり河川水が流入する深さが深くなるため、表層への栄養塩類の供給が少なめになり藻類の表層での濃度が低くなる。(79)
流入負荷	○ 流域からの流入する負荷を2割削減	○ ダム湖への栄養塩類の流入が削減されるため、ダム湖での藻類増殖が抑制される。(77)
底質改善	○ 浚渫等によって溶出する栄養塩類の量を5割削減	○ 底層の栄養塩類濃度が低下するものの躍層により表層への供給が抑制されるため藻類増殖抑制への影響は限定的である。(98)
深層取水 + 流入負荷	○ 取水深度を No.5 (EL.79.0m) の深い取水口に変更して取水 ○ 流域からの流入する負荷を2割削減	○ 上述の「深層取水」と「流入負荷」の相乗効果により、表層での藻類の濃度が更に低下する。(61)

【取水深度変更による効果発現のメカニズム】

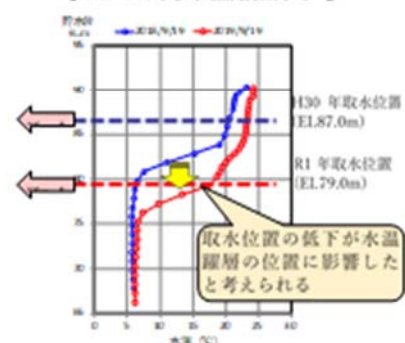
■ 貯水池内の熱や物質の流動

- ダム貯水池内では河川流入による流れの他に、熱や物質の密度差（高いところから低いところへ）による流れ（密度流）によっても物質等が輸送される。
- 密度流は取水地点から離れた水域で支配的であるが、取水口近傍では取水による流れ（吸込流）が支配的になる。
- 夏季等になり水温躍層が発達すると、鉛直方向の水質混合は表層から水温躍層までが主な範囲となる。

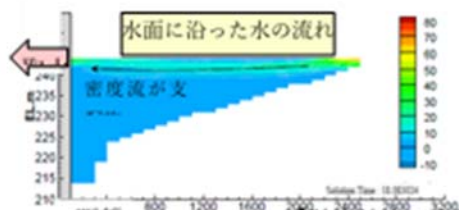
■ 取水位置の違いによる躍層形成

- 取水口付近で生じる吸込流が、水温躍層の位置に影響を与える（右図）。
- 表層取水の場合（下左図）は、水面に沿った水の流れが主となるため、表層付近に水温躍層が形成される。
- 深層取水の場合（下右図）は、取水近傍に生じた吸込流の影響を受けて、表層から取水位置にかけて生じる緩やかな流れにより、取水口下層に水温躍層が形成される。

