

農業用ダム環境影響評価参考図書（案）

～富栄養化編～

令和3年3月

農林水産省

農村振興局 鳥獣対策・農村環境課

はじめに

環境影響評価法が平成9年6月に制定されたことを受け、ダム等対象事業別に「環境影響評価の項目並びに当該項目に係る調査、予測及び評価を合理的に行うための手法を選定するための指針、環境の保全のための措置に関する指針等を定める省令」（以下「主務省令」という。）が平成10年6月に定められました。事業者は、この主務省令を踏まえて、さらに具体的な調査・予測・評価の方法を選定するとともに、環境保全措置の検討を行うこととされています。

このため、農林水産省では、対象事業の一つである農村振興局所管のダム・堰事業に関して、主務省令に定められた調査、予測及び評価の具体的手法や対策の検討に当たって留意すべき事項を示した「ダム事業における環境影響評価に係る主務省令の解説」（アセスマニュアル）を平成13年3月に作成しました。

その後、平成23年4月には環境影響評価法の一部改正において、計画段階における配慮書の作成、環境保全措置等の報告書の作成等が位置づけられたことを受け、平成25年4月には主務省令の改正が行われました。それを踏まえ、アセスマニュアルについても平成30年3月、計画段階における配慮書の作成等に関わる具体的手法について、土地改良事業の適応性の観点から検討するとともに、最新の知見を踏まえた技術的な検討も行い、環境影響評価において評価すべき各環境要素に係る調査、予測及び評価の具体的手法等に関する解説書として改訂したところです。

一方で、供用後のダム等において、気候変動など自然条件の変化、多様な地域条件などを背景に、計画時点では予測し得なかった水環境の変化（富栄養化による植物プランクトンの異常繁殖）が顕在化しています。

このことを踏まえると、ダム計画時に行う環境影響評価の精度をこれまで以上に高めていくことが、この課題の解消につながると考えます。このため最新の知見や富栄養化現象が発生している農業用ダムを対象にしたケーススタディの結果等を活用しながら、ダムアセスマニュアルの内容のうち、「ダム計画時における水質予測と環境保全措置」及び「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」を中心に、体系的にわかりやすく解説した本参考図書（案）を取りまとめました。アセス実務担当者はもとより、ダム管理者においても技術的な手引きとして活用できるものと考えておりますので、積極的に利用していただけると幸いです。

なお、本参考図書（案）は、作成時点の技術的知見に基づいているため、今後の新たな技術の発展、知見等の蓄積を踏まえ、必要に応じて改訂する方針です。

農業用ダムの水質予測及び水質保全対策に係る有識者意見聴取会

委員名簿

座長

黒田 久雄 茨城大学農学部地域総合農学科地域共生コース 教授

委員

濱田 康治 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究部門水利工学研究領域水域環境ユニット 上級研究員

原口 智和 佐賀大学農学部食資源環境科学コース 准教授

眞家 永光 北里大学獣医学部生物環境科学科 講師

※敬称略 令和2年3月現在

目 次

本書の構成

各章の概要	1
第1章 富栄養化現象	1
1.1 富栄養化現象とは	1
1.2 富栄養化レベルとは	2
1.3 ダム貯水池における富栄養状態による影響	4
1.3.1 富栄養状態で発生する影響	4
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	4
1.4 生物異常発生の発生要因と環境への影響	8
1.4.1 生物異常発生の発生要因	8
1.4.2 生物異常発生に伴うかんがいへの影響	12
1.4.3 生物異常発生に伴う悪臭の発生要因	13
1.5 富栄養状態に至りやすいダム貯水池の特性	15
1.6 物理・水環境と発生種の特性	16
第2章 アセスメント段階(ダム計画時)における水質予測と環境保全措置	19
2.1 アセスメント段階における水質予測の方法	19
2.2 概略的な予測	21
2.2.1 統計的手法 (Vollenweider モデル)	22
(1) 調査方法	22
(2) 予測手法	23
2.2.2 その他の概略的予測手法	25
(1) 類似事例の引用による解析・予測手法	25
(2) 年平均回転率による解析・予測手法	26
2.3 数値シミュレーションモデルを用いた水質の予測	28
2.3.1 数値シミュレーションとは	29
(1) 数値シミュレーションの概要	29
(2) 数値シミュレーションの水理モデルの種類	30
2.3.2 モデル選定の考え方	34
2.3.3 数値シミュレーションによる予測手順	36
(1) 数値シミュレーションの流れ	36
(2) パラメータを選定・同定するために必要となる主な観測データ	37
(3) 選定モデル別の主なデータ及びパラメータ	41

2.4	水質予測結果を踏まえた環境保全措置の検討	44
2.4.1	数値シミュレーションで検証可能となる主な環境保全措置	44
2.4.2	環境保全措置の選定	48
2.5	環境影響評価手法	49
2.6	事後調査（モニタリング調査）の計画策定	56
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	60
3.1	富栄養化現象への対応の流れ	60
3.2	影響面からの対策の必要性の判断	62
3.3	各段階での対応	63
3.3.1	日常的な対応	65
(1)	水利用状況、土地利用等の状況確認	65
(2)	ダム貯水池の水質状況等の確認	67
3.3.2	発生する可能性の高い時期の対応	69
(1)	アオコレベルの確認	69
(2)	詳細な水質等の調査	76
(3)	予防対策の検討・実施	77
3.3.3	発生時の対応	78
(1)	発生要因の検討	78
(2)	発生時対策の検討・実施	83
3.3.4	発生後の対応	94
(1)	モニタリング結果の解析による対策効果の確認	94
(2)	実施対策の評価	95
(3)	対策・モニタリング計画の見直し	96

< 巻末参考 >

1. 富栄養化対策手法の解説
2. ダム・湖沼における富栄養化対策事例
3. ケーススタディダムにおける検討結果
4. 用語集

本書の構成

目次構成

本書は、大きく3つの章により構成される。

第1章 富栄養化現象

第2章 アセスメント段階（ダム計画時）における水質予測と環境保全措置

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

各章の構成

本書の各章における構成を以下に示す。

(箱書き)

基本となる事項を記載する。

【解説】

箱書きに記載した事項の背景となる考え方や具体的な実施事項等について解説する。

【参考文献】

箱書き、解説に記載した事項に関連する文献として、公表されている基準、マニュアル、書籍等を記載する。

なお、【解説】では、特に重要な部分を_____ (下線) で強調する。

各章の概要

各章の概要は以下のとおりである。

第1章 富栄養化現象

1.1 富栄養現象とは

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。

- ・「富栄養現象」について解説する。

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間は中栄養レベルとして区分される。

- ・富栄養化レベルについて解説する。

1.3 ダム貯水池における富栄養化による影響

1.3.1 富栄養化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。

- ・富栄養化の進行に伴う影響、並びに生物異常発生による影響・被害の概要及び被害事例について、ダム貯水池内の影響だけではなく、利水・設備への影響等を解説する。

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℃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。

- ・代表的な生物異常発生現象の一つであるアオコの発生による影響について、かんがいへの影響と、かんがい以外への影響について解説する。

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。

- ・富栄養状態のダム貯水池で生じる利水や環境への影響について解説する。

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を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。

- ・アオコや淡水赤潮に関係する植物プランクトンの異常発生 の要因について解説する。

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。

- ・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について解説する。

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）やジェ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。

- ・悪臭を発生させる主な藻類、並びに悪臭の発生に関する知見（主な藍藻類との関係など）について解説する。

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。

- ・富栄養状態に至りやすいダム貯水池の特性について記述する。

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。

- ・生物異常発生の代表的な例であるアオコの発生しやすい気象条件や生態学的特徴について解説する。

第2章 アセスメント段階（ダム計画時）における水質予測と環境保全措置

2.1 アセスメント段階における水質予測の方法

アセスメント段階における水質予測では、まずは概略的な予測を行いダム貯水池の富栄養化の程度を把握し、富栄養化の程度が大きくなる可能性がある場合には、適切な数値シミュレーションモデルを選定し、より詳細な将来予測を行う。

- ・ダムアセスメントにおける富栄養化の予測評価手順について解説する。

2.2 概略的な予測

概略的な予測として、統計的手法及び事例の引用又は解析により、ダム貯水池の水質傾向と富栄養化現象の発生の可能性を検討する。

2.2.1 統計的手法（Vollenweider モデル）

- ・Vollenweider モデルによる予測・評価方法を解説する。

2.2.2 その他の概略的予測手法

- ・類似事例の引用、及び年平均回転率による解析・予測手法について解説する。

2.3 数値シミュレーションモデルを用いた水質の予測

概略予測の結果、富栄養化の可能性が懸念された場合には、適切な数値シミュレーションモデルを選定し、より詳細な将来予測を行う。

シミュレーションモデルに必要な入力データとして、水の流動に係る事項、富栄養化に係る事項、気象に係る事項について通年の情報を収集する必要がある、不足する場合には現地調査を実施する。

2.3.1 数値シミュレーションとは

- ・数値シミュレーションの概要を説明し、モデルの種類、モデルの選定の考え方及び予測手順について解説する。

2.3.2 モデル選定の考え方

- ・環境保全措置の視点から数値シミュレーションモデル選定の考え方について解説する。

2.3.3 数値シミュレーションによる予測手順

- ・数値シミュレーションの流れや、数値シミュレーションモデル構築に必要なパラメーターの選定・同定に必要な観測データ等について解説する。

2.4 水質予測結果を踏まえた環境保全措置の検討

2.3.3で構築したモデルにより、ダム供用時において富栄養化による影響が予想された場合には、環境保全措置として、水質保全を図る各種対策を行う。この対策は、流入河川対策、ダム貯水池内対策、放流対策に分類され、代表的な対策としては曝気循環、分画フェンス、選択取水等が挙げられる。

2.4.1 数値シミュレーションで検証可能となる主な環境保全措置

- ・水質保全対策例と、その対策評価が可能となる数値シミュレーションモデルの選定方法について解説する。

2.4.2 環境保全措置の選定

- ・環境保全措置の選定の考え方について解説する。

2.5 環境影響評価手法

評価は、事業者が実行可能な範囲内でできる限りの環境保全措置を施し、富栄養化による影響が回避され、又は低減されており、環境の保全への配慮が適正になされているかどうかを評価する。

また、国又は地方公共団体が実施する環境保全に関する施策によって、当該ダム貯水池に対して、富栄養化に関する基準又は目標が示されている場合には、当該基準又は目標と調査・予測結果との間に整合が図られているかどうかを評価する。

- ・評価項目、評価基準について解説する。

2.6 事後調査（モニタリング調査）の計画策定

事後調査（モニタリング調査）は、環境影響評価の結果、ダムの存在・供用により水質に影響があり、環境保全措置が必要と判断した場合に、環境保全措置の一環として行う。

その目的は、環境保全措置の効果確認及びダム運用条件等の検証であり、場合によっては運用の見直しを行うために必要な基礎資料を取得することである。

調査は環境保全措置の内容により期待される効果が異なるため、調査項目の内容は環境保全措置に応じて検討・整理する必要がある。

- ・通常のモニタリング調査（定期調査）、水質保全設備設置時の場合（曝気循環設備及び選択取水設備の場合）の調査について解説する。

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。

- ・ダム管理者が供用段階で発生する可能性のある富栄養化現象への対応を段階ごとに解説する。

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、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。

- ・影響面からの対策の必要性の判断に関する具体的な内容について、利水に係る影響、施設に係る影響、周辺地域に係る影響等の観点から解説する。

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。

- ・富栄養化現象への対応を4つの段階に区分し、それぞれの段階について解説する。

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。

(1) 水利用状況、土地利用等の状況確認

- ・日常的に必要となる対応として、水利用状況、ダム貯水池の監視や水温等の測定、気象情報の状況把握等について解説をする。

(2) ダム貯水池の水質状況等の確認

- ・日常的に必要となる対応として、簡易な水質の状況把握について解説をする。

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」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。

(1) アオコレベルの確認

- ・監視・観測の強化、予防対策並びに「見た目アオコ指標レベル」について解説する。
- ・アオコレベルとその被害について解説する。

(2) 詳細な水質等の調査

- ・詳細な水質等の調査内容について解説する。

(3) 予防対策の検討・実施

- ・アオコの発生の高い時期の予防対策の考え方について解説する。

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。

(1) 発生要因の検討

- ・状況等の把握、発生要因の確定、対策検討、対策後の効果確認について解説する。

(2) 発生時対策の検討・実施

- ・富栄養化対策、実施について解説する。

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。

(1) モニタリング結果の解析による対策効果の確認

- ・水質改善対策の効果検証にあたって整理する点について解説する。

(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の着目点について解説する。

(3) 対策・モニタリング計画の見直し

- ・対策の効果の程度により、対策・モニタリング計画の見直しの方針について解説する。

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。

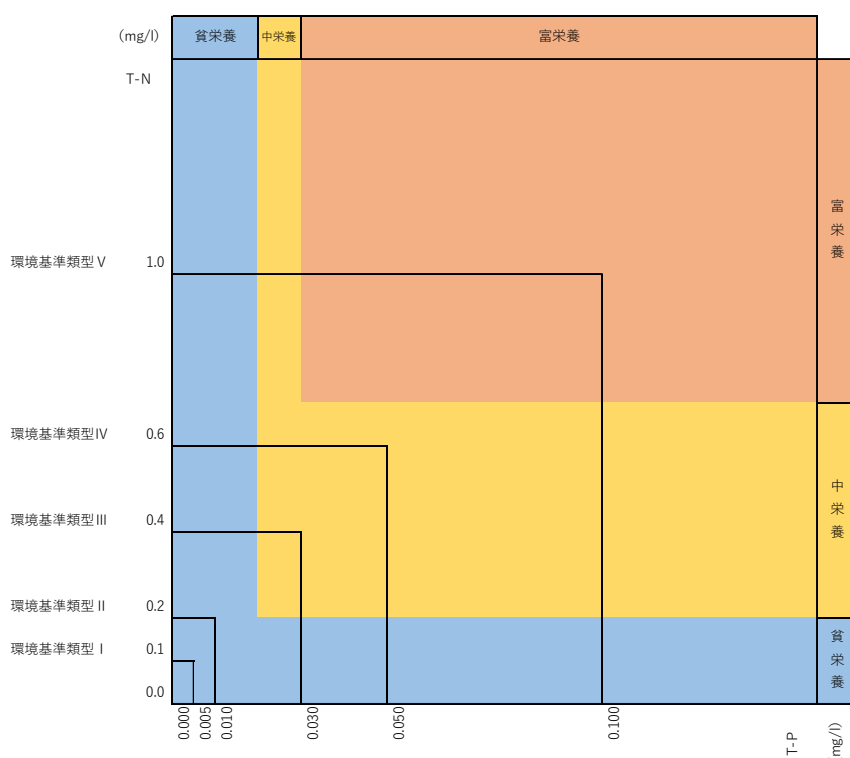


図1 全窒素、全リンによる貧栄養から富栄養への階級レベルの概念図

* 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 ＜0.4※	0.1～0.7 0.4～0.6※	0.5～1.3 0.6～1.5※	坂本 1966 Forsberg & Ryding 1980
T-P (mg/L)	0.005～0.01 0.002～0.02 ＜0.02 ＜0.01 ＜0.012 ＜0.0125 ＜0.01 ＜0.01 ＜0.015※	0.01～0.03 0.01～0.03 0.01～0.02 0.012～0.024 0.0125～0.025 0.01～0.02 0.01～0.035 0.015～0.025※	0.03～0.1 0.01～0.09 ＞0.02 ＞0.02 ＞0.024 ＞0.025 ＞0.02 0.035～0.1 0.025～0.1※	Vollenweider 1967 坂本 1966 吉村 1937 US EPA 1974 Carlson 1977 Ahl & Wiederholm 1977 Rest & Lee 1978 OECD 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
	ベントス		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℃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℃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。

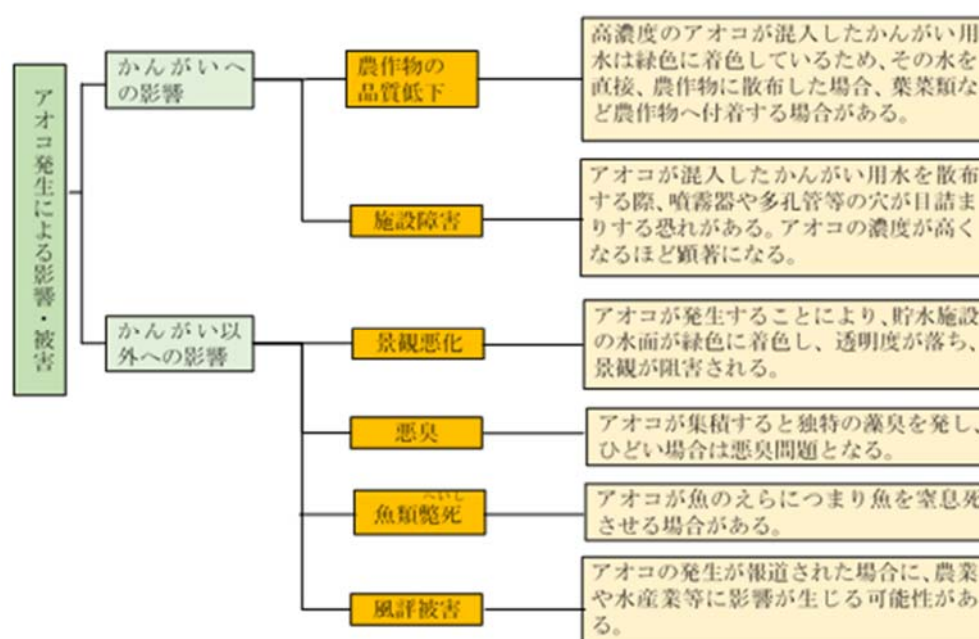


図 2 アオコ発生によるかんがい等への影響・被害

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）。

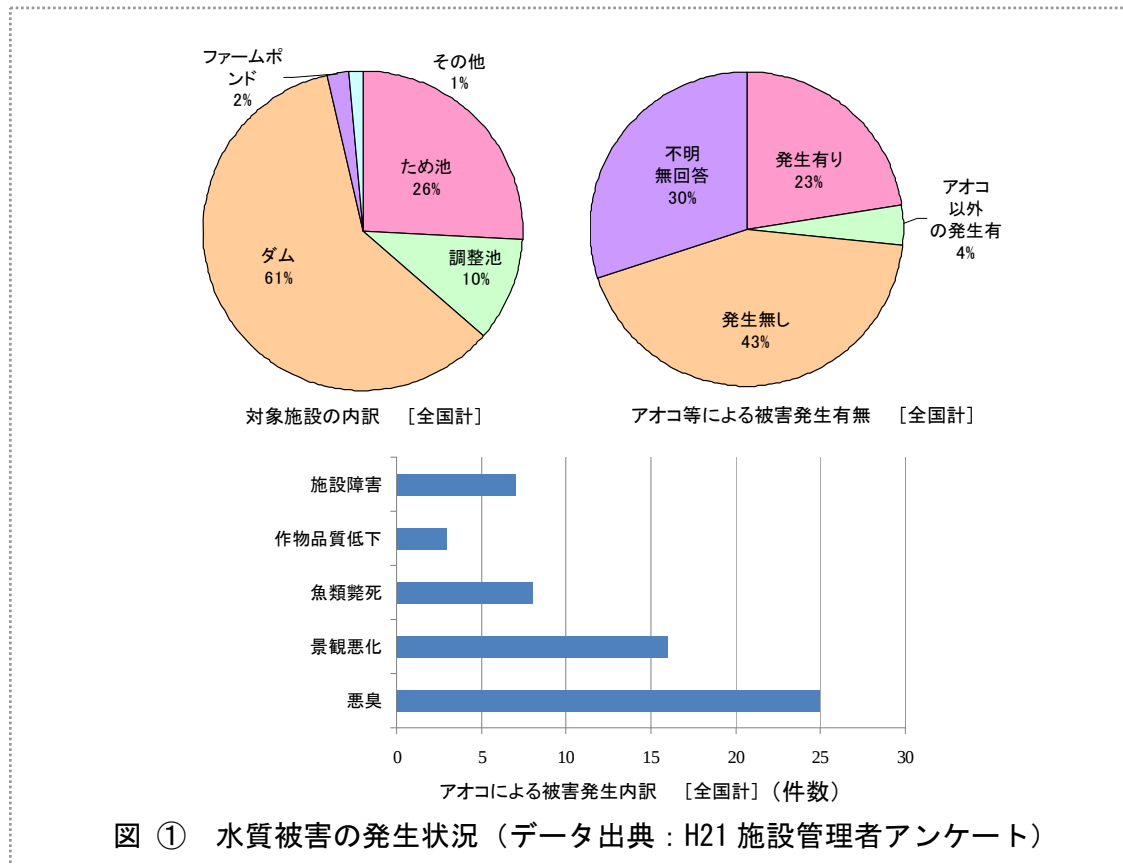


表 ① アオコ発生による影響・被害の内容（データ出典：H21 施設管理者アンケート）

区分	影響・被害の内容
かんがいへの影響	・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	・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	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。 同局は22日から、活性炭を増量しており、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。	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	『土浦市、休み返上で作業』 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。 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。	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	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」など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。 『城沼でコイ浮く』 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。	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	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。	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	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。ダム湖では十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。 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。	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	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。 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。	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より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、かんがい施設が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を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