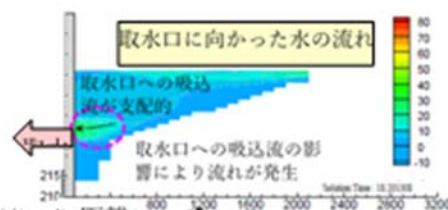
【Aダム湖心水温鉛直分布】



【表層取水の場合】



【深層取水の場合】



【貯水池内の水平流速の分布イメージ】



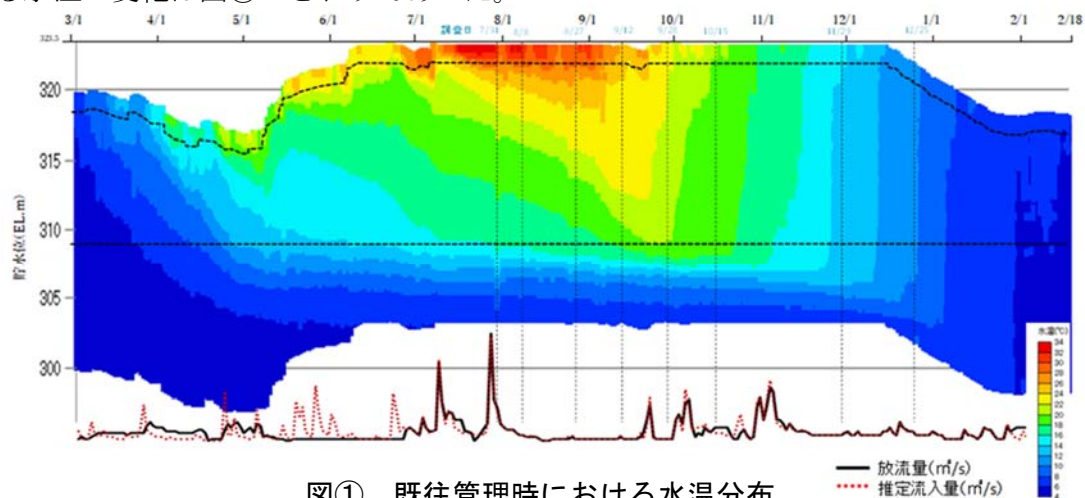
検討事例3；モニタリングによる対策検討例

Bダムでは、流入河川及びダム湖内の水温・水質等のモニタリングデータを使用して、ダム湖内における植物プランクトン発生要因の推察を行い、管理手法の変更による対策の検討を行った。モニタリング等を行った項目は下表に示すとおりである。

ダム湖の水質等		
水温連続観測	水温	最深部：鉛直方向に30箇所（水深20mまで）
水質調査 （多項目水質計）	水温、pH、濁度、DO	ダム湖内4地点：鉛直方向に30箇所 （水深20mまで）
水質調査 （富栄養化関連項目）	COD、T-N、NH ₄ -N、NO ₂ -N、NO ₃ -N、 T-P、PO ₄ -P、chl-a	最深部：3層 （0.5m、5m、藻類が多いと想定される層） ダム湖内4地点：4層または5層 3河川流入部：1層、放流地点1層
藻類群体系数調査	生物顕微鏡	最深部：3層 （0.5m、5m、藻類が多いと想定される層）
藻類発生状況調査	タイムラプスカメラ撮影	2箇所（湖内左右岸）
ダムの水運用	流入量、放流量、貯水位	ダム管理所観測データ
河川の水質		
流入河川水温連続観測調査	水温	3河川の各流入口付近
出水時水質調査	COD、T-N、NH ₄ -N、NO ₂ -N、NO ₃ -N、 T-P、PO ₄ -P、chl-a	3河川の各流入口付近
河川水流入深度調査	水温、pH、濁度、DO	ダム湖内10地点 （湖底または水深30mまで）

Bダムでは、湖内利水者との関係から曝気装置は設置されていないことから、取水及び放流に関する管理方法の運用による対策を検討するため、モニタリングデータのうち主に水温分布の把握により、湖内環境の把握を行った。

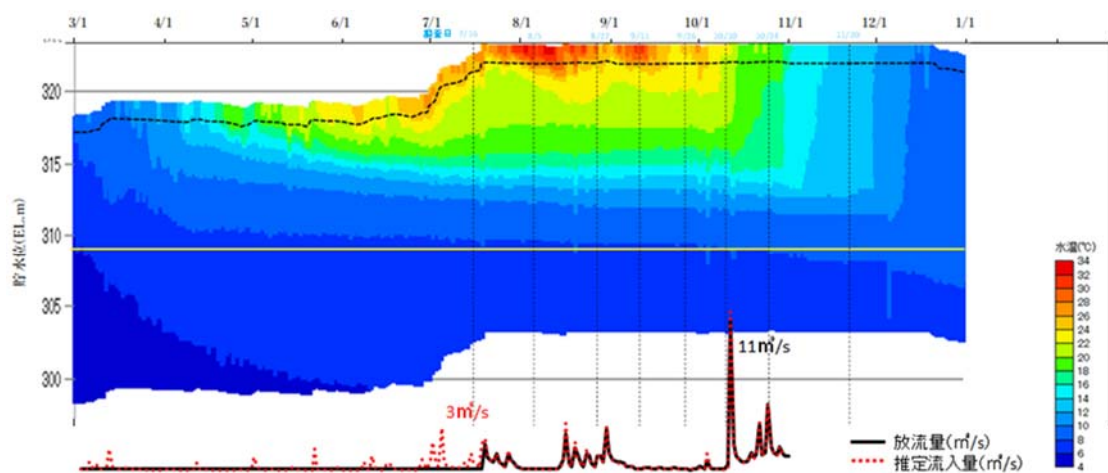
Bダムにおける既往のダム管理方法は、昼間に表面取水ゲート（水面下1.5m）、夜間に第2取水孔（満水位下14m）を用いた取水を基本としていた。この際のダム湖最深部における水温の変化は図①のとおりであった。