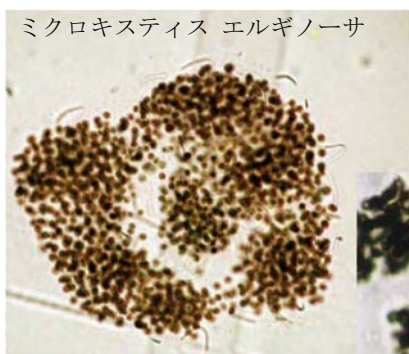
現象	原因藻類	主な種類
アオコ	藍藻類	ミクロキスティス、アフアニゾメノン、アナベナ等
	緑藻類	クロレラ、セネデスマス、クラミドモナス等
淡水赤潮	珪藻類、緑藻類	
	渦鞭毛藻類、ユーグレナ藻類等	セラティウム、ペリディニウム、ユーグレナ、ウログレナ等の赤色、赤褐色、黄褐色の色素体を持った種類
	動物プランクトン	ミジンコ、ゾウミジンコ

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。

ミクロキスティス エルギノーサ



細胞の大きさ：2.5～9.5 μm

ミクロキスティス ビリデリス

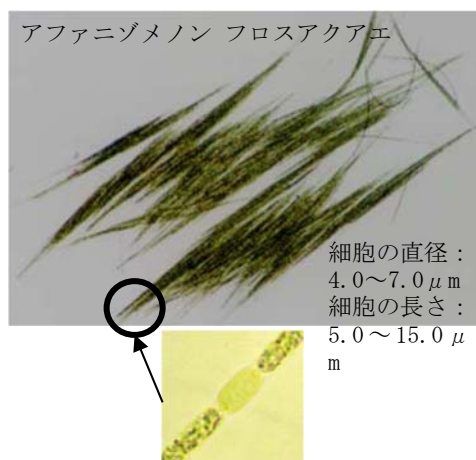


細胞の大きさ：
4.0～7.0 μm

アフアニゾメノン属

円筒形の細胞体が細長い群体を形成。

アフアニゾメノン フロスアクアエ

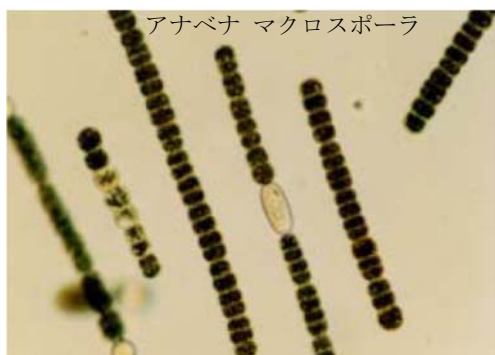


細胞の直径：
4.0～7.0 μm
細胞の長さ：
5.0～15.0 μm

アナベナ属

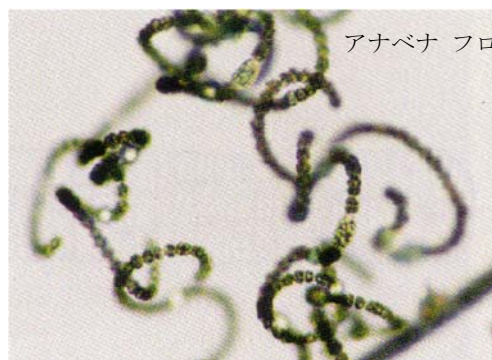
粒状の細胞体が糸状体あるいは束状の群体を形成。

アナベナ マクロスポーラ



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可能です。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

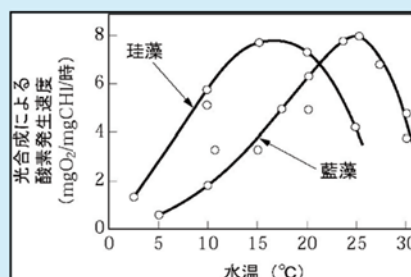
原因の一つであるミクロキスティスを例にとれば、水温が 20℃を超えると増殖速度が増加し、25℃を超えると異常増殖が始まることが知られている。また、藻類が増殖するためには活発に光合成を行う必要があり、十分な日射量が必要となる。したがって、ミクロキスティスは梅雨明け後の夏に異常増殖してアオコを生じさせ、秋になり水温や日射量が低下すると衰退していくといった消長サイクルを持つ。

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、しなかったりするため、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：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

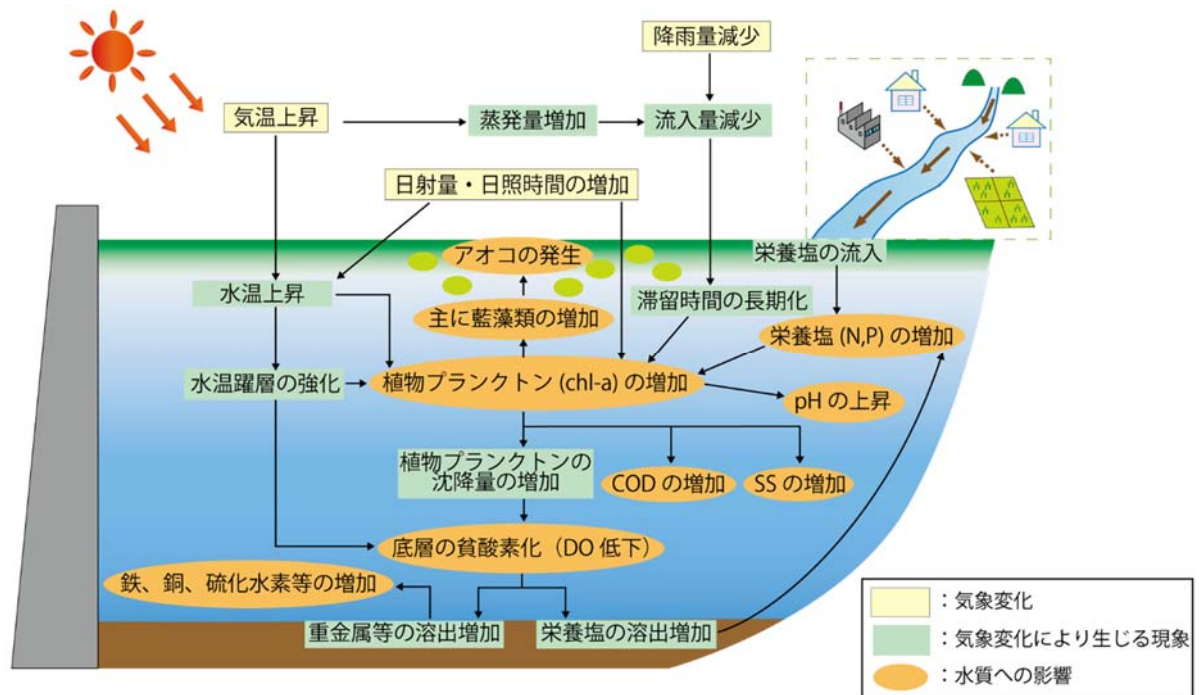
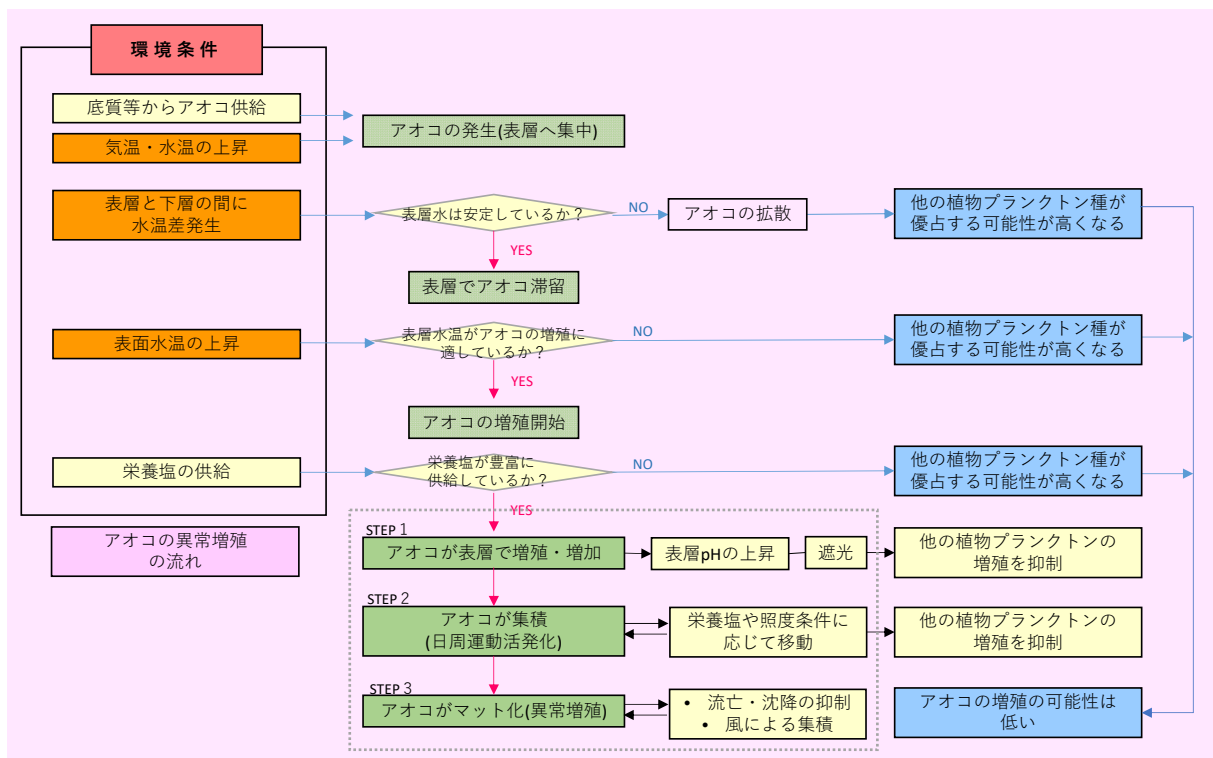


図 6 アオコ発生とそれに伴う水質への影響の仕組み



※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、かんがい施設の日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日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	かんがい施設の日詰まりを起こす	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」「かんがい施設の日詰まり」「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 「適性限界値」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：

- 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)
- 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
- 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

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 (日詰まり)	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-M I B) やジェオスミンがよく知られている。2-M I B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-M I B) 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ェオスミンがある。

2-M I Bについては、人が異臭と感じる閾値が 5 ng/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、ジェ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-M I B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-M I B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。

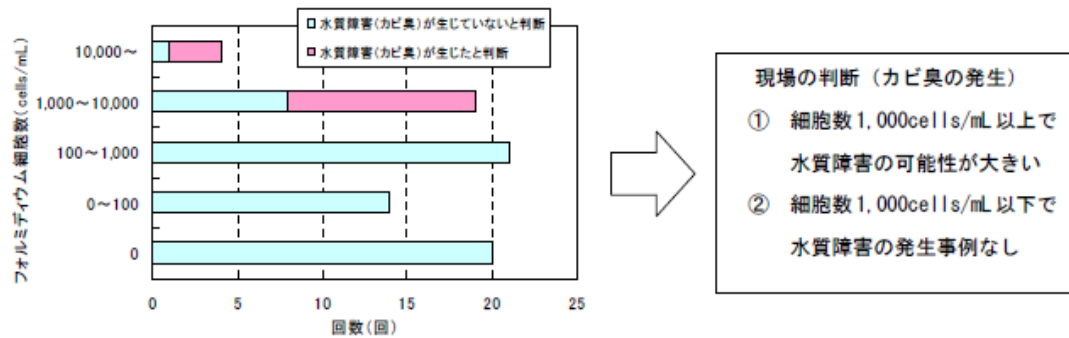
【参考】カビ臭の発生とフォルミディウム属の細胞数との関係

(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。

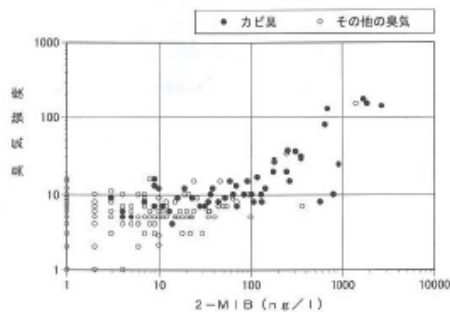


(細胞数の分類: ○○より大きい~○○以下)

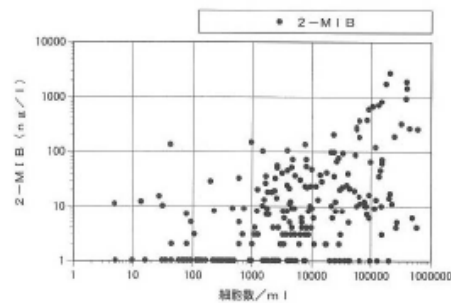
図 4.12.3 Phormidium 細胞数と水質障害 (現場の判断) の状況

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 細胞数/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	- 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。	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いため、アオコが発生しやすい
水温	- 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）。	藻類は高水温（25℃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)	- 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[*]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。	- 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	- 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（D0）濃度が低い（リンの溶出を促進する）。	- 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℃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℃、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	・日平均気温が 25℃を超え、今後も上昇すると予測される。 ・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。 ※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。
水理条件	・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。 ※滞留時間が 5 日を超えるとアオコ発生が懸念される。
水温・水質条件	・窒素、リン濃度が共に十分高い。 ・水温が一定の基準※を超え、今後も上昇すると予測される。 ※水温 20～25℃でアオコが発生し、25℃を超えると大増殖が懸念される。 ・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。 ※クロロフィル a 濃度 20 μg/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。

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		
藻類 原因	属名	ミクロキスティス属	アナバエナ属		アフアニゾメノン属
	出現種	Microcystis aeruginosa Microcystis wesenbergii Microcystis ichthyoblabe	螺旋型 Anabaena mucosa Anabaena spiroides	直鎖型 Anabaena smithii Anabaena viguieri	Aphanizomenon klebahnii
	写真				
	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。
環境 条件	最適水温	25℃	23℃		23℃(但し、8℃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）



コラム：水温成層

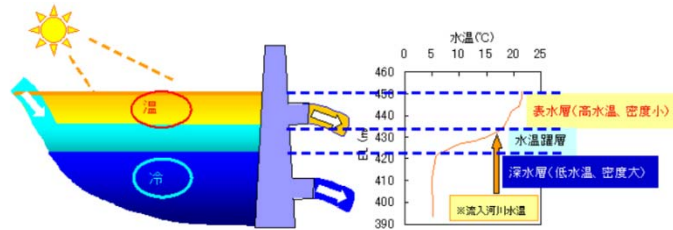
◆夏期停滞期の夏のダム貯水池水温は、水温成層が発達し3層に分かれる

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。

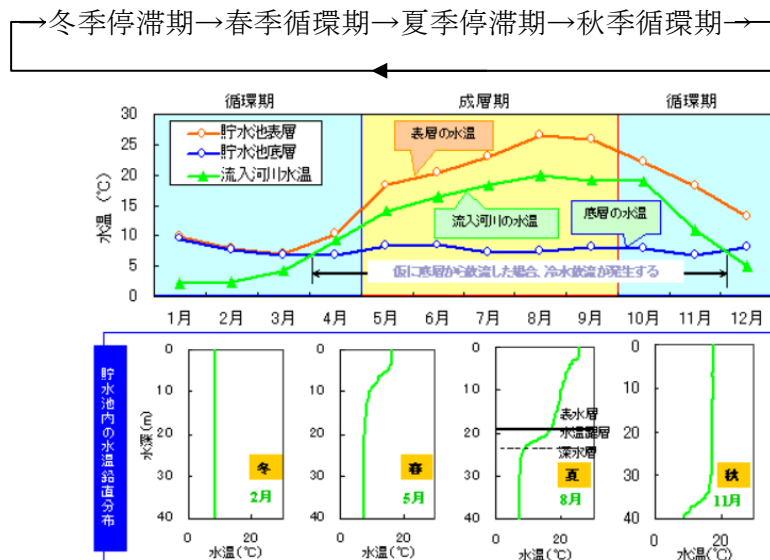
深水層：変水層の下に続く最深層。上からの熱が伝わりにくいので夏も低温（多くの場合15℃以下、極端な場合は4℃）を保つ。



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ったまま全体として水温が低下していく。年間の水温が4℃を挟んで上下する温帯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。



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>
 茨城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