図① 既往管理時における水温分布

既往管理時には夏場の高温期に表層で暖められた水塊が、夜間の第2取水孔からの取水による冷温域水塊の放水に伴い、日数の経過と共に下層域まで高温域が拡大し、藍藻類の繁殖が活発となる水域が多くなっていた。

このため、管理者の協力により、昼間及び夜間ともに表面取水ゲートから取水する運用を行った際のダム湖最深部における水温の変化は図②のとおりであった。



図② 取水方法変更（表面取水）時における水温分布

水温躍層は取水方法変更に伴い、変更前（満水位から14m付近）から変更後（満水位から8～10m付近）へと浅くなった。

また、水温の鉛直分布把握以外に流入河川の水温・水質データを含めて考察すると、取水方法変更後の夏から秋にかけての河川水の流入深度は、表面からの水深2～4m程度に流入していたと考えられ、表面取水ゲートを常時用いることにより、水温の比較的高い層の放出、及び、河川流入水の滞留時間を短くすることにより、藻類発生要因が軽減され、広範囲での藻類発生現象とはならず、発生期間も短くなるなどの改善が見られた。

なお、表面取水ゲートを常時用いることで、下流及び農業水利上の支障は特に確認されなかった。



検討事例 4 ; 鉛直 2 次元モデルにより水質保全対策を検討した例

C ダムでは、鉛直 2 次元モデルにより水質予測モデルを構築し、水質保全対策の検討を行った。モデルの概要は、図 ①に示すとおりである。

鉛直 2 次元モデル（鉛直 2 次元非静水圧モデル）

- ・対象とする水域を縦断方向（x 方向）・鉛直方向（z 方向）にメッシュ分割して、メッシュ毎に流速と水質を計算。
- ・横断方向（y 方向）の分布は一樣と見なす。
- ・ダム湖のように横断方向に水質分布が一樣の場合に良く適用される。
- ・鉛直格子数が増減可能で、水位変化が大きい場合にも適用可能。
- ・非静水圧モデルであり、鉛直流を正確に表現可能。

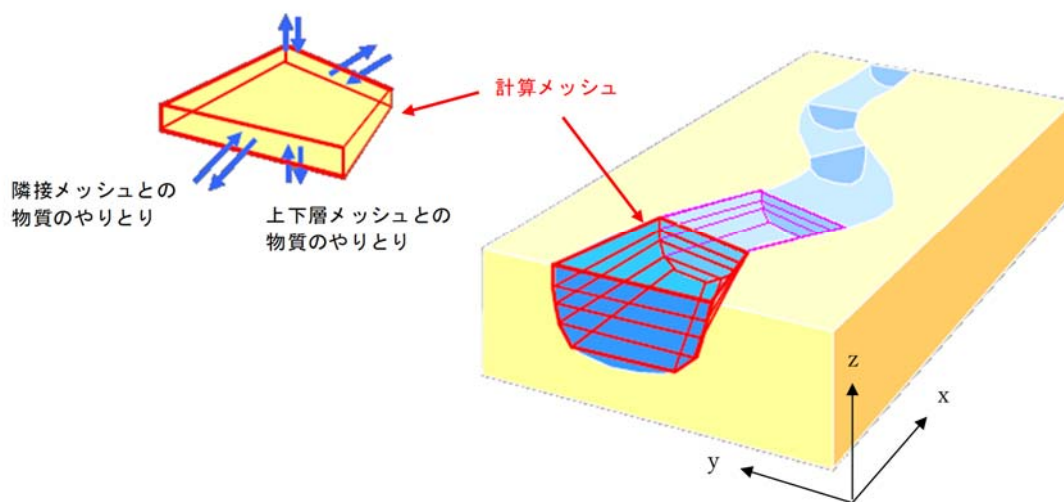


図 ① 鉛直 2 次元モデルの概念図

C ダムは、水深が深く、縦断方向に長い形状をしており、集水域が相対的に小さいためダム湖内に流入した水は概して滞留期間が長く、夏季には水温躍層が発達する。アオコの発生にはこうした水理構造が関係していると考えられたことから、水の流下過程、水温成層形成過程、これらに関連した植物プランクトン増殖過程等を的確に再現し、また、既に設置している分画フェンス、曝気施設の効果を適切に評価するため、鉛直 2 次元モデルを選定した。（評価項目：水温、COD、DO、クロロフィル a、濁度など）