第2章 アセスメント段階(ダム計画時)における水質予測と環境保全措置

2.1 アセスメント段階における水質予測の方法

アセスメント段階における水質予測では、まずは概略的な予測を行いダム貯水池の富栄養化の程度を把握し、富栄養化の程度が大きくなる可能性がある場合には、適切な数値シミュレーションモデルを選定し、より詳細な将来予測を行う。

【解説】

環境影響評価法の対象事業の一つである農村振興局所管のダム事業のアセスメント段階で水質予測を行う目的は、事業計画時にダム貯水池を供用した場合に水質が評価基準（環境基準）と整合するかどうか判断し、富栄養化現象による影響が回避され、環境の保全への配慮が適正になされているかどうかを評価することである。

アセスメント段階におけるダム貯水池内の富栄養化に係る水質予測手順は、図9に示す通り、統計的手法や類似事例の引用・解析等により富栄養化の程度を概略予測し、ダム貯水池の富栄養化の程度が大きくなる可能性がある場合には適切な数値シミュレーションモデルを選定し、より詳細な将来予測を行う。

富栄養化の予測の基本的手法は表8に示す通りであるが、統計的手法や類似事例の引用・解析により富栄養化の影響を予測する場合には、必ず周辺の既設ダム貯水池の状況を調査し、統計的手法や類似事例の引用・解析の予測結果と併せて検討を行うものとする。

なお、概略的な予測手法は2.2で、数値シミュレーションを用いた詳細な水質等の予測は2.3で、それぞれ詳述する。

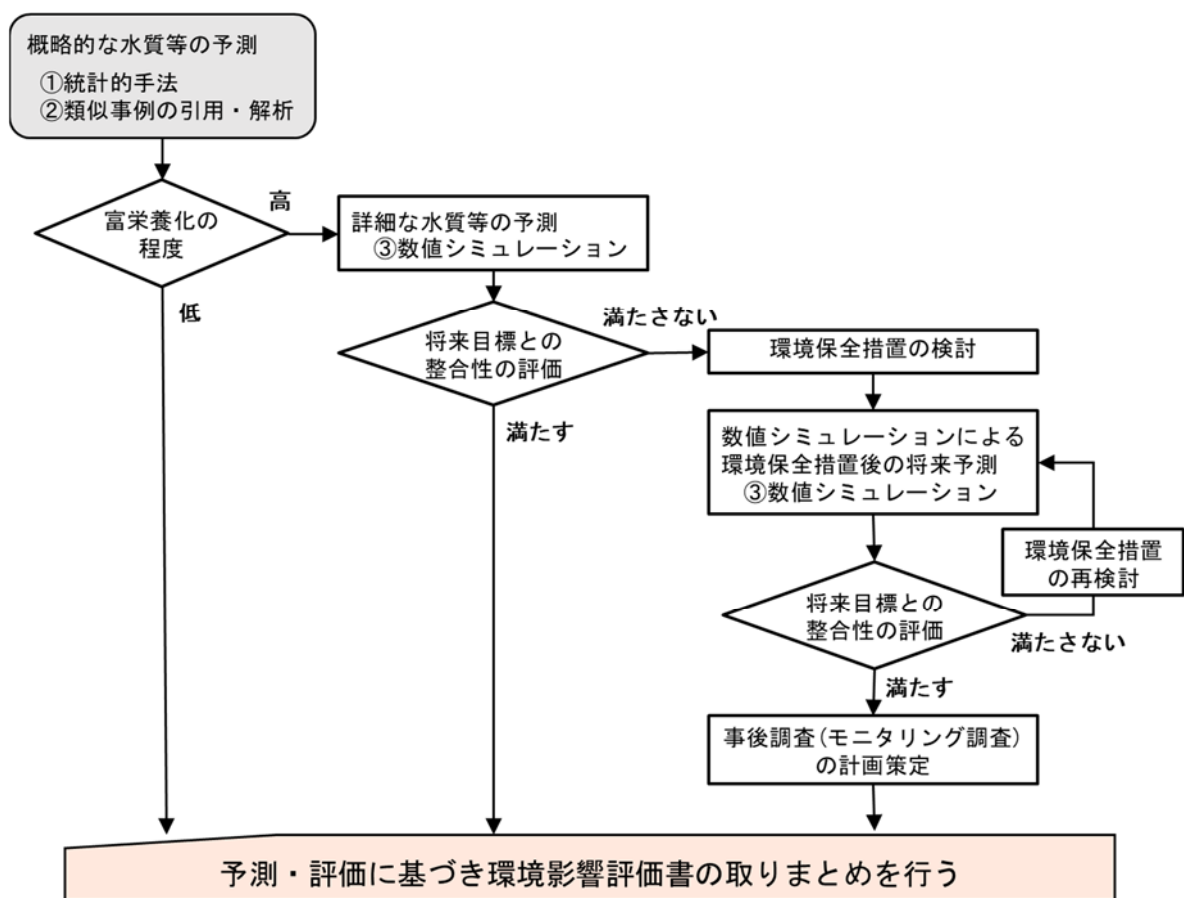


図 9 ダムアセスにおける富栄養化の予測評価手順

表 8 富栄養化の予測の基本的手法

影響要因	予測地域	予測の基本的な手法	予測項目
ダムの供用 及びダム貯 水池の存在	ダム貯水 池内	①統計的手法 (Vollenweider (フォーレンバイダー) モデル)	栄養塩類を指標とし た富栄養化の程度
		②類似事例の引用、解析	流入水質を指標とし た富栄養化の程度
		③数値シミュレーション	COD、窒素、リン、 クロロフィル a 等

2.2 概略的な予測

概略的な予測として、統計的手法及び事例の引用又は解析により、ダム貯水池の水質傾向と富栄養化現象の発生の可能性を検討する。

【解説】

概略的な予測として、Vollenweider モデル等による簡易予測を行い富栄養化の発生可能性を把握する。この段階ではダムは存在していないが、上記の手法は流入河川の流量と流入水質を用いて予測するため、調査は建設予定ダムの流入河川の流量、水質に対して行う。

概略的な予測としては、図 10 に示す通り、まず、Vollenweider モデルによる簡易予測を行い、これにより富栄養化の発生可能性が高いと評価された場合は、数値シミュレーションによる予測評価に移行する（p35、2.3.2 数値シミュレーションモデル選定の考え方、図 18 に移行し、引き続きモデル選定フローを行う）。

また、富栄養化の発生可能性が中程度と評価された場合には、さらに類似事例・統計的手法等により富栄養化が起きるかどうか解析・予測も行い、Vollenweider モデルによる予測結果とともに環境影響評価書を取りまとめる。

一方、富栄養化の発生可能性が低いと評価された場合は、その予測・評価に基づき環境影響評価書を取りまとめる。

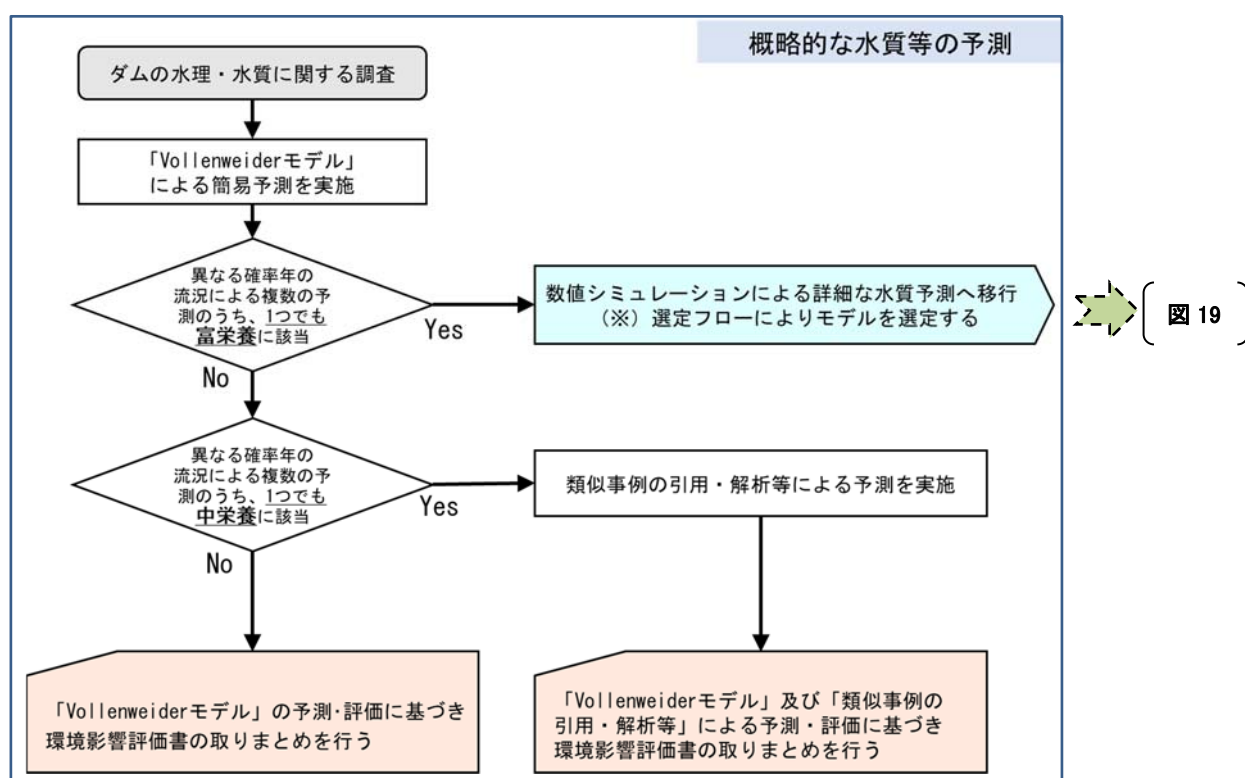


図 10 概略的な水質等の整理・予測フロー

(※) 数値シミュレーションによる予測評価に到達した場合、フローは p35、2.3.2 の図 19 に続く。

2.2.1 統計的手法（Vollenweider モデル）

Vollenweider モデルとは、ダム貯水池や淡水の自然湖沼ではリンが富栄養化の制限因子となっている場合が多いことに着目し、回転率×平均水深とダムに流入するリンの単位面積当たりの年間負荷量の関係から富栄養化の状況をモデル化したものであり、ダム貯水池の富栄養化の可能性の予測に関しても一般的に用いられているものである。

なお、本モデルの適用に当たっては当該ダム貯水池の栄養塩類の制限因子を確認し、窒素が制限因子となっている場合は、富栄養化現象の発生の判断には適さない場合があることに留意する必要がある。

窒素とリンのいずれが制限因子として働くかについては両者の比 N/P で表すことが多く、表 9 を参考に対象のダム貯水池の栄養塩類の制限因子を確認する。

表 9 ダム貯水池の栄養塩類による制限因子

	窒素制限	リン制限
坂本（1987）	NP 比 ≤ 10	$20 \leq$ NP 比
OECD（1982）	NP 比 ≤ 10	$17 \leq$ NP 比

(1) 調査方法

概略的な予測にあたり調査すべき情報は、以下のとおりである。

1) 年間総流入量（Q）

流入河川の流量からダム貯水池への年間流入量を集計する。ダム計画時に検討している利水計算結果を用いることが想定される。現行の水利計画では、雨の少ない年を基準にしてダムを含む水利システムの計画がなされていることから、予測する場合も計画基準年^{*1}の年間総流入量を用いる。一方、計画基準年以外にも、様々な流況が含まれるように異なる確率年を対象に集計し、複数の予測を行うことが望ましい。また、複数の流入河川のうち一部の河川で流量が観測されていない場合には、流域内で観測された流量観測結果を流域面積比で按分する等の手法がある。

2) ダム貯水池容量（V）

ダム計画におけるダム貯水池諸元から、ダム貯水池の容量を設定する。年平均回転率の算定のため、平常時最高貯水位に相当する容量のほか、夏季制限水位が設定されている場合には夏季制限水位に相当する容量を使用する。

3) ダム貯水池面積（A）

ダム計画におけるダム貯水池諸元からダム貯水池の面積を設定する。例えば、年平均回転率の算定に用いた平常時最高貯水位に相当するダム貯水池面積のほか、夏

^{*1}：水利計画では、一般的に“10 年に 1 回程度生ずる渇水年”を計画基準年としている。

季制限水位が設定されている場合には夏季制限水位に相当するダム貯水池面積を設定する。

4) 平均水深 (Z)

平均水深は 2) で設定したダム貯水池容量を、3) で設定したでダム貯水池面積で除して平均水深を求める。

5) リンの年間流入負荷量 (MP)

ダム貯水池に流入する河川の水質調査結果から、流入水に含まれるリン負荷量を算出する。負荷量は、流入水量とリン濃度の乗算により算出するが、より正確な負荷量の算定のため、各水質調査結果における流量とリン濃度の関係を統計的に整理した流量に対する流入負荷量の関係を示した L-Q 式を作成し、流量変動を踏まえて算出する場合もある。

(2) 予測手法

(1) で調査した数値を下記式に使用し、単位面積当たり年間リン負荷量を求め、平均水深×回転率の相関図に示す。予測の対象とするダムについて、計画基準年及び計画基準年以外の異なる確率年の様々な流況を含む複数のデータに基づき、同図にプロットを行い、中栄養から富栄養の領域にプロットされた場合には、富栄養化現象が発生しやすい。図 12 の 2 本の曲線は、富栄養化限界を判定する湖内リン濃度 ($\overline{[P]}\lambda$) として、0.01mg/L 及び 0.03mg/L を示している。これはそれぞれ貧栄養と中栄養、中栄養と富栄養の区分を想定している。

$$\overline{[P]}\lambda = \frac{L(P)}{V_p + H/\alpha}$$

ここに、 $\overline{[P]}\lambda$: 湖内の年間平均全リン濃度 (mg/L)

$L(P)$: 単位湖面積当たりの全リン負荷 (=MP/A) (g/m²/年)

V_p : リンの見掛けの沈降速度 (m/年)

H : 平均水深 (=V/A) (m)

α : 回転率 (=Q/V) (年)

(なお、 V_p の値は、Vollenweider によると、10m/年と推定されている。)

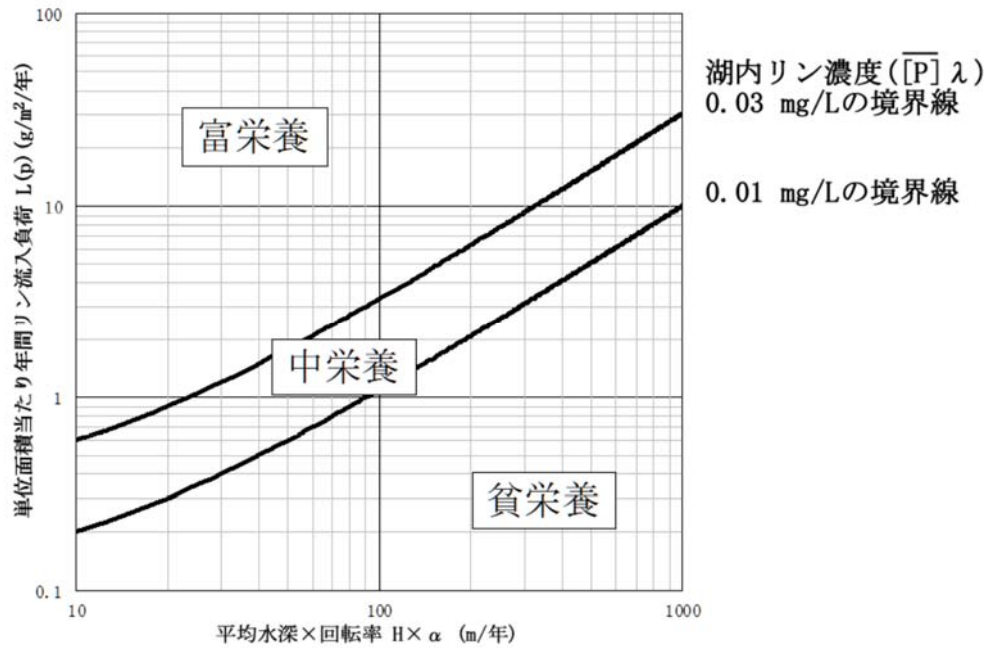


図 12 Vollenweider モデル

ケーススタディを行ったダムについてみると、A ダム・B ダムについては水質観測時の流量データを用いて、C ダムについては水質観測時の流量データがなかったため、平均水深・回転率・流量のそれぞれについて全観測値を平均した値を用いてモデル上にプロットを行ったところ、図 13 に示すとおりとなった。

ケーススタディを行ったダム貯水池は、いずれも中栄養から高栄養のダム貯水池に分類され、富栄養化の問題が生じる可能性が高いと評価された。

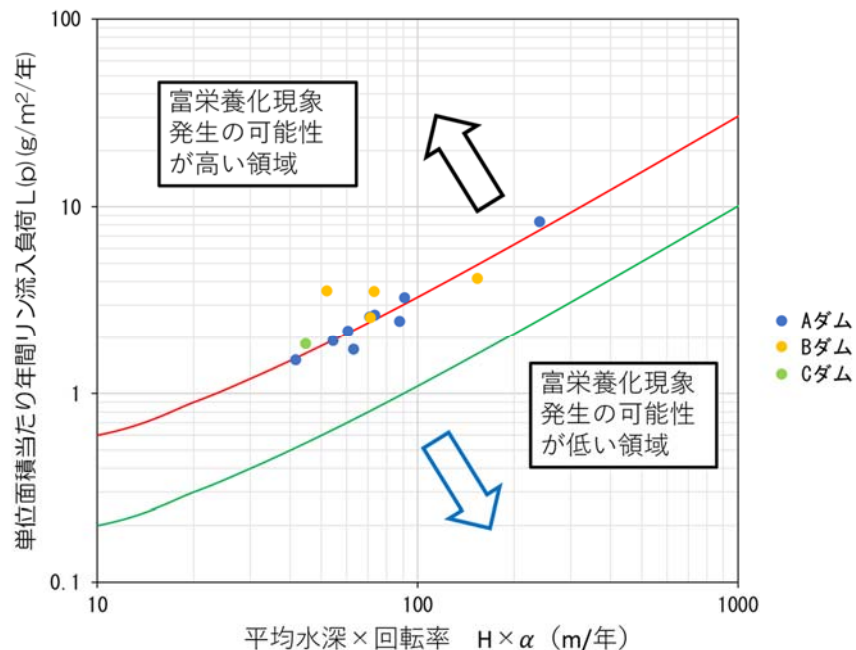


図 13 ケーススタディダムの Vollenweider モデル計算結果

2.2.2 その他の概略的予測手法

Vollenweider モデルにより、富栄養とは判定されないが、中栄養と判定された場合、以下に示す解析・予測手法例を用いて富栄養化の予測を行い、Vollenweider モデルの予測結果と併せて富栄養化の評価を行い、環境影響評価書を取りまとめる。

(1) 類似事例の引用による解析・予測手法

類似事例及び当該ダム流入負荷量（流入窒素濃度、流入リン濃度）等から、富栄養化の程度を判定する。

流入負荷量は、流入量と流入水質の濃度の積により得られる数値であり、平常時と出水時の負荷特性の違いを考慮し、平常時及び出水時に流入量と流入水質を測定した上で、流入負荷量を算出することが重要である。通常は、流量とリン濃度の関係を統計的に整理した流量に対する流入負荷量の関係を示した L-Q 式を作成し、予測する。

L-Q 式（流入負荷量式）の作成にあたっては、幅広い流量規模における調査データがあることが望ましく、ダム貯水池の水質状況等を踏まえ、L-Q 式（流入負荷量式）の作成において把握されていない出水規模の範囲を抽出し、調査を行い、作成することが望ましい。

流入河川の各調査項目の濃度と測定時の流量から、流入負荷量（ $L = \text{濃度} \times \text{流量}$ ）を算出し、対数目盛で、横軸に流量若しくは比流量（ Q ）を、縦軸に流入負荷量（ L ）をとり、両者の関係図を作成する。この図には平水時のデータも加える。L-Q 式（流入負荷量式）は、以下の近似式で定義されており、 a と b を求めることにより流量により流入負荷量を予測することが可能となる。

$L = a \times Q^b$ ここに、 L ：単位時間あたりに流入する負荷量（g/s 又は kg/s）

但し、 Q ：流量（ m^3/s ）

類似事例の解析の一例である全国の農業用ダムのかんがい期における流入窒素・リンの負荷量及び流入濃度と湖内表層の全窒素・全リンの濃度との関係（図 14）をみると、類似したダム貯水池では流入負荷量及び流入濃度と湖内水質との間には関係がある場合があり、特に流入濃度と湖内水質との相関が高い場合がある。このような類似事例を用いてダム貯水池の水質を判定することが可能である。この類似事例を用いた予測では、かんがい期の流入流量と流入負荷量から流入濃度（ $[M] = L / Q$ ； $[M]$ は流入全窒素濃度あるいは流入全リン濃度）を求め、富栄養化の階級（表 1）等から富栄養化現象が起こるかどうか判定する。なお、図 14 で示す通り、流入濃度と湖内の窒素濃度との関係は比較的高いが、それでもばらつきがみられていることに留意が必要である。

周辺の既設ダムの事例などから流入負荷量から湖内の水質を判定するためには、ばらつきがある場合はそれが生じる要因を明らかにする必要があるが、明らかに貧栄養、中栄養となる場合は、アセスメント段階では数値シミュレーションによる水質予測は実施せず、

上述した Vollenweider モデル等統計的手法による解析・予測の結果及び類似事例、統計的手法等による予測の結果に基づき、影響評価を取りまとめる。

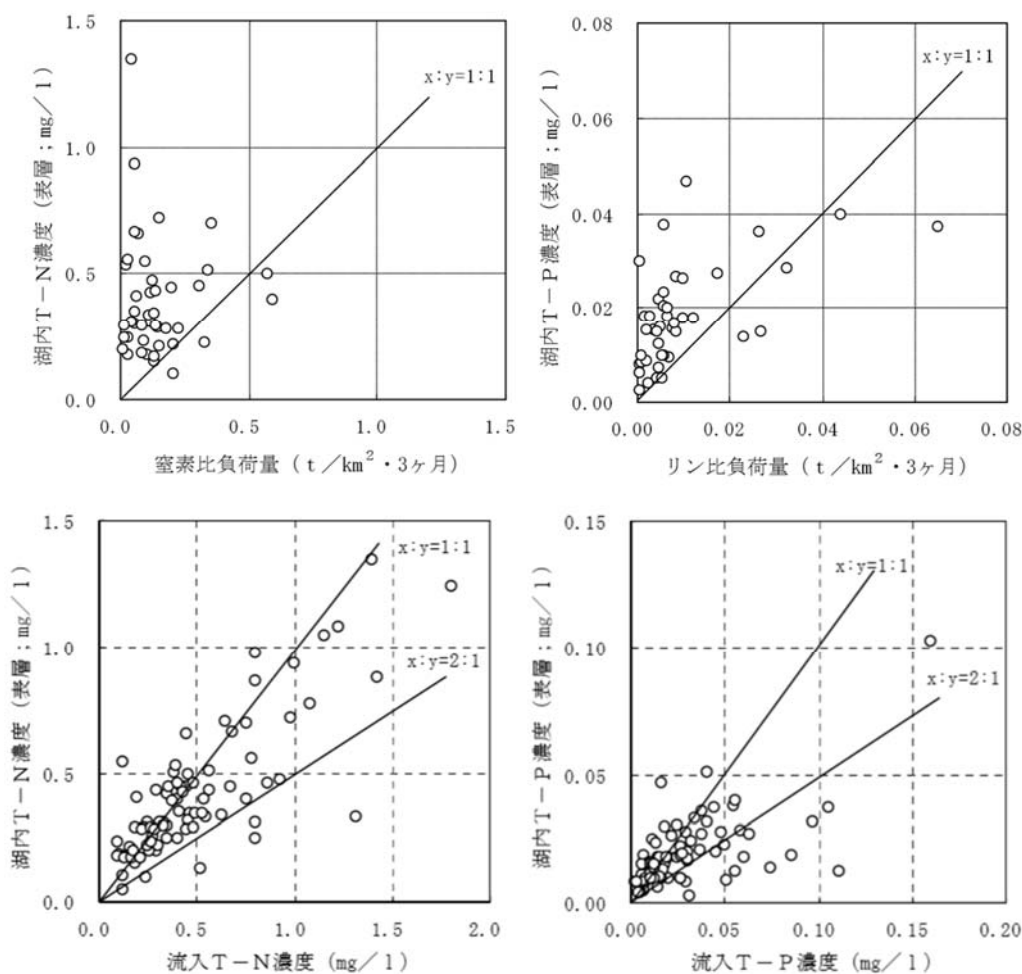


図 14 流入負荷量、流入濃度と湖内水質の解析事例

(全国農業用ダム貯水池のかんがい期)

出典：農林水産省農村振興局農村環境課「ダム事業における環境影響評価に係る主務省令の解説」(平成 29 年 3 月)(図Ⅲ-2-27, 2-28 p. 3-155)

(2) 年平均回転率による解析・予測手法

藻類の増殖は湖沼の水理特性等の影響を受けるが、とりわけ重要なものは水の滞留の程度であり、藻類(プランクトン)が生息するのは平均的な水の滞留時間($T_w = 1/\alpha$, α は(2)の回転率を使用する)がほぼ 3~4 日以上の湖沼であると考えられる。水の滞留時間を 3~4 日としたことは、多数のダム貯水池における水の滞留時間とプランクトンの種類数との関係を見ると、平均的な滞留時間が 3~4 日以上のダム貯水池では固有のプランクトンが出現することが認められること(森下: 1978)に加え、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ことに基づくものである*1。

このことから、以下の年平均回転率と 7 月平均回転率*2 とともに 100 回を上回る場合は、富栄養化現象が発生しないと判定される。

$$\text{年平均回転率} \quad \alpha (\text{年平均回転率}) = Q / V \quad \text{式(1)}$$

$$\text{7 月平均回転率} \quad \alpha_7 (\text{年平均回転率に換算}) = Q_7 / V \quad \text{式(2)}$$

但し、 Q ：年間総流入量、 Q_7 ：7 月の月間総流入量、 V ：貯水容量。

また、供用後のダム貯水池における成層形成の状況を予測・評価することにより、水塊の鉛直混合がどの程度阻害されるかを把握し富栄養化の可能性を評価することは可能である。上記の年平均回転率と成層形成の状況を整理すると表 10 となり、年平均回転率(式(1))から成層型を判定することが可能である。混合層型であると全層循環し、プラクトンの増殖が生じず富栄養化現象による影響は生じないと判定される。 α 、 α_7 は利水や出水時の放流状況に大きく影響されるため、対象とする年や期間によっても結果が大きく異なる可能性がある。そのため、年平均回転率は、Vollenweider モデルと同様に計画基準年を用いて計算するが、より長期間（30 年間程度）の回転率を計算し、評価することが望ましい。

表 10 ダム貯水池の成層の形成と富栄養化現象との関係

指標条件		滞留しにくい水域	滞留しやすい水域
水質等の現象面	夏季クロフィル a 濃度の上昇	プランクトンは増殖せず、クロフィル a 濃度は低い	プランクトンの増殖によりクロフィル a 濃度が上昇
	溶存酸素の消費	主に BOD 成分の分解により DO が消費される	BOD・COD 成分の分解により DO が消費される
	富栄養化に伴う利水障害	富栄養化現象による影響（障害）は発生しない	アオコの発生等により利水障害を生じることがある
構造的側面	水深	浅い	深い
水理学的側面	成層の形成	混合型（全層循環）	成層型
	流速	3cm/s 以上	1cm/s 以下
	回転率 ¹⁾	$\pi_1 > 20$ （混合型）	$\pi_1 < 10$ （成層型）

注 1)： π_1 ＝年間総流入量／ダム貯水池総容量（出典：高橋裕「河川工学」（東京大学出版会、1990））

*1: 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。また、一般に、富栄養化が問題となる滞留時間の目安は 2 週間以上とされている（出典：岩佐義朗編著「湖沼工学」（山海堂、1990））。

*2: 年回転率が小さいダム貯水池は成層化しやすい、水温躍層が最も大きくなる夏季（7 月）はダム貯水池では鉛直混合が起こらず交換量が小さくなるため成層が形成される可能性が高まることから、成層形成の可能性を判定する指標として年回転率（ α ）とともに 7 月回転率（ α_7 ）が採用されている。

2.3 数値シミュレーションモデルを用いた水質の予測

概略予測の結果、富栄養化の可能性が懸念された場合には、適切な数値シミュレーションモデルを選定し、より詳細な将来予測を行う。

シミュレーションモデルに必要な入力データとして、水の流動に係る事項、富栄養化に係る事項、気象に係る事項について通年の情報を収集する必要がある、不足する場合には現地調査を実施する。

【解説】

概略予測の結果、富栄養化の可能性が予測された場合には、「水理モデル」と「富栄養化モデル」から構成される数値シミュレーションモデルにより詳細な将来予測を行うことが一般的である。数値シミュレーションモデルは、富栄養化に関連のある物理・水環境をモデル化するため、2.3.3 に示す調査項目のデータを収集する必要がある。収集したデータを元に、数値シミュレーションを構築して富栄養化の程度やそれによる影響を表現する。数値シミュレーションモデルには様々な種類のモデルが存在し、その選定にあたっては高度な技術的な判断が必要となる。

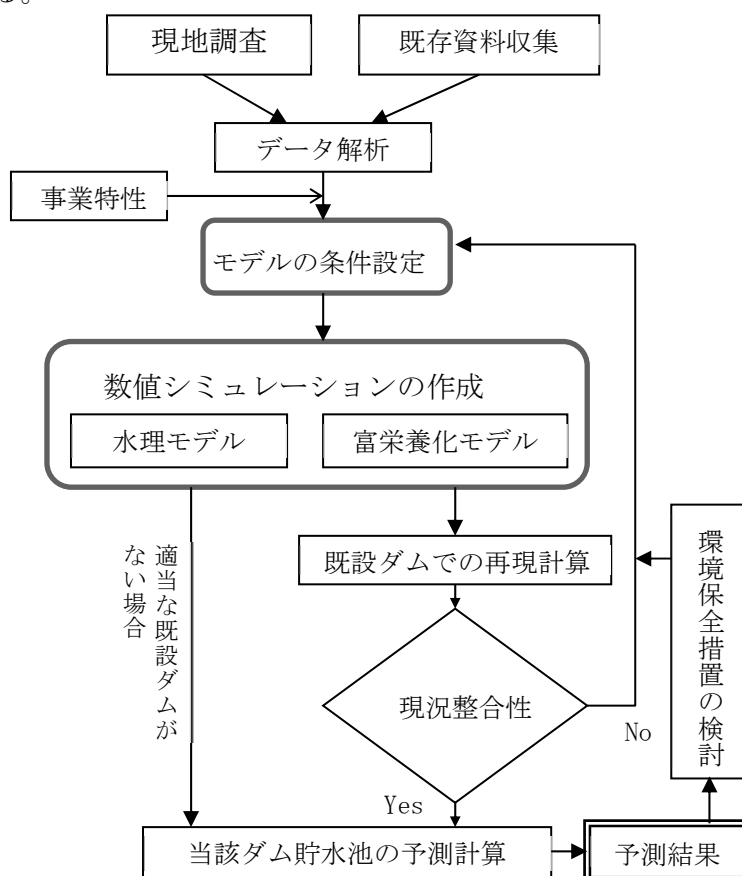


図 15 数値シミュレーションの手順

出典：農林水産省農村振興局農村環境課「ダム事業における環境影響評価に係る主務省令の解説」（平成 29 年 3 月）（図Ⅲ-2-34, p. 3-165）

2.3.1 数値シミュレーションとは

(1) 数値シミュレーションの概要

富栄養化現象の予測にあたり活用する数値シミュレーションは、ダム貯水池水の流動等の水理的メカニズムを数値モデル化するとともに、富栄養化現象の主体である植物プランクトンの増殖・呼吸・分解等の生化学的現象等を同時に数値モデル化し、時間経過とともに変化する水質の将来予測を行い、将来の富栄養状態及びそれによる影響を予測するものである。

数値シミュレーションは2つのモデルが結合したものであり、水理的メカニズムをモデル化したものを「水理モデル」、生物化学的メカニズムをモデル化したものを「富栄養化モデル」と呼び、両モデルを連成して計算を行う。

「水理モデル」については、流体力学を基礎として広く一般に使われているモデルが多くあり、ダム貯水池水の流動を比較的精度高く再現することが可能である。

一方、「富栄養化モデル」は、予測対象とする水質項目から「物質循環モデル」と「生態系モデル」に区分されるが、近年のダム貯水池の富栄養化予測においては、植物プランクトンの季節変化など現実に即した状況が再現しやすいため、生態系モデルが多く用いられている。

「生態系モデル」の中でも、魚類等の大型の捕食者を含む高次生態系モデルは構築・検証が難しいことから、低次生態系モデルを構築することが一般的であり、生物生産、死滅、沈降等は扱うものの、高次の捕食者や種間競争の影響は扱っていない。低次生態系モデルは、植物プランクトンを藍藻類、珪藻類、緑藻類の藻類種ごとにモデル化し、種間競合について一部概念的な影響を考慮したモデルもある。プランクトン個体の生理生態やプランクトン種間の相互作用など明らかになっていないことが多く、モデルの精度・再現性に課題が残されていることから使用に当たっては留意する必要がある。

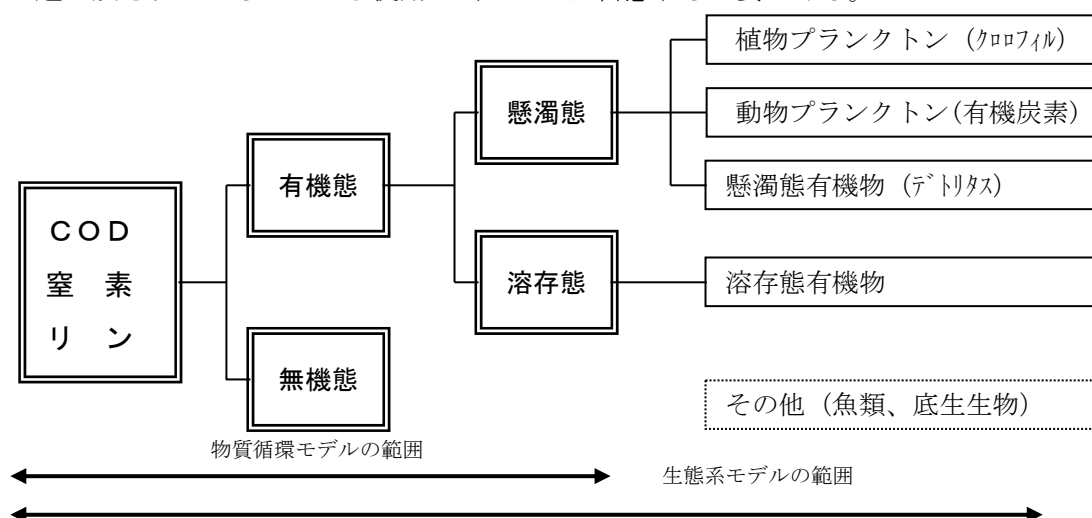
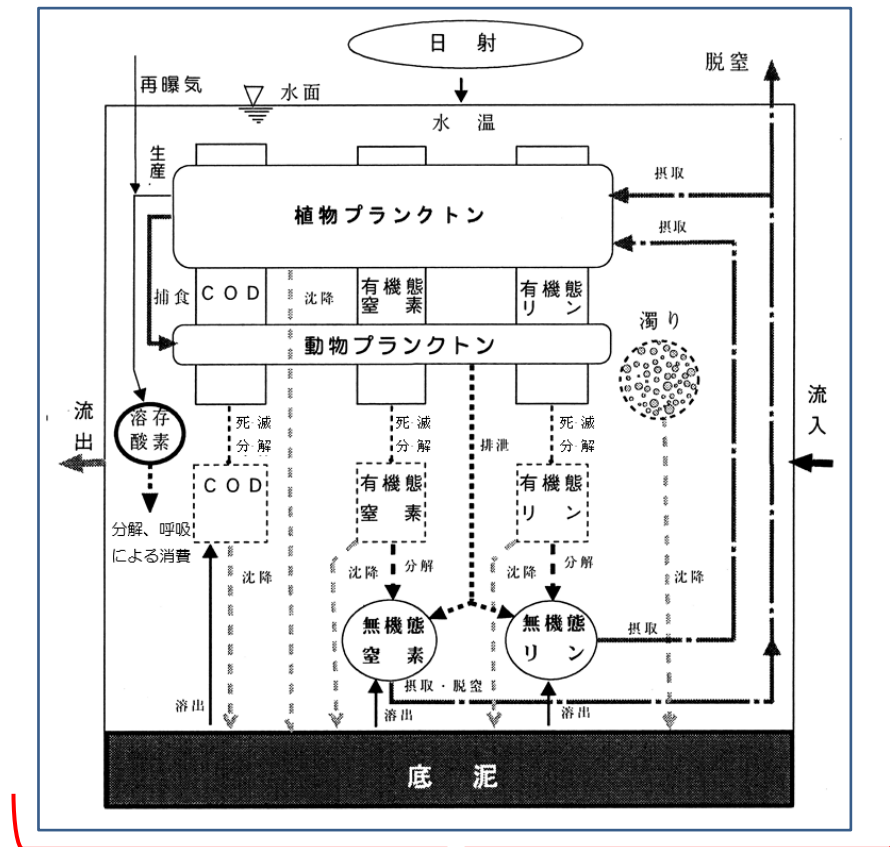