ダム貯水池の水質予測は、流況解析から出力される「流れ」と「水温」及び流入水質を入力条件として、図 ①のモデルにより、計算時間ステップ毎に流動状況を計算し、その結果を用いて水温と植物プランクトン増殖などの生態・水質変化を計算する。

【保全対策の水質目標設定と水質保全対策の検討】

水質目標として、OECD 栄養区分に基づく富栄養化判断基準に用いられている「クロロフィル a」の年平均値（8 $\mu\text{g/L}$ 未満）、年最大値（25 $\mu\text{g/L}$ 未満）を設定し、曝気装置、分画フェンス、取水深度、流入負荷について運用方法や条件設定を変えて水質予測モデルによる水質保全対策の検討を行った。

検討ケース		対策の概要
case0	現況の平均的運用	・ 既設曝気装置 3 基稼働（稼働期間は 7/1～9/30） ・ 分画フェンス通年設置
case1	曝気装置の稼働期間見直し	・ 既設曝気装置の稼働期間を 5/1～10/31 とする
case2	case1 + 曝気装置の出力増強	・ 既設曝気装置の稼働期間を 5/1～10/31 とする ・ 既設曝気装置の出力規模（送気量）を 2 倍にする
case3	case1 + 曝気装置の散気管化	・ 曝気装置の稼働期間を 5/1～10/31 とする ・ 曝気装置 3 基のうち上流側 2 基を散気管式に変更
case4	分画フェンス撤去	・ 既設曝気装置 3 基稼働（稼働期間は 7/1～9/30） ・ 分画フェンス撤去
case5	case1 + case4	・ 既設曝気装置の稼働期間を 5/1～10/31 とする ・ 分画フェンス撤去
case6	case3 + case4	・ 既設曝気装置の稼働期間を 5/1～10/31 とする ・ 曝気装置 3 基のうち上流側 2 基を散気管式に変更 ・ 分画フェンス撤去
case7	流入負荷 1 割低減	・ 流域からの流入負荷濃度を 1 割低減
case8	流入負荷 2 割低減	・ 流域からの流入負荷濃度を 2 割低減
case9	取水位置の変更による循環制御	・ 取水位置の変更により、湖内循環の促進及び低層の冷水活用によるアオコ抑制
case10	case9 + 曝気装置の稼働期間見直し（間断運転）	・ 取水位置の変更（常に表層水を取水）により、湖内循環の促進及び低層の冷水活用によるアオコ抑制 ・ 既設曝気装置の稼働期間を効率化（アオコ発生状況を踏まえ、曝気装置の稼働期間を以下の様に設定） 下流側 1 基：5/1～8/81 上流側 2 基：7/1～8/31
case11	分画フェンスの丈の変更	・ 分画フェンスの丈を既設（1m）から 5m に変更
case12	case1 + 曝気装置の散気管化・経済化	・ 曝気装置の稼働期間を 5/1～10/31 とする ・ 曝気装置 3 基のうち最上流側 1 基を散気管式に変更し、残る 1 基（真ん中の 1 基）は運用停止
case13	竣工時の状態	・ 曝気装置なし ・ 分画フェンスなし

【水質予測モデルによる対策効果の検証結果】

計算結果においては、クロロフィル a の年平均値及び年最大値の両者に対して、基準を達成したのは case1、2、3、5、6、10、12 の 7 ケースとなり、いずれも曝気装置の稼働期間を現況の運用より前倒し 5/1 から運用したケースであった。