図 16 富栄養化モデルの区分と水質項目

【富栄養化モデルの概念図】



【水理モデルのメッシュイメージ】

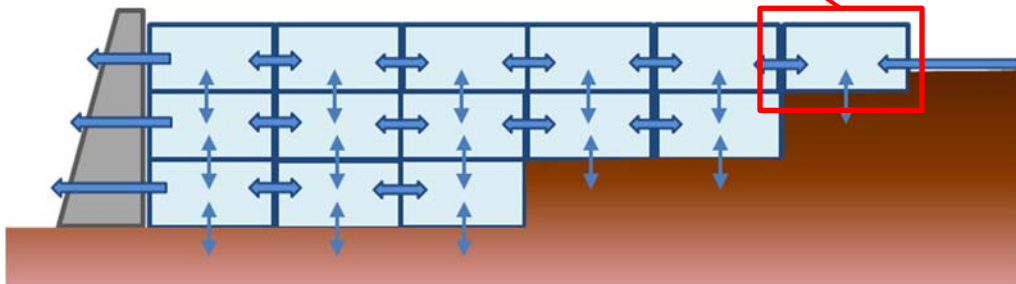


図 17 数値シミュレーションのイメージ

(2) 数値シミュレーションの水理モデルの種類

ダム貯水池の流動現象や水質現象を再現・予測するために利用される数値シミュレーションモデルには、ボックスモデル、1次元モデル、2次元モデル及び3次元モデルに大別することができる(図18、表11)。

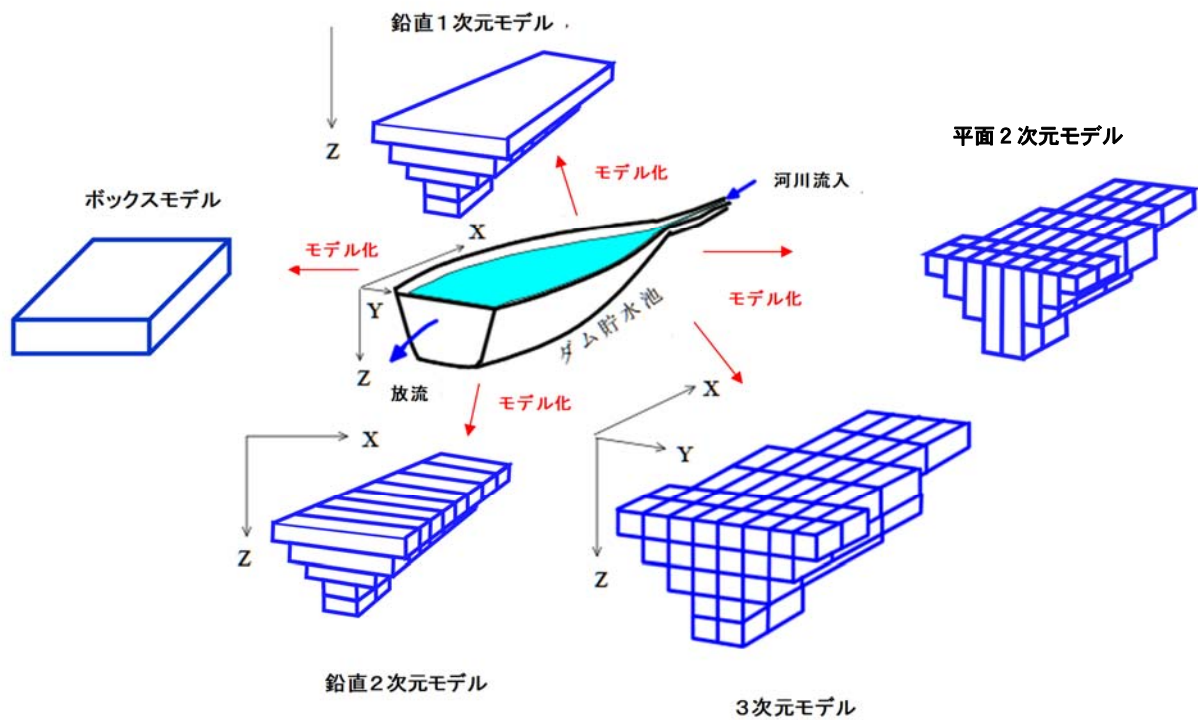


図 18 ダム貯水池のモデルの種類とモデル化のイメージ

数値シミュレーションは、実際の流動・水質現象に対応した具体的な対策の効果を把握するために必要な水理モデルの選定が行われることがほとんどであり、高度な技術的判断が必要となる。

表 12 に示す通り環境保全措置の効果を評価する場合では、具体的な水質保全対策ごとに予測に適用可能なモデルが異なる。

表 11 数値シミュレーションモデルの種類（湖沼における水理・水質管理の技術に加筆）

モデルの種類	ボックスモデル	鉛直 1 次元モデル	平面 2 次元モデル	鉛直 2 次元モデル	3 次元モデル
特徴	・水理量は収支のみ ・水質はボックスの平均値	・水域を鉛直方向に層に分割し、水理量・水質の鉛直分布を計算 ・水理量・水質は層毎に求められるが、水平方向の分布は一樣とみなしている	・水域を縦断・横断方向にメッシュ分割し、水理量・水質の分布を計算 ・水理量・水質はメッシュ毎に求められるが、鉛直方向の分布は一樣とみなしている。	・水域を縦断・鉛直方向にメッシュ分割し、水理量・水質の縦断・鉛直分布を計算 ・水理量・水質はメッシュ毎に求められるが、横断方向の分布は一樣とみなしている。	・水域を縦断・横断・鉛直方向にメッシュ分割し、水理量・水質の 3 次元分布を計算 ・水理量・水質の 3 次元的な分布が求められる。
適用できる水域の条件	・ボックス内での水質分布が一緒とみなせるダム貯水池 ・流動の時間変化の影響をある程度無視できる。	・水平方向の水質分布が一樣とみなせるダム貯水池 ・水平方向の流動の時間変化の影響がある程度無視できるダム貯水池 ・比較的形状が単純なダム貯水池	・鉛直方向の水質分布が一樣とみなせるダム貯水池（例えば、広く浅いダム貯水池） ・鉛直方向の流動の時間変化の影響がある程度無視できるダム貯水池 ・入り江があるような形状が比較的複雑なダム貯水池	・縦断・鉛直方向に水質変化が生じるダム貯水池（例えば、河川のように細長いダム貯水池） ・横断方向の流動の時間変化の影響がある程度無視できるダム貯水池 ・支川が枝分かれするような形状が比較的複雑なダム貯水池でもある程度適用可能	・水平方向、鉛直方向に水質分布が生じるダム貯水池（例えば、密度流の生じるダム貯水池、水深の大きなダム貯水池） ・平面形状が複雑なダム貯水池 ・支川が枝分かれするような形状が比較的複雑なダム貯水池でも適用可能
計算対象	・水質のボックス内平均値 ・水面における熱交換 ・物質収支（流入出＋沈降） ・底質からの負荷は考慮可能	・水質のメッシュ内平均値 ・水面における熱交換 ・水理量、水質の鉛直分布 ・物質収支（流入出＋沈降） ・メッシュ間の移流・拡散 ・底質からの負荷は考慮可能	・水質のメッシュ内平均値 ・水面における熱交換 ・水理量、水質の水平分布 ・物質収支（流入出＋沈降） ・メッシュ間の移流・拡散 ・底質からの負荷は考慮可能	・水質のメッシュ内平均値 ・水面における熱交換 ・水理量、水質の縦断及び鉛直分布 ・物質収支（流入出＋沈降） ・メッシュ間の移流・拡散 ・底質からの負荷は考慮可能	・水質のメッシュ内平均値 ・水面における熱交換 ・水理量、水質の 3 次元分布 ・物質収支（流入出＋沈降） ・メッシュ間の移流・拡散 ・底質からの負荷は考慮可能
長所	・計算時間が非常に短い ・長期的な水質予測が可能	・計算時間が短い ・長期的な水理量・水質予測が可能	・計算時間が 3 次元モデルより短い ・中期的（1～数 10 年）な水理量・水質予測が可能 ・風による流れを考慮できる。	・計算時間が 3 次元モデルより短い ・中期的（1～数 10 年）な水理量・水質予測が可能 ・密度流による流れを考慮できる。 ・水温成層を制御するような対策の検討が可能	・現象の 3 次元把握が可能 ・局所的な水理量・水質の特徴が表現できる。 ・密度流や風による流れ等を考慮できる。 ・より複雑な湖内対策施設の配置計画検討が可能
短所	・全層混合を仮定しているため水温成層が形成されるダム貯水池には適さない。 ・空間的な水質分布を表現できない。 ・流動変化の影響は考慮しにくい。	・平面的な水質変化の把握ができない。 ・局所的な現象が表現しにくい。	・鉛直方向の水質変化が表現できない。 ・水温成層が形成されるダム貯水池には適さない。	・横断方向の水質変化が表現できない。 ・吹送流など横断方向に分布が生じる流動を表現できない。	・3 次元メッシュ分割を行うため、膨大な計算時間を要する。 ・中～長期計算には不向き。
適用できる水質変化現象及び主な対策	[現象] ・富栄養化 [対策] ・底泥浚渫効果予測	[現象] ・冷・温水 ・濁水長期化 ・富栄養化 [対策] ・選択取水設備の効果予測 ・曝気循環設備の効果予測 ・底泥浚渫効果予測	[現象] ・富栄養化 [対策] ・底泥浚渫効果予測	[現象] ・冷・温水 ・濁水長期化 ・富栄養化 [対策] ・選択取水設備の効果予測 ・フェンス ^{注)} の効果予測 ・曝気循環設備の効果予測 ・底泥浚渫効果予測	[現象] ・冷・温水 ・濁水長期化 ・富栄養化 [対策] ・選択取水設備の効果予測 ・フェンス ^{注)} の効果予測 ・曝気循環設備の効果予測 ・底泥浚渫効果予測
備考	・ボックス内での全層混合を仮定するため、鉛直方向の水温・水質の違いを利用する選択取水や曝気循環等の対策の表現が困難である。	・1 層内での水平方向の水質変化を一樣と仮定するため、流下方向の流れを利用するフェンス ^{注)} 等の対策の表現が困難である。	・1 メッシュ内での全層混合を仮定するため、鉛直方向の水質の違いを利用する選択取水や曝気循環等の対策の表現が困難である。 ただし、水深が浅く、鉛直方向の変化が小さいダム貯水池や入り江部等では、流入水の縦断・横断方向の進出状況等の確認に対応できる。	・縦断・鉛直方向の水質変化を表現可能であり、鉛直方向の水質の違いを利用する選択取水や曝気循環、縦断方向の水塊の分離を利用するフェンス ^{注)} 等の対策の表現が可能である。 ・水理解析ルーチンの高度化やメッシュ分割の細密化により計算時間が増大する場合もある。	・縦断・横断・鉛直方向の水質変化を表現可能であり、鉛直方向の水質の違いを利用する選択取水や曝気循環、縦断方向の水塊の分離を利用するフェンス ^{注)} 等の対策の表現できるほか、横断方向の水質変化が表現可能であり、水質保全設備の配置もより詳細に表現できる。 ・流入支川と取水地点の位置関係により横断方向の移流拡散状況を把握する必要がある場合に対応が可能である。 ・モデルパラメータの設定範囲等の知見が十分でなく、精度確保のため調査、設定作業が多くなる。

注）出水時の濁水や栄養塩類に富んだ流入水を深層部に導水するための設備

出典：湖沼技術研究会「湖沼における水理・水質管理の技術」（平成 19 年 3 月）p4-5 表 4.2.1 を元に加筆

表 12 使用目的に応じた数値シミュレーションモデルの活用事例

使用目的	具体的な対策	ボックス	鉛直 1 次元	平面 2 次元	鉛直 2 次元	3 次元	モデル選定 フロー*)
流況・水質の現況再現計算 流況・水質の将来予測計算		○	○	○	○	○	判定①
環境保全措置の 効果評価	< 湖内水質保全対策の検討及び効果予測 >						
	・池干し	○	○	○	○	○	判定①
	・フェンス・浮島		△	○	○	○	判定②
	・アオコ回収・処理	△	△	○	○	○	判定②
	・水位低下	△	○		○	○	判定③
	・遮光	△	○		○	○	判定③
	・曝気・攪拌		○		○	○	判定③
	・浚渫・底質改善／固化		○		○	○	判定③
	・流動対策				○	○	判定④
	< 流動対策の効果予測 >						
	・選択取水		○		○	○	判定③
	・放流量の調整	△	○	△	○	○	判定③
	< 流域汚濁負荷削減対策による効果予測 >						
	・副ダム、バイパス	○	○	○	○	○	判定①
	・流入河川の水質浄化	○	○	○	○	○	判定①
	・流域負荷削減	○	○	○	○	○	判定①

注：○は適用可能なモデル、△は場合によっては適用可能なモデル

*) 図 19 シミュレーションモデル選定において適用する判定フロー

2.3.2 モデル選定の考え方*

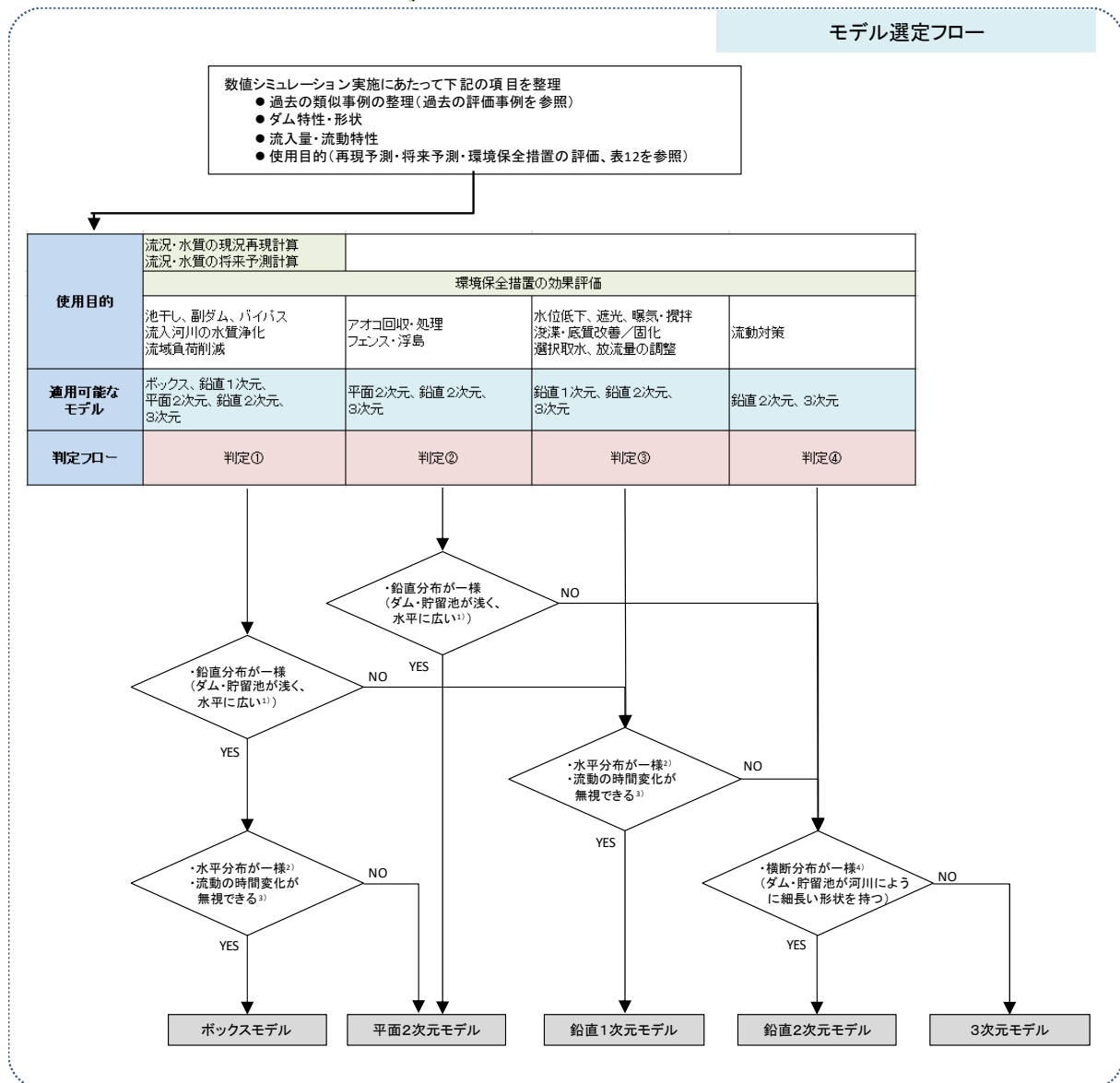
数値シミュレーションでは、使用する数値モデルの構築やモデルによる計算等に相応の時間やコストを要する。また、複数条件での計算や再計算が必要になれば、それに応じて必要な時間やコストは上乗せされることとなる。従って、モデルによる計算を効率的、かつ過不足なく実施するために、ダムの特・特性・構造等や使用目的（具体的な対策）を考慮してモデルを選定・構築する必要がある。

モデル選定にあたっては、高度な技術的判断が必要となるが、簡易的にモデルを選定する手法として、図 19 にフロー図を示す。まず、対象とするダムの特性や形状、流入量や流動等の水理特性を整理し、他のダム貯水池における対策と評価事例等を参考として、対象ダムにおいて将来的に実施可能な環境保全措置を検討する。次に、表 12 の使用目的（具体的対策）を参照し、モデル選定フローの判定区分を確認し、判定フローに従って最適となるモデル選定を行う。

選定結果として 2 次、3 次などの高次元モデルが選定された場合には、現況の再現性や予測精度の観点からは高次元のモデルを選定することが望ましいが、計算負荷も大きいことから、使用目的を考慮の上、選定されたモデルより低次元のモデルを用いて、パラメータや入力条件の感度分析を行うことによって、その予測結果を踏まえて評価することも可能ではある。

*： 当該節は、2.2 概略的な予測 で記載した図 10（p. 21）のフローからの継続説明であるので、必要に応じて 2.2 の内容を参照されたい。

図 10



注：

1) 「浅い」の判断の目安：水深 10m 以下^{*1}、「広い」の判断の目安： $L^2/D_L \gg H^2/D_H$ ^{*2}

2) ダム・貯留池の水平形状が単純（流れの分離や再循環帯がある場合）
その流れ領域の重要な構成部分は、1次元的なモデルでは再現できないため。

3) 判断の目安： $20 > L/D_L$ ^{*3}

4) 判断の目安： $20 > L_w/D_L$ ^{*3}

但し、L：ダムの代表的長さ、 L_w ：ダムの代表的幅、H：ダムの平均水深、 D_L ：水平拡散係数、 D_H ：鉛直拡散係数

図 19 シミュレーションモデル選定フロー（判定番号は 12 に該当）

*1高村 義親，岡田 光正「農業土木技術者のための水質入門（その 4）」，農業土木学会誌，52（11）p. 1013-1019，1984.

*2村岡 浩爾，福島 武彦，「ボックスモデルを用いた水質予測方式に関する研究」，土木学会論文報告集，（336）p. 85-94，1983.

*3 例えば，M. Pannone（2010），WATER RESOURCES RESEARCH，46，W08534；Taylor，G. I.（1954），The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe，Proc. R. Soc. London，Ser. A，223，446-468.

2.3.3 数値シミュレーションによる予測手順

(1) 数値シミュレーションの流れ

将来予測に当たっては、図 20 に示す通り、類似している既存ダムを対象として、選定したモデルを用いて流動・水質の現況再現計算を行い、現状再現結果によってモデルの妥当性を確認することが望ましい。また、ダム改修の場合は改修前のダムでの現況再現計算を行い、再現性の検証を行う。

将来予測計算は、現況再現計算によって再現性が確認されたモデルのパラメータを用い、設定された環境保全措置等の将来条件で行う。

将来予測計算結果で得られた値が評価基準を満たさない場合には、評価基準を満足し得る環境保全措置等を再検討し、その保全措置を講じた場合における将来予測計算を行い、評価基準を満足するか効果となることを確認する。

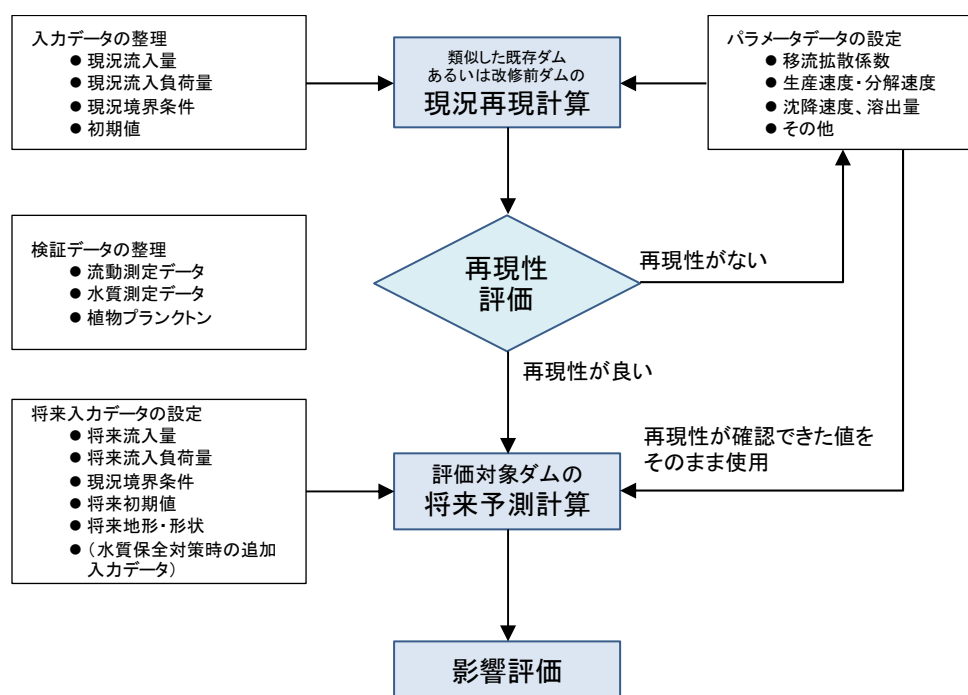


図 20 ダムアセスにおける予測計算フロー

(2) パラメータを選定・同定するために必要となる主な観測データ

調査すべき項目は、新規ダムの場合は表 13(1)、既存ダムの場合は表 13(1)のとおりである。各項目は、数値シミュレーションモデルを実施する上で必須の項目である。調査を実施する地点は、ダム貯水池に対する流入河川、新規建設ダムについてはダムサイト予定地点、既存ダムの再開発については、ダム貯水池内基準点（ダム貯水池内最深部、環境基準点等各ダムにより異なる）について実施する。

また、調査すべき情報の調査期間については、原則として以下の考え方に基づく。富栄養化現象に係る予測を数値シミュレーションモデルで検討する場合には、富栄養化現象の発生が気象等の影響を受けることを踏まえ、季節変動が把握できる通年の情報を得ることを原則とし、既存資料により必要データが得られない場合は、現地調査を行って必要な情報を収集する必要がある。

様々な気象・水象条件下の予測を行う場合は、気象に係る項目については 10 年以上の日・時間単位の測定データが必要である。複雑なモデルを用いて将来予測を行う場合には、モデルの妥当性の検討は、1 年間の現況では十分でない可能性が考えられる。これは、モデルに係る諸係数が数多くあるために、1 年間の水質を再現できるパラメータの組合せは 1 つに限定されるものではない可能性が考えられるためである。特に、事業期間が長く、将来の予測時点が現況から大きく離れ、負荷量等の条件が大きく変化する可能性がある場合は、過去に遡った期間での再現性を検討し、予測精度を高めるような考え方を取り入れることに留意が必要になる。

表 13(1) 調査項目及び調査期間等（新規建設ダム）

調査項目		調査地点	調査深度	調査期間等
水の流動	水温	・ダム建設予定地 ・流入河川	・ダム建設予定地、 流入河川では1層(2割水深)	原則として月1回以上の頻度で1年以上
	濁度			
	S S			
	粒度分布	・流入河川	・流入河川で1層(2割水深)	
	流量 ^{注1}			
水質	COD	・ダム建設予定地 ・流入河川	・ダム建設予定地、 流入河川では1層(2割水深)	原則として月1回以上の頻度で1年以上
	T-P(全リン)			
	DIP(無機態リン) ^{注2}			
	O-P(有機態リン) ^{注3}			
	T-N(全窒素)			
	DIN(無機態窒素) ^{注4}			
	O-N(有機態窒素) ^{注5}			
	DO			
	クロロフィルa			
気象	気温	・ダム建設予定地 又はその周辺の 気象観測所等 ^{注6}	—	毎正時の連続測定を原則1年以上
	風速、湿度、雲量、日射量			
	降水量			

注1：ダムサイト予定地への総流入量（流入河川が複数ある場合は河川別）を把握するほか、流入河川における水質調査時の流量。

注2：通常、溶存態のPO₄-P(オルトリン酸態リン)を無機態リンという。

注3：有機態のリンを意味し、T-PからDIPを差し引いたもの。

注4：溶存態のNO₃-N、NO₂-N、NH₄-Nの合計である。

注5：有機態の窒素を意味し、T-NからDINを差し引いたもの。

注6：周辺の気象観測所の測定データを使用する場合は、ダム建設予定地の近傍で短期に測定したデータに基づき補正することが望ましい。

注7：国土交通省河川砂防基準に示されている流量観測手法に従う。

表 13(2) 調査項目及び調査期間等（既存の再開発ダム）

調査項目		調査地点	調査深度	調査期間等
水の流動	水温	・ダム貯水池内基準点 ・流入河川 ・放流口地点	・ダム貯水池内基準点は原則 0.1m, 0.5m, 1m 以下 1m 毎 ・流入河川、放流口地点では1層(2割水深)	原則として月1回以上の頻度で1年以上
	濁度			
	S S			
	粒度分布	・流入河川	・流入河川で1層(2割水深)	
	流量 ^{注1}		— ^{注7}	
水質	COD	・ダム貯水池内基準点 ・流入河川 ・放流口地点	・ダム貯水池内基準点は原則 0.1m, 0.5m, 1m 以下 1m 毎 ・流入河川、放流口地点では1層(2割水深)	原則として月1回以上の頻度で1年以上
	T-P(全リン)			
	DIP(無機態リン) ^{注2}			
	O-P(有機態リン) ^{注3}			
	T-N(全窒素)			
	DIN(無機態窒素) ^{注4}			
	O-N(有機態窒素) ^{注5}			
	DO			
	クロロフィル a			
気象	気温	・ダムサイト又はその周辺の気象観測所等^{注6}	—	毎正時の連続測定を原則1年以上
	風速、湿度、雲量、日射量			
	降水量			

注1：ダム貯水池への総流入量、放流量を把握するほか、流入河川における水質調査時の流量。

注2：通常、溶存態のPO₄-P(オルトリン酸態リン)を無機態リンという。

注3：有機態のリンを意味し、T-P から DIP を差し引いたもの。

注4：溶存態のNO₃-N、NO₂-N、NH₄-Nの合計である。

注5：有機態の窒素を意味し、T-N から DIN を差し引いたもの。

注6：周辺の気象観測所の測定データを使用する場合は、対象ダムの近傍で短期に測定したデータに基づき補正することが望ましい。

注7：河川流量を測定する場合は、国土交通省河川砂防基準に示されている流量観測手法に従う。

水質のデータについては、毎時データのような密なデータを調査で把握することは手間・コストの面から現実的ではなく、1回/月程度の頻度で調査を実施する場合が多い。しかし、河川に流れ込む汚濁物質は、降雨時には平水時に比べ飛躍的に増加するため(図21 参照)、シミュレーションで再現する場の特徴を示す条件(境界条件)の一つとして流入水質を設定する場合は、降雨時のデータを適切に表現することが重要となる。したがって表13に示す定期的な調査に加え、降雨に伴う出水時を対象とする追加調査を行い、流量ごとの水質情報を充実させることが必要である。

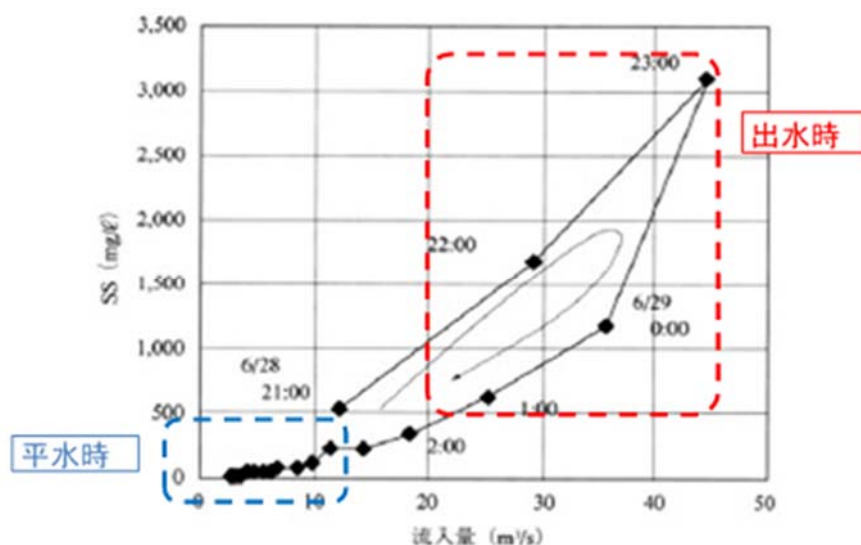


図21 流入水質の出水中の変化(SSの事例)

出典：塚原 他「カーテンウォール付き常用洪水吐きの土砂放流特性」(「土木技術資料」40-11、1998)

出水時調査は、表14に示すとおり実施することを基本とする。

なお、数値シミュレーションモデルで用いて富栄養化現象の予測を行う場合には、水質変化が日周変動であることを踏まえて、計算のタイムステップを日単位で行うことが多いが、前述のとおり出水時には大きな水質変化が短期間で生じることから、タイムステップを時間単位とすることも必要である。タイムステップを時間単位で実施する場合には、水質、流量、並びに気象データともに設定するタイムステップに合わせたデータを入手・整理することが必要である。

表14 定期調査及び出水調査の調査期間等

調査の種類	調査期間及び時期	備考
定期調査	原則として月1回以上の頻度で1年以上	—
出水時調査	複数回の出水を対象に、出水の立ち上がり期、ピーク期、減水期のそれぞれが把握できるように3回以上5回程度の調査を実施する。	少なくとも出水規模の異なる出水を対象にして、3回以上実施することが望ましい。

(3) 選定モデル別の主なデータ及びパラメータ

数値シミュレーションモデルを用いた水質予測には、2.3.3で示した調査項目を含む入力条件・データと検証データが必要となる。以下にボックスモデル及び1次元モデル・2次元モデル・3次元モデルごとにモデルの概要と必要となるデータ（入力データ及び検証データ）を説明する。

1) ボックスモデル

① モデルの概要

ボックスモデルは、完全混合（均一）であるとして、ボックス内での物質の増減を計算するモデルであり、汚濁負荷の流入・流出・溶出・沈降の他、懸濁態有機物の分解（溶存栄養塩類化）、植物プランクトン（藻類）の増殖・呼吸・枯死・沈降や高次生態系（動物プランクトン等）の捕食、呼吸・死亡等による水質変化をモデル化したものである。

底泥からの負荷がダムに及ぼす影響が大きい場合には、底泥内も多層に分割し、層間の物質の移動を考慮することができる底泥モデルを結合したモデルを使うことも可能である。

② 必要データ

ア 計算条件の設定

（ア）気象データ（気温、日射量等）

（イ）流入負荷量

流入負荷量は、流送能力型モデル、あるいはポルートグラフシミュレーションにより推定する。また、より詳細な地表流モデル、汚濁負荷モデル等により計算された負荷量を用いることもある。

（ウ）水収支（河川流入量、河川流出量、取水量、降水量、蒸発量等）

河川流入量および流出量は計画流入流出量により設定する。あるいは実測値を用いても良い。

イ 生態系モデルの設定

（ア）水質データ（COD、T-P、DIP、O-P、T-N、DIN、O-N、DO、クロロフィル a 等）

（イ）生態系モデルのパラメータ

モデル構造により入力するパラメータが異なるが、主なパラメータ・定数を以下に示す。パラメータは既存の文献による値等を参考にして設定するが、水域によって変動があるため、周辺の既設ダム等でのモデル再現計算などにより

適切な値を設定することが望ましい。

- ✓ 溶出速度定数（底泥モデルを使用する場合はウのデータが必要）
- ✓ 沈降速度定数
- ✓ 無機化分解係数
- ✓ 生産速度・呼吸速度・枯死速度

植物プランクトンの生産・呼吸・枯死については、増殖モデルを用いることが多い。増殖モデルの種類によって、入力パラメータが異なる。

- ✓ 高次生態系の捕食速度・呼吸速度・死亡速度
- ✓ 脱窒定数
- ✓ その他のパラメータ（上記以外に生態系モデルに必要な定数等）

（ウ）底質データ及びパラメータ（底泥モデルを使用する場合）

2) 1次元モデル・2次元モデル・3次元モデル

① モデルの概要

1次元モデル・2次元モデル・3次元モデルは、水理モデルと富栄養化モデルからなるシミュレーションモデルである。水理モデルでは、ダムの水平方向あるいは鉛直方向について、連続式および運動方程式を用いて流動を計算する。富栄養化モデルは、基本的にはボックスモデルと類似のモデルを用いるが、水平方向あるいは鉛直方向の物質等の移流・拡散について、移流拡散方程式により物質の濃度変化を計算する。

ボックスモデル同様、底泥からの負荷がダムに及ぼす影響が大きい場合には底泥内も多層に分割し、層間の物質の移動を考慮することができる底泥モデルを結合したモデルを使うことも可能である。

② 必要データ

ア 計算条件の設定

（ア）気象データ（気温、湿度、風向・風速、日射量、降水量等）

（イ）流入負荷量

流入負荷量は、流送能力型モデルおよびポルートグラフシミュレーションにより推定する。あるいは、より詳細な地表流モデル、汚濁負荷モデル等により計算された負荷量を用いることもある。

（ウ）水収支（河川流入量、河川流出量、取水量、降水量、蒸発量等）

河川流入量および流出量は計画流入流出量により設定する。あるいは実測値を用いても良い。

イ 水理モデルの設定

(ア) ダムの構造 (ダム幅、水深、流入河川位置、放流位置)

(イ) 水質データ (水温、濁度等)

(ウ) モデルパラメータ

- ✓ 渦動粘性係数
- ✓ 渦動拡散係数
- ✓ 水面での境界条件 (熱収支、風による吹送流)
- ✓ 面に関する境界条件 (せん断応力)

ウ 生態系モデルの設定

(ア) 水質データ (COD、T-P、DIP、O-P、T-N、DIN、O-N、DO、クロロフィル a 等)

(イ) 生態系モデルのパラメータ

モデル構造により入力するパラメータが異なるが、主なパラメータ・定数を以下に示す。パラメータは既存の文献による値等を参考にして設定するが、水域によって変動があるため、周辺の既設ダム等でのモデル再現計算などにより適切な値を設定することが望ましい。

- ✓ 溶出速度定数 (底泥モデルを使用する場合は (ウ) のデータが必要)
- ✓ 沈降速度定数
- ✓ 無機化分解係数
- ✓ 生産速度・呼吸速度・枯死速度

植物プランクトンの生産・呼吸・枯については、増殖モデルを用いることが多い。増殖モデルの種類によって、入力パラメータが異なる。

- ✓ 高次生態系の捕食速度・呼吸速度・死亡速度
- ✓ 脱窒定数
- ✓ その他のパラメータ (上記以外に生態系モデルに必要な定数等)

(ウ) 底質データ及びパラメータ (底泥モデルを使用する場合)

2.4 水質予測結果を踏まえた環境保全措置の検討

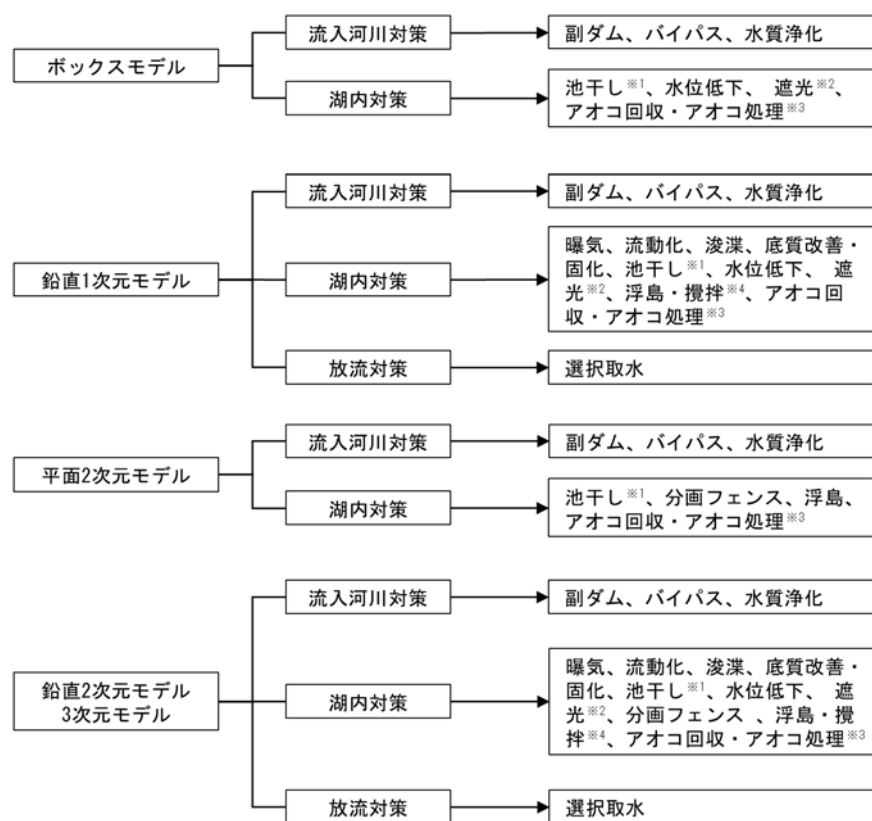
2.3.3 で構築したモデルにより、ダム供用時において富栄養化による影響が予想された場合には、環境保全措置として、水質保全を図る各種対策を行う。この対策は、流入河川対策、ダム貯水池内対策、放流対策に分類され、代表的な対策としては曝気循環、分画フェンス、選択取水等が挙げられる。