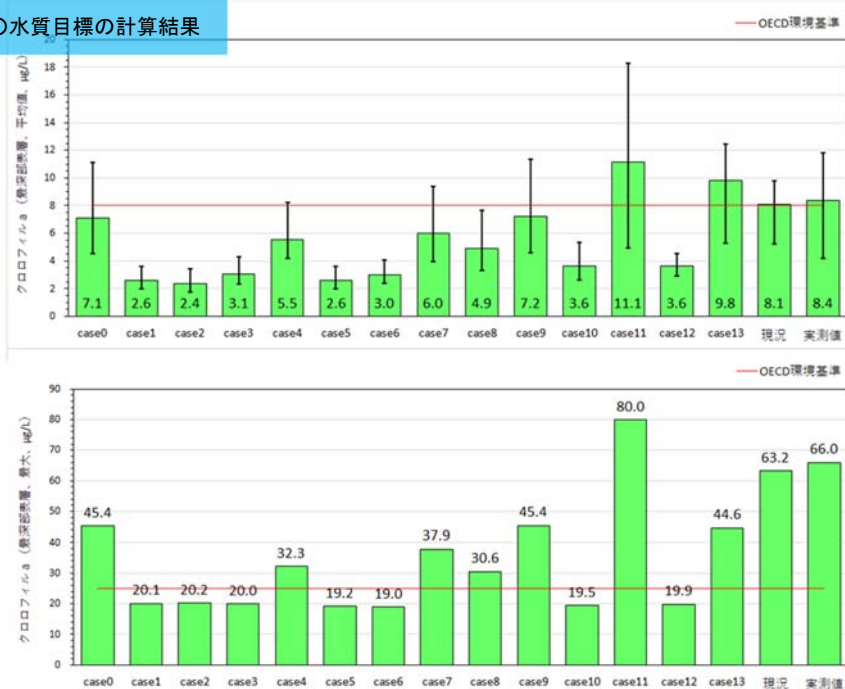
分画フェンスに関しては、分画フェンスが無いケースでクロロフィル a 濃度が低くなった。これは、分画フェンスが無い場合、曝気に伴う鉛直循環流によるアオコ等の植物プランクトンを底層に取り込む能力が高くなったためと考えられた。

曝気装置に関しては、稼働期間の変更以外の要素として、既設の間欠揚水筒から散気管に変更した場合、クロロフィル a 濃度が多少減る傾向があった。

検討した 14 ケースのうち最善ケースとしては、クロロフィル a 年平均値に対しては case2、クロロフィル a 年最大値に対しては case6 となった。また、曝気装置 3 基のうち 2 基を散気管に変更した case6 に対して、散気管化を行わなかった場合 (case5)、散気管を 1 基のみ運用した場合 (case12) もほぼ同様の改善効果が得られると考えられた。

取水位置および曝気装置稼働期間の調整など、運用効率化を想定した case1、2、10 における改善効果は、上記の最善ケースに及ばないものの、クロロフィル a の年平均値及び年最大値ともに基準を達成する結果となった。

○水質目標の計算結果



- ・クロロフィル a 年平均値のエラーバーは、平成 29 年～令和元年それぞれの年別の平均値の最大、最小を示している。
- ・case0 は、曝気装置を毎年同じ期間 (7/1～9/30) 稼働したケース
- ・「現況」は現況再現ケースで、曝気装置の稼働を調査 3 カ年の実際の稼働期間に当てはめたケース
- ・「実測値」は、実測に基づくクロロフィル a 濃度の 3 カ年平均値、各年平均の最大値及び、最小値、3 カ年間の最大値



参考資料；＜水利用者・周辺住民等への対応・住民説明用配布資料（案）＞

青字：事務所ごとに変更して記載

●●●には貯水施設名称等を入れる

●●●におけるアオコ発生状況および対応状況についての説明資料

20__年__月__日 ◎◎◎事務所▲▲課

アオコの発生と原因

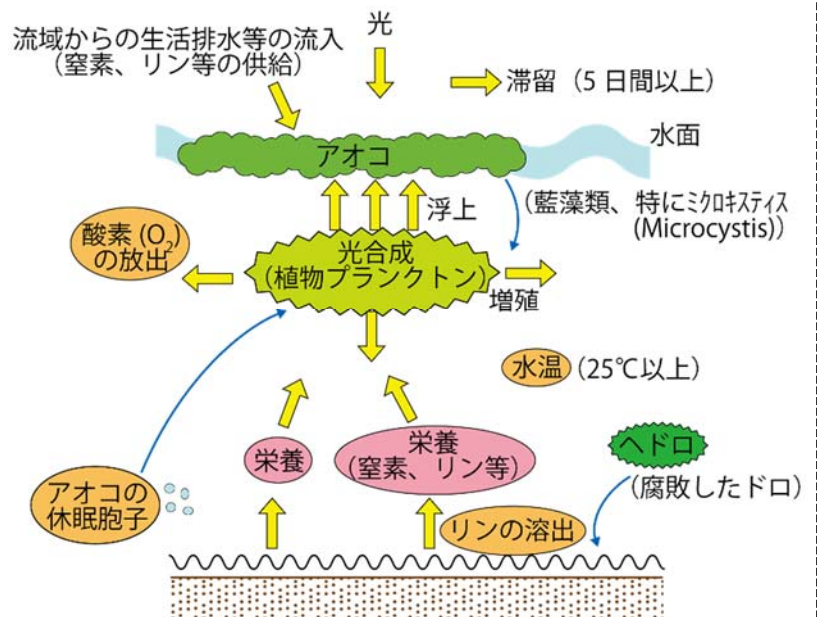
アオコとは、ダム貯水池で特定のプランクトン（ミクロキスティス、アナベナ等）が異常増殖して水面に集積する現象であり、特に夏の高気温・水温時や、栄養塩類濃度の高い水の滞留といった条件下で発生することがあります。ダム貯水池のアオコの発生・増殖の要因としては、気象条件の変化等によって主に以下の5つがあげられます。