【解説】

水質保全対策は、2.3.3 で構築し予想された富栄養化の影響に応じて、図 19 及び図 22 に示す想定される水質保全対策に対応したモデルを選択し、効果検討のシミュレーションを実施する。また、検討に当たっては、表 12、15、16 に示す保全対策に関する資料も参考とする。

2.4.1 数値シミュレーションで検証可能となる主な環境保全措置

水質保全対策のシミュレーションにあたっては、環境影響評価時に想定されている運用条件等を設定し、想定する効果が発現するかを確認するための検証を行う必要がある。この検証過程において、具体的な対策内容の整理や、想定された運用条件の修正等を行い、環境保全措置として位置付ける水質保全対策を選定し、基本的な運用条件についても整理する。



※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 22 数値シミュレーションモデルと対応する水質保全対策

表 15 水質保全対策の例

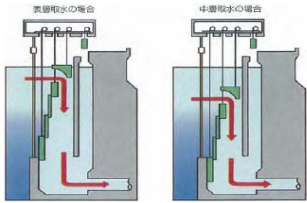
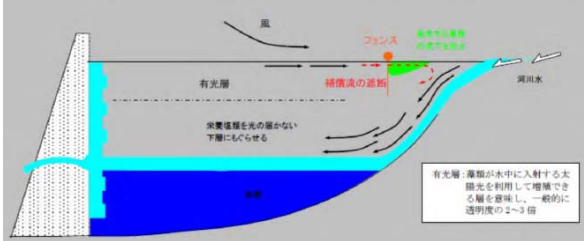
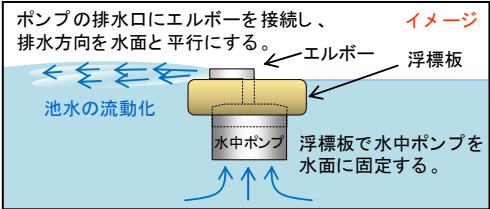
対策種別	対策例
選択取水設備	取水口の高さを変え、任意の層から選択的に取水し、アオコの発生している表層の水や、逆にアオコの発生していない中下層水を放流することで、ダム貯水池やその下流域への影響を回避  図 選択取水イメージ 出典：水資源機構 布目ダム管理所 布目ダムパンフレット
分画フェンス	- 栄養塩類濃度の高い流入水を無光層に導き、植物プランクトンの発生を抑制 - フェンスを設置することによりフェンス上流で発生した藻類が表層流や風により下流に流下することを防ぐ 
小規模な流動化装置	- 小規模な流動化装置によるダム貯水池内の水の循環・滞留改善 - アオコ原因藻類を分散しアオコを解消する効果 ＜小規模な流動化装置の事例：水中ポンプによる流動化＞ 
全層曝気循環装置・プロペラ式循環装置	全層曝気循環装置（写真左）やプロペラ式循環装置（写真右）によるダム貯水池内の水の循環促進 

表 16 水質保全対策一覧（その１）

種類	対策名	対応時		原理
		計画 段階	供用 段階	
流入 河川 対策	吸着法	—	◎	礫・木炭・波板・ひも等の接触材の表面に微生物を付着させ、微生物が水中の有機物を吸着・分解する作用により浄化を行う。主にＳＳ、リンの除去が期待できる。
	土壌処理法	○	◎	休耕田や河川敷用地等に設置した土水路等に流入水を引き込んで、水田や湿地における土壌の持つ分解・吸着能作用により浄化を行う。浄化原理がろ過であり、浄化水は清澄となるが、その分目詰まりが起こりやすく、定期的な土壌入れ替えなどのメンテナンスが必要となる。土、砂礫の種類によっては、窒素・リンの除去も期待できる。
	植生浄化法	○	◎	水生植物及び水生植物に付着した微生物による水中の懸濁物質※、栄養塩類（窒素・リン）の吸着・取り込み作用により浄化を行う。水生植物の除去により、生体内に吸収された栄養塩類が除去できる。 ※水中の濁りの原因物質のこと。濁質ともいう。濁りの原因物質としては、粘土などの無機系物質や、微生物や生物による分解物質などの有機系物質がある。
貯水 池内 対策	副ダム P. 参考-2 参照	◎	○	ダム貯水池の流入部に設置し、粒子性の栄養塩類を沈降させ、ダム貯水池への栄養塩類の流入を減らし、植物プランクトンの増殖を抑える。リン酸などの溶存性栄養塩類は除去できないが、凝集剤を添加して懸濁態物質に転換すれば沈殿除去することが可能となる。
	バイパス	◎	○	ダム貯水池内の濁度が高くなった場合に、ダム上流の濁度の低い水を下流に放流する「清水バイパス」、ダム貯水池内が濁水化するのを防止するために、出水期間中に濁水をバイパスさせ下流へ放流する「濁水バイパス」、ダム貯水池内に流入する排水などをダム貯水池の下流へバイパスし、富栄養化を防止する「富栄養化対策バイパス」などがある。アオコ対策としては、富栄養化対策バイパスが有効であるほか、濁水バイパスも懸濁態栄養塩類のダム貯水池流入を低減することができるため有効である。
	浅層曝気循環 P. 参考-2 参照	○	◎	ダム貯水池中層あるいは表層から空気を吐き出し、気泡の浮力により上昇流を生じさせ、ダム貯水池内に循環混合層を形成させる。これにより、表層水温の低下、植物プランクトンの有光層以深への引き込み、藻類の拡散などを生じさせ、表層における植物プランクトンの増殖・集積を抑制する。
	全層曝気循環 P. 参考-2 参照	○	◎	ダム貯水池内全体を曝気循環することで、深層水を表層に強制的に移動させ、全層を循環混合する。植物プランクトンの無光層への移動、表層水温の低下により、植物プランクトンの増殖抑制を図る。
	深層曝気 P. 参考-3 参照	○	◎	ダム貯水池の深層水に酸素を供給し、底質から鉄、マンガン、硫化水素及び栄養塩類などの溶出を抑制することで、赤水・黒水※の発生防止や、循環期における栄養塩類のダム貯水池全体への拡散防止を図る。 ※赤水は鉄を、黒水はマンガンを含んだ水で、それぞれ赤色、黒色に着色するためこのように呼ばれる。
	流動化 P. 参考-3 参照	○	◎	水流発生装置により流動の小さい湖水に水の流れを発生させて、水域を流動化・循環させ、停滞を改善する。水平方向もしくは鉛直方向の水流を発生させる装置がある。主に、ため池などの比較的小規模なダム貯水池で効果を発揮する。
	浚渫 P. 参考-3 参照	○	◎	栄養塩類濃度の高い底泥を浚渫・除去し、底泥からの栄養塩類の溶出量を抑制する。

表 16 水質保全対策一覧（その2）

種類	対策名	対応時		原理
		計画 段階	供用 段階	
貯水池内 対策	覆砂 P. 参考-3 参照	○	◎	ダム貯水池の底に堆積した土砂・ヘドロ等の底泥を砂で覆う。これにより、底泥から水中への栄養塩類等の溶出の抑制を図る。
	底質改善 底泥固化 P. 参考-3 参照	○	◎	薬剤等を底泥に投入または散布し、底質改善の場合は底泥中の有機物等を吸着・分解し、底泥固化の場合は底泥を固化（不溶化）する。底質改善・底泥固化いずれも、底泥からの栄養塩類・重金属類の溶出を抑制し、底泥巻き上げを抑制する。
	池干し P. 参考-4 参照	○	◎	ダム貯水池の底を空気にさらして乾燥・酸化分解させることで底泥からの栄養塩類流出を抑制する。また、日光に含まれる紫外線的作用や乾燥、温度上昇等により、湖底に沈降して堆積したアオコの原因藻類の殺藻、不活性化が期待できる。
	水位低下 P. 参考-4 参照	○	◎	ダム貯水池の水を放流し水位を低下させ、水の入替えを促進し、滞留時間を短縮（回転率を向上）させる。
	遮光 P. 参考-4 参照	○	◎	水面に遮光用のネット・シート等を浮かべ、植物プランクトンの増殖に必要な光を抑制する。ただし、完全遮光を行うとかえって水質が悪化する場合があることから、実施に当たっては注意が必要。
	分画 フェンス P. 参考-4 参照	○	◎	ダム貯水池の流入部等にフェンスを設置し、発生したアオコを一部水域に封じ込める。また併せて、出水時の濁りや栄養塩類に富んだ流入水を深部に導入し、植物プランクトンへの栄養塩類の供給を抑制することで、植物プランクトンの増殖抑制を図る。なお、栄養塩類の有光層への再浮上を防止するために、選択取水と併用することも効果的である。
	浮島 P. 参考-5 参照	○	◎	人工的に水生植物を植栽した浮島を水上に浮かべ、植物根茎による栄養塩類の吸収、根茎に付着する微生物による栄養塩類の吸収・分解を図る。また、植物プランクトンを捕食する動物プランクトン等の生息基盤となる他、遮光効果による植物プランクトンの増殖抑制などの効果を期待できる。また、地域住民の水質保全に対する意識啓発の効果も期待される。
	アオコ回収 P. 参考-5 参照	—	◎	アオコが大量発生している表層水をポンプ等で吸収・回収し、アオコを除去する。アオコとともに、アオコに含まれる窒素・リンを併せて除去することが可能である。
放流 対策	選択取水 P. 参考-6 参照	◎	○	水温躍層が形成されているダム貯水池において、取水口の高さを変え任意の層から選択的に取水するための設備であり、一般的に冷水・温水放流や濁水の長期化を低減するために設置される。選択取水設備が設置されている場合に、本施設を適切に運用することで、表層のアオコを放流してダム貯水池のアオコを減少させたり、逆にアオコが発生していない中下層水を選択的に取水することで水利用への被害を回避したりすることができる。

注）対応時期の凡例

- ◎：アオコの解消、低減効果がより期待できる
- ：アオコの解消、低減効果が得られる
- ：対応時期としてはふさわしくない

2.4.2 環境保全措置の選定

「環境影響評価法の規定による主務大臣が定めるべき指針等に関する基本的事項」（最終改正：平成二十六年六月二十七日 環境省告示第八十三号）における、「第五 環境保全措置指針に関する基本的事項」において、

「環境保全措置は、対象事業の実施により選定項目に係る環境要素に及ぶおそれのある影響について、事業者により実行可能な範囲内で、当該影響を回避し、又は低減すること及び当該影響に係る各種の環境の保全の観点からの基準又は目標の達成に努めることを目的として検討されるものとする。」

と記載されている。

すなわち、基本事項では、事業者により実行可能な範囲でのベスト追及型アセスを実施すること要求されている。このことから、1つの検討結果のみではなく、地理的な条件による制約、予算状況等に応じて実施可能な範囲で、影響を回避し、又は低減する効果が最大限得られる環境保全措置を選定し、各種の環境の保全の観点からの基準又は目標が達成できるような検討を行うことが望ましい。

例えば、数値シミュレーションモデルにより、夏季にダム貯水池に強い水温躍層が形成され、富栄養化現象の発生が予測された場合には、曝気装置を設置することによって形成される水温躍層を破壊し、富栄養化現象の発生を抑えることが考えられる。しかし、予算的に設置が難しい場合には、代替策としてかんがい期以外の時期にダム貯水池内を空にし、池干しを行うことで底質環境の改善を行う、或いは、アオコ回収を定期的を実施する等の代替策を実行する対策も考えられる。

ただし、環境保全措置として曝気装置によるダム貯水池内の流動化（循環）を行う場合、設置後の当該施設の維持管理主体はほとんどの場合、地元関係機関になると想定されるため、環境保全措置の選定・実施内容の検討に当たっては、将来の維持管理主体も含めた十分な検討・協議を行うことが重要である。

なお、環境保全措置の選定に当たり専門的な判断を要する場合には、関連する分野の有識者等にヒアリングを行い、指導・助言を受けることが望ましい。

2.5 環境影響評価手法

評価は、事業者が実行可能な範囲内でできる限りの環境保全措置を施し、富栄養化による影響が回避され、又は低減されており、環境の保全への配慮が適正になされているかどうかを評価する。

また、国又は地方公共団体が実施する環境保全に関する施策によって、当該ダム貯水池に対して、富栄養化に関する基準又は目標が示されている場合には、当該基準又は目標と調査・予測結果との間に整合が図られているかどうかを評価する。

【解説】

環境保全措置は事業者が行うものであり、事業計画において地形的な条件による制約、予算的な制約等を踏まえて実施が十分可能な内容で行うこととなるが、環境保全措置によって富栄養化現象による影響がどの程度避けられたのか、又は低減されたのかを事前に評価する必要がある。

この評価の方法については、環境保全措置により表 17 に示すような国又は地方公共団体等が定めている富栄養化に係る各種基準を満たすか否かを確認する方法、又は、環境保全措置により水質が改善されるかを確認する方法がある。後者の場合は、対象となるダム貯水池に直接適用させる基準が定められていない場合であり、事業計画の検討過程においてダムの水質保全（改善）を図っていく際の目標を設定し、環境保全措置によって水質が改善され設定した目標が達成されるかを確認することとなる。この目標設定に当たっては、ダムの利用目的が農業用水である場合には、農業用水基準や他地区の事例等を参考にしながら、整備されるダムの維持管理主体となる地元関係機関等と十分に協議・検討した上で設定する。

富栄養化に係る具体的な基準としては、農業用水基準、水産用水基準、環境類型指定の状況等を考慮した環境基準、今後の河川水質管理の指標（案）等がある。評価に際しては、評価対象ダムが環境類型指定対象ダムの場合には環境基準、環境類型指定がされていない場合には、農業用水基準とするなど利水目的に即して適切に判断することとなる。

表 17(1) 評価の基準(水質汚濁に関する環境基準①)

生活環境の保全に関する環境基準(河川)

項目 類型	利用目的の適応性	基準値				
		水素イオン濃度 (pH)	化学的酸素 要求量 (BOD)	浮遊物質 量 (SS)	溶存酸素量 (DO)	大腸菌群数
AA	水道1級 自然環境保全及びA以下 の欄に掲げるもの	6.5 以上 8.5 以下	1mg/L 以下	25mg/L 以下	7.5mg/L 以上	50MPN/100mL 以下
A	水道2級 水産1級水浴及びB以下 の欄に掲げるもの	6.5 以上 8.5 以下	2mg/L 以下	25mg/L 以下	7.5mg/L 以上	1,000MPN/100mL 以下
B	水道3級 水産2級及びC以下の欄 に掲げるもの	6.5 以上 8.5 以下	3mg/L 以下	25mg/L 以下	5mg/L 以上	5,000MPN/100mL 以下
C	水産3級 工業用水1級及びD以下 の欄に掲げるもの	6.5 以上 8.5 以下	5mg/L 以下	50mg/L 以下	5mg/L 以上	—
D	工業用水2級 農業用水及びEの欄に 掲げるもの	6.0 以上 8.5 以下	8mg/L 以下	100mg/L 以下	2mg/L 以上	—
E	工業用水3級 環境保全	6.0 以上 8.5 以下	10mg/L 以下	ごみ等の浮遊 が認められないこと。	2mg/L 以上	—
備考						
1. 基準値は、日間平均値とする(湖沼、海域もこれに準ずる。)。 2. 農業用利水点については、水素イオン濃度 6.0以上 7.5以下、溶存酸素量5mg/L 以上とする(湖沼もこれに準ずる。)。 以下、3、4略						

表 17(2) 評価の基準(水質汚濁に関する環境基準②ア)

生活環境の保全に関する環境基準(湖沼※)

類型	利用目的の適応性	基準値				
		水素イオン 濃度 (pH)	化学的酸素 要求量 (COD)	浮遊物質 量 (SS)	溶存酸素量 (DO)	大腸菌群数
AA	水道1級、水産1級、自然 環境保全及びA以下の欄に 掲げるもの	6.5 以上 8.5 以下	1mg/L 以下	1mg/L 以下	7.5mg/L 以上	50MPN/ 100mL 以下
A	水道2、3級、水産2級、 水浴及びB以下の欄に掲 げるもの	6.5 以上 8.5 以下	3mg/L 以下	5mg/L 以下	7.5mg/L 以上	1,000MPN/ 100mL 以下
B	水産3級、工業用水1級、 農業用水及びCの欄に掲 げるもの	6.5 以上 8.5 以下	5mg/L 以下	15mg/L 以下	5mg/L 以上	—
C	工業用水2級、環境保全	6.0 以上 8.5 以下	8mg/L 以下	ごみ等の浮遊 が認められないこと。	2mg/L 以上	—
備考 水産1級、水産2級及び水産3級については、当分の間、浮遊物質量の項目の基準値は適用しない。						

※ここでの湖沼は天然湖沼及び貯水量が 1,000 万立方メートル以上であり、かつ、水の滞留時間が4日間以上である人工湖のこと。

表 17(2) 評価の基準(水質汚濁に関する環境基準②イ)

項目 類型	利用目的の適応性	基準値	
		全窒素	全磷
I	自然環境保全及びⅡ以下の欄に掲げるもの	0.1mg/L 以下	0.005mg/L 以下
Ⅱ	水道 1、2、3 級(特殊なものを除く。) 水産 1 種 水浴及びⅢ以下の欄に掲げるもの	0.2mg/L 以下	0.01mg/L 以下
Ⅲ	水道 3 級(特殊なもの) 及びⅣ以下の欄に掲げるもの	0.4mg/L 以下	0.03mg/L 以下
Ⅳ	水産 2 種及びⅤの欄に掲げるもの	0.6mg/L 以下	0.05mg/L 以下
Ⅴ	水産 3 種、工業用水、 農業用水、環境保全	1mg/L 以下	0.1mg/L 以下
備考 1. 基準値は、年間平均値とする。 2. 水域類型の指定は、湖沼植物プランクトンの著しい増殖を生ずるおそれがある湖沼について行うものとし、全窒素の項目の基準値は、全窒素が湖沼植物プランクトンの増殖の要因となる湖沼について適用する。 3. 農業用水については、全磷の項目の基準値は適用しない。			