- ① 光合成（日射）
- ② 水温（概ね 25℃以上）
- ③ 滞留時間（概ね 5 日間以上）
- ④ 栄養源（特に窒素、リン）※
- ⑤ 植物プランクトンの種（孢子）

※河川や水路から●●●に流入している生活排水はアオコの栄養源になります。



写真：貯水施設で発生したアオコ



図① アオコの発生に関する概念

今回、●●●においてアオコが発生した原因として、夏季の気温上昇により、②水温が 25℃ 以上になり、また、今年は降雨が少ないため、ダム貯水池内の③滞留時間が概ね 5 日以上になっていることが影響していると考えられます。

アオコ発生により起こりうる影響

アオコが発生することによって、ダム貯水池やその下流等に関与する影響としては、主に以下の内容があげられます。ダム貯水池や周辺環境によっては、下記の影響は必ずしも起こるものではありません。

- ダム貯水池用水の水利用面への影響
 - 悪臭（藻臭などのアオコ特有の臭い）、着色（アオコによる緑色の着色）
 - 上記による水道用水への影響
 - かんがい施設（噴霧器等）の目詰まり
- ダム貯水池における影響
 - 悪臭、アオコ発生による景観の悪化
 - 魚類（釣り）への影響

●●●におけるアオコ発生による影響

- ・現在の●●●のアオコの状況は見た目アオコ指標レベル※2であり、かん水チューブの目詰まり、用水の悪臭、着色、ダム貯水池における景観悪化などの影響の可能性があります。
- ・今後、アオコが増殖し、ダム貯水池全体あるいは流出口付近のアオコレベルが3以上になった場合は影響が生じる可能性が高くなります。
- ・下流の◆◆地区において、藻臭がしたとの報告を受けております。

※見た目アオコ指標レベルとは、アオコの発生状況を目視で確認できるように、アオコの程度をレベル0～6の7段階にレベル化したもの。

●●●における現在のアオコレベル

影響項目			chl. aの濃度レベル										
単位 (μ g/L)			0	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1000
かんがい 施設管理面	施設障害 (目詰まり)	スプリンクラー											
		噴霧器											
		多孔管											
		点滴かんがい											
		かん水チューブ											
かんがい 用水利用面	品質低下	畑作物											
		施設園芸											
	悪臭 (藻臭)												
	着色												

	影響が生じる可能性が高い
	影響が懸念される/要監視レベルである
	問題ないレベルである

影響が生じる可能性が高い
 影響が懸念される/要監視レベルである
 問題ないレベルである

◎◎◎事務所の対応

◎◎◎事務所では、アオコによる下流への影響を防ぐため、現在、以下の対応を行っております。

- ・アオコ監視体制の強化 (1日2回、ダム貯水池の周りを巡回)
- ・水質調査
- ・受益者 (水道事業者、農業・漁業関係者) との連絡・協議
- ・関係者との協議の上、取水設備等の操作方法の工夫
- ・ダム貯水池内の曝気設備、流動化装置による水質改善の実施

さらに、これ以上のアオコ増殖を抑え、アオコを減少させるため、上記対応の他に、下記の対応の実施を今後予定しております。

- ・分画フェンスの設置
- ・アオコ集積箇所において、バキュームカーによるアオコの回収・除去
- ・水質調査および結果の整理と、運転操作の見直し
- ・ダム貯水池の用水と〇〇川の水を混合させた上で、かんがい用水として利用
- ・非かんがい期の池干しおよび浚渫

担当窓口

◎◎◎事務所 ▲▲課 ■■係
連絡先：◆◆◆-◆◆◆-◆◆◆

※この資料に加えて下記の資料も一緒に配布することで、より具体的に説明することが可能となりますので参考にしてください。

- ・見た目アオコ指標レベル : p. 71～75 のコラム参照
- ・発生場所とアオコレベルの記録例 : p. 71、74、75 のコラム参照

3.3.4 発生後の対応

富栄養化現象に対して導入した水質改善対策の効果発現状況については、3.3.2 及び 3.3.3 の一連の調査結果を用いて、水質評価基準または目標を満たしているか、もしくは対策前の水質よりも改善されている状況にあるか等を評価し、必要に応じて対策・モニタリング計画の見直しを実施する。

【解説】

発生後には、発生の可能性が高い時期や発生時に取り組んだ各種対応の結果を取りまとめて、取り組んだ対応すべてについての効果検証を行い、対策の効果発現状況进行评估し、取りまとめる。

このことにより、当初想定したとおりの対策効果であったか否か、想定していなかったことが確認されたかなどの整理を行い、水質改善対策自体やモニタリング計画の見直しに反映し、より良い水質改善の取り組みにつなげていく必要がある。

(1) モニタリング結果の解析による対策効果の確認

対策効果を確認するため、富栄養化現象の抑制状況、水質の時系列変化、水質改善の指標値の達成状況等を整理する。整理すべき内容と整理方法例は、表 29 及び表 30 に示すとおりである。

表 29 発生後の対応として整理しておくべき内容の例

項目	整理しておく内容
発生状況等	・ 富栄養化現象発生状況 ・ 富栄養化現象発生時および前後の気象・水質等のデータ ・ 富栄養化現象発生要因 ・ 過去と今回の発生状況の比較、経年変化
対応状況	・ 水質改善施設の稼働状況と効果 ・ 応急的な対応とその効果 ・ 対応上の課題となった事項 ・ 受益者・周辺住民等への対応とそれへの反応
影響・被害の状況	・ ダム貯水池での影響・被害状況（景観、異臭、魚類斃死等） ・ 農作物への影響・被害状況 ・ かんがい施設やかん水装置への影響・被害状況 ・ 上水等の水利用の障害（異臭等）

表 30 アオコレベル（見た目アオコ指標レベル）と水温の整理例

調査 地点	月	7月																	
	日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
●●橋	レベル	1	1	2	2	2	1	2	3	3	4	3	2	2	2	2	3	3	
	水温	19	19	21	22	21	20	21	22	23	24	23	22	21	20	21	21	22	23
●●橋	レベル																		
	水温																		
●● 機場	レベル																		
	水温																		
●● 流入口	レベル																		
	水温																		
●● 取水口	レベル																		
	水温																		

(2) 実施対策の評価

富栄養化現象に対する水質改善対策の効果検証では、対策検討時に想定・設定したレベル・目標の状況になっているかという観点から評価することが基本となる。この評価に当たって、アセス段階では予測できなかった富栄養化現象が発生している場合には、その現象の発生が抑制されたか、水質が改善されたか等の観点を中心となるが、2.5で示した各評価基準等にも着目することが重要である。

1) 水質改善の指標値の達成状況

設定した水質目標の指標値（評価対象ダムが環境類型指定対象ダムの場合には指定されている環境基準値、環境類型指定がされていない場合には、農業用水基準である COD6 mg/L 以下、T-N1 mg/L 以下等）を満たしているか等の整理を行う。

2) 富栄養化現象の抑制状況又は富栄養化現象に起因する具体的な問題の回避状況の確認

対策を実施した前後の、富栄養化現象の発生頻度、地点、期間、アオコレベル、農業用水への影響、下流における利水障害（飲料水のカビ臭等）の整理を行い、富栄養化現象の発生状況が沈静化している否かを確認する。

3) 水質改善対策の機能確認

対策を実施した前後において、COD、T-N、T-P 等の水質の改善、水温躍層の形成状況が改善されているか等の整理を行う。

(3) 対策・モニタリング計画の見直し

水質改善対策が本運用段階となり、その効果が当初通り発現している状況が継続している場合には、必要に応じて維持管理コストの縮減の観点から、運用ルールやモニタリング調査の効率化を検討する。

3.3.4(2)の検討で効果があまり確認されなかった場合には、設定された目標に近づくよう、水質改善対策の運用方法を中心に再検討し、再検討結果を反映したモニタリング計画の見直しを適時行う。

また、効果が表れなかった場合には、上記の運用方法の再検討に加え、当該ダム貯水池で実施可能な新たな水質改善施設の設置を検討し、モニタリング計画の適宜見直しを行う。場合によっては、水質の目標値の再設定を行う。