表 17(3) 評価の基準(農業(水稻)用水基準)

項目		農業用水基準 (農林水産技術会議 昭和 46 年 10 月 4 日)
pH (水素イオン濃度)		6.0～7.5
COD (化学的酸素要求量)		6mg/L 以下
SS (無機浮遊物質)		100mg/L 以下
DO (溶存酸素)		5mg/L 以上
T-N (全窒素濃度)		1mg/L 以下
EC (電気伝導度)		30mS/m 以下
重金属	As (ヒ素)	0.05mg/L 以下
	Zn (亜鉛)	0.5 mg/L 以下
	Cu (銅)	0.02mg/L 以下

表 17(4) 評価の基準(水産用水基準)

項目		基準
有機物 (COD, BOD)	河川	自然繁殖の条件として、20℃5 日間の BOD は 3mg/L 以下であること。 ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は 2mg/L 以下であること。
		生育の条件として、20℃5 日間の BOD は 5mg/L 以下であること。 ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は 3mg/L 以下であること。
		自然繁殖の条件として、COD は 4mg/L 以下であること。 ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は 2mg/L 以下であること。
	湖沼	生育の条件として、COD は 5mg/L 以下であること。 ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は 3mg/L 以下であること。
		一般の海域では、COD _{OH} (アルカリ性法)は 1mg/L 以下であること。 ノリ養殖場や閉鎖性内湾の沿岸域では COD _{OH} は 2mg/L 以下であること。
	海域	
全窒素 全リン	湖沼	コイ、フナを対象とする場合 全窒素 1.0mg/L 以下、全リン 0.1mg/L 以下
		ワカサギを対象とする場合 全窒素 0.6mg/L 以下、全リン 0.05mg/L 以下
		サケ科、アユ科を対象とする場合 全窒素 0.2mg/L 以下、全リン 0.01mg/L 以下
	海域	環境基準が定める水産 1 種 全窒素 0.3mg/L 以下、全リン 0.03mg/L 以下
		環境基準が定める水産 2 種 全窒素 0.6mg/L 以下、全リン 0.05mg/L 以下
		環境基準が定める水産 3 種 全窒素 1.0mg/L 以下、全リン 0.09mg/L 以下
		ノリ養殖に最低限必要な栄養塩濃度 無機態窒素 0.07～0.1mg/L 無機態リン 0.007～0.014mg/L
溶存酸素(DO)	河川及び湖沼では 6mg/L 以上。ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は 7mg/L 以上であること。	
	海域では 6mg/L 以上であること。	
	内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなくてはならない溶存酸素は 4.3mg/L (3mL/L)であること。	
水素イオン濃度 (pH)	河川及び湖沼では 6.7～7.5 であること。	
	海域では 7.8～8.4 であること。	
	生息する生物に悪影響を及ぼすほど pH の急激な変化がないこと。	
懸濁物質 (SS)	河川	25mg/L 以下であること(人為的に加えられる懸濁物質は 5mg/L 以下)。 忌避行動などの反応を起こさせる原因とならないこと。 日光の透過を妨げ、水生植物の繁殖、生長に影響を及ぼさないこと。
		サケ・マス・アユを対象とする場合は 1.4mg/L 以上(透明度 4.5m 以上)であること。 温水性魚類を対象とする場合は 3.0mg/L 以下(透明度 1.0m 以上)であること。
		人為的に加えられる懸濁物質は 2mg/L 以下であること。
	湖沼	海藻類の繁殖に適した水深において必要な照度が保持され、その繁殖と生長に影響を及ぼさないこと。
着色	光合成に必要な光の透過が妨げられないこと。	
	忌避行動の原因とならないこと。	
水温	水産生物に悪影響を及ぼすほどの水温の変化がないこと。	
大腸菌群数	大腸菌群数(MPN)が 100mL 当たり 1,000 以下であること。 ただし、生食用カキを飼育するためには 100mL 当たり 70 以下であること。	
油分	水中には油分が検出されないこと。	
	水面に油膜が認められないこと。	
有害物質	有害物質の基準値は、別表に掲げる物質ごとに同表の基準値の欄に掲げるとおりとする(別表は掲載を省略)。	
底質	河川および湖沼では、有機物などによる汚泥床、ミズワタなどの発生をおこさないこと。	
	海域では乾泥として COD _{OH} (アルカリ性法)は 20mg/g 乾泥以下、硫化物は 0.2mg/g 乾泥以下、ノルマルヘキサン抽出物質 0.1%以下であること。	
	微細な懸濁物が岩面、礫、又は砂利などに付着し、種苗の着生、発生あるいはその発育を妨げないこと。	
	海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律に定められた溶出試験(昭和 48 年環境庁告示第 14 号)により得られた検液中の有害物質のうち水産用水基準で基準値が定められている物質については、水産用水基準の基準値の 10 倍を下回ること。ただし、カドミウム、PCB については溶出試験で得られた検液中の濃度がそれぞれの化合物の検出下限値を下回ること。	
	ダイオキシン類の濃度は 150pgTEQ/g を下回ること。	

出典：日本水産資源保護協会「水産用水基準(2012 年版)」(2012)

表 17(5) 評価の基準(今後の河川水質管理の指標について(案)①)

河川水質管理の視点	河川水質の確保すべき機能		確保すべき機能を表す項目	河川水質管理の指標項目の分類				今後の河川水質管理の指標項目(案) (全国共通の項目)	
				住民との協働に 優れた項目	感覚指標に係る水質項目	機能に関して指標性のある水質項目	洪水時調査の 必要な項目	住民との協働による 測定項目	河川等管理者 による測定項目
人と河川の豊かなふれあいの確保	快適性	水域全体のきれいさ	ゴミの量	ゴミの量	—	—	—	ゴミの量	—
		水の透明感 [水のきれいさ]	透明度、SS、濁度、水の色、 [BOD]、[COD]、油、油	透明度、水の色、 [※] SS、 [※] 濁度、油、油、 [※] COD	—	透明度、SS、濁度 [BOD]	—	透明度、 [[※] COD]	SS、濁度、[BOD]
		川底の感触	川底の感触、[SS]、[濁度]、 [BOD]、[COD]	川底の感触、 [[※] COD]	[BOD]、 [T-N]、[T-P]、 [河床付着物のクロロフィルa]	[SS]、[濁度]	—	川底の感触、 [[※] COD]	[BOD]、[T-N]、[T-P]、 [河床付着物のクロロフィルa]
		川に入ったときの 快適性	—	—	—	—	—	—	—
		水に触れた感覚	水温、粘性、クロロフィルa	水温、 [※] クロロフィルa	—	水温、粘性	—	—	—
	安全性	臭い	水の臭い、臭気、[臭気度]、 [DO]、[BOD]、[COD]	水の臭い、臭気、 [[※] DO]、[[※] COD]	[DO]、 [BOD]	[臭気度]	—	水の臭い、 [[※] DO]、[[※] COD]	臭気度大腸菌群数
豊かな生態系の確保	生態、生育、繁殖	呼吸	DO、SS、[BOD]、[COD]	[※] DO、[[※] COD]	—	DO、[BOD]	DO、SS	[※] DO、[[※] COD]	DO、SS、[BOD]
		毒性	NH ₄ -N、Zn、ダイオキシン類、 環境ホルモン	[※] NH ₄ -N	—	NH ₄ -N、Zn、 ダイオキシン類、 環境ホルモン	NH ₄ -N	[※] NH ₄ -N	NH ₄ -N
		生物の生態	水生生物の生態、[水温]、[pH]、 [BOD]、[COD]、 [T-N]、[T-P]、 [水辺の藻類]、[鳥類]、[魚類]、[昆虫]	水生生物の生態、 [水温]、[pH]、 [[※] COD]、[水辺の藻類]、 [鳥類]、[魚類]、[昆虫]	—	水生生物の生態、 [BOD]、[T-N]、[T-P]	—	[※] 水生生物の生態、 [水温]、[[※] pH]、 [[※] COD]	水生生物の生態、 [pH]、[BOD]、 [T-N]、[T-P]
利用しやすい水質の確保	安全性	毒性 [消毒副生成物含む]	[TOC]、[BOD]、[COD]、[SS]、 トリハロメタン生成能(NH ₄ -N)、 健康項目	—	—	[TOC]、[BOD]、[COD]、 [SS]、トリハロメタン生成能、 [NH ₄ -N]、健康項目	[TOC]、 [トリハロメタン生成能]、 [NH ₄ -N]	トリハロメタン生成能、 [NH ₄ -N]、[TOC]	—
		病原性微生物	原虫類、ウイルス、 糞便性大腸菌群数、大腸菌	—	—	原虫類、ウイルス、 糞便性大腸菌群数、大腸菌	原虫類、ウイルス、 糞便性大腸菌群数、大腸菌	糞便性大腸菌群数	—
	快適性	臭い	2-MIB、ジオスミン、 臭気度、[T-N]、[T-P]	—	—	2-MIB、ジオスミン、 臭気度、[T-N]、[T-P]	2-MIB、ジオスミン	2-MIB、ジオスミン	—
	維持管理性	味覚	臭気度、[TOC]、[COD]	—	—	[TOC]、[COD]	[TOC]、[COD]	pH、SS、濁度、NH ₄ -N	—
下流域や滞留水域に少ない水質の確保	下流域の富栄養化や閉鎖性水域(ダム、湖沼、湾)の富栄養化への影響が少ない水質レベルであること。	[T-N]、[T-P]、 クロロフィルa、 [※] ケイ酸、 [[※] フルボ酸]、[Fe]、 [無機N]、[無機P]、[COD]	[[※] PO ₄]	—	—	[無機N]、[無機P]、[CO D]、 [[※] ケイ酸]、[[※] フルボ酸]	[T-N]、[T-P]	[[※] PO ₄]	[T-N]、[T-P]
河川の基本的特徴の表現			水温、流量、流速、水位 BOD、COD、 SS、濁度、pH、EC 水生生物の生態、 [※] フレッシュ度	水温、 [※] COD、 [※] pH、 [[※] フレッシュ度]	—	BOD、SS、濁度、pH、EC 流量、流速、水位 水生生物の生態	SS、濁度	水温、 [※] pH、 [※] COD	BOD、SS、濁度、pH、 流量

※1今後の調査・研究が必要である項目
 ※2この項目は情報提供のみに限られる。「フレッシュ度」は仮称であり、今後変更される可能性がある。
 ※3分析方法も含め、今後の調査・研究が必要である項目
 ※4バック方式などの簡易な方法で測定を行うことができる。
 ※5ろ紙吸光法(簡便な方法)で測定を行うことができる。
 ※6住民との協働による場合は、簡易調査方法で実施し、河川等管理者による場合は、スコア法で実施する。
 ※上記の視点に対して、水質以外の項目として川への近づき易さや、河道形態などが影響してくる。そのため、水質管理を行う上では、これらを考慮して検討を行う必要がある。
 ※現在国土交通省で設置している水質自動監視装置では、水温、pH、DO、濁度、COD、NH₄-N、T-N、T-P等の測定を行っている。また、水位観測所において水位の観測を行っている。
 ※BODは湖沼ではCODとする。都市河川では必要に応じてC-BODを追加してもよい。
 ※流量は湖沼では水位とする。

●※の注
 ・※は水質管理上重点的に評価を行う項目[評価項目]
 ・[]内の指標項目は、現地での調査の目的やデータ活用状況に応じて、追加的に測定を行うことを検討する項目
 ・工法は特に指標性の高い項目を要す
 ・※(簡易測定項目)はできれば実施する項目(特に簡易DO、簡易NH₄-Nは測定することで、「豊かな生態系の確保」のランクの目安を現地で判断できることから実施が望ましい)

出典：国土交通省河川局河川環境課「今後の河川水質管理の指標について(案)改訂版」(平成21年3月)
<https://www.mlit.go.jp/common/000046619.pdf>

表 17(6) 評価の基準(今後の河川水質管理の指標について(案)②)

■人と河川の豊かなふれあいの確保

ランク	説明	ランクのイメージ	評価項目と評価レベル ^{※1)}					地域特性項目
			全国共通項目					
			ゴミの量	透視度 (cm)	川底の感触 ^{※3), 4)}	水のおいしさ	糞便性 大腸菌群数 (個/100mL)	
A	顔を川の水につけやすい		川の中や水際にゴミは見あたらないまたは、ゴミはあるが全く気にならない	100以上 ^{※2)}	快適である	不快でない	100以下	当該河川・地点の特性や地域住民のニーズに応じて独自に設定
B	川の中に入って遊びやすい		川の中や水際にゴミは目につくが、我慢できる	70以上	不快感がない		1000以下	
C	川の中には入れないが、川に近づくことができる		川の中や水際にゴミがあって不快である	30以上	不快である	水に鼻を近づけると不快な臭いを感じる	1000を超えるもの	
D	川の水に魅力がなく、川に近づきにくい		川の中や水際にゴミがあってとても不快である	30未満		水に鼻を近づけるととても不快な臭いを感じる		

※1) 評価レベルについては、河川の状況や住民の感じ方によって異なるため、必要に応じて住民による感覚調査等を実施し、設定することとする。
 ※2) 実際には100cmを超える水質レベルを設定すべきであり、今後の測定方法の開発が望まれる。
 ※3) 川底の感触とは、河床の礫に付着した有機物や藻類によるヌルヌル感を対象とする。そのため、川底の感触は、ダム貯水池、湖沼、堰の湛水域には適用しない。
 ※4) 感触の「不快感」については、各々以下のイメージである
 A：素足で入りたいと感じる B：履物があれば入りたいと感じる C：履物をはいても入りたいくない

■豊かな生態系の確保

ランク	説明	評価項目と評価レベル				地域特性項目 当該河川・地点の特性や地域住民のニーズに応じて独自に設定
		全国共通項目				
		DO (mg/L)	NH ₄ - N (mg/L)	水生生物の生息*)		
A	生物の生息・生育・繁殖環境として非常に良好	7以上	0.2以下	I. きれいな水 ・カワゲラ ・ナガレトビケラ等	・住民と共に独自に設定 ・文献等から設定	
B	生物の生息・生育・繁殖環境として良好	5以上	0.5以下	II. 少しきたない水 ・コガタシマトビケラ ・オオシマトビケラ等		
C	生物の生息・生育・繁殖環境として良好とは言えない	3以上	2.0以下	III. きたない水 ・ミズムシ ・ミズカマキリ等		
D	生物が生息・生育・繁殖しにくい	3未満	2.0を超えるもの	IV. 大変きたない水 ・セスジユスリカ ・チョウバエ等		

* 水生生物の生息は流れのある瀬で調査を実施する。そのため、水生生物の生息はダム貯水池、湖沼、堰の湛水域には適用しない。

■利用しやすい水質の確保

ランク	説明	評価項目と評価レベル					当該河川・地点の特性や地域住民のニーズに応じて独自に設定
		全国共通項目				地域特性項目	
		安全性	快適性		維持管理性		
		トリハロメタン生成能 (μg/L)	2-MIB (ng/L)	ジオスミン (ng/L)	NH ₄ -N (mg/L)		
A	より利用しやすい	100以下	5以下	10以下	0.1以下	文献等から設定	
B	利用しやすい		20以下	20以下	0.3以下		
C	利用するためには高度な処理が必要	100を超えるもの	20を超えるもの	20を超えるもの	0.3を超えるもの		

：評価レベル

出典：国土交通省河川局河川環境課「今後の河川水質管理の指標について(案)改訂版」(平成21年3月)
<https://www.mlit.go.jp/common/000046619.pdf>

表 17(7) 評価の基準(富栄養化の階級)

富栄養化の階級(指標：T-N) 単位：mg/L

階級			出典
貧栄養	中栄養	富栄養	
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

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)

富栄養化の階級(指標：T-P) 単位：mg/L

階級			出典
貧栄養	中栄養	富栄養	
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)

富栄養化の階級(指標：クロロフィル a) 単位：μg/L

階級			出典
貧栄養	中栄養	富栄養	
<4	4～10	>10	US EPA 1974
<3※	3～7※	7～40※	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)

富栄養化の階級(指標：年平均クロロフィル a, 年最大クロロフィル a) 単位：μg/L

指標	階級			出典
	貧栄養	中栄養	富栄養	
年平均クロロフィル a	<2.5	2.5～8	8～25	OECD
年最大クロロフィル a	<8.0	8～25	25～75	OECD

出典：(財)ダム水源地環境整備センター「ダム貯水池水質用語集」(2006)

2.6 事後調査（モニタリング調査）の計画策定

事後調査（モニタリング調査）は、環境影響評価の結果、ダムが存在・供用により水質に影響があり、環境保全措置が必要と判断した場合に、環境保全措置の一環として行う。

その目的は、環境保全措置の効果確認及びダム運用条件等の検証であり、場合によっては運用の見直しを行うために必要な基礎資料を取得することである。

調査は環境保全措置の内容により期待される効果が異なるため、調査項目の内容は環境保全措置に応じて検討・整理する必要がある。

【解説】

2.5 により行った環境影響評価の結果行うこととした環境保全措置（水質保全対策）は、その効果を確認し、ダムの運用条件等の検証を行い、場合によっては運用の見直しを行うことが重要である。

事後調査（モニタリング調査）は、こうした環境保全措置の点検に必要な基礎情報を収集することを目的とする。

また、環境保全措置の一環として実施するため、モニタリング計画を作成し、その計画に基づいて調査を行う必要がある。

モニタリング調査は水質保全対策の内容を十分に踏まえて、調査内容を検討・整理する必要がある。表 18 の内容を基本として定期的に長期的に行う内容とする。例えば、曝気循環施設を水質保全対策とした場合と選択取水を対策とした場合ではその内容は異なる。表 19 のとおり、曝気循環施設の場合では、水温躍層を曝気により破壊し鉛直混合を促すことを目的としている施設のため、水温の観測頻度を高める必要がある。一方、選択取水の場合では、流入水質と放流水質が同じにすることが目標であるため、流入河川水と同じ水温となる水深を観測する必要がある。ダム貯水池内に複数点の水温・濁度の鉛直分布観測地点を設定することとなる。このように水質保全対策の特徴等を踏まえて、その効果を把握できるよう調査内容を検討・工夫する必要がある。

また、各対策の運用条件を後々見直すことも想定されることから、調査時期や頻度等についても十分な検討が必要であるが、モニタリング調査の実施体制や予算的な制約等を考慮しつつ実施可能な内容として検討・整理する必要がある。

表 18 定期調査の概要

調査項目	調査地点	調査深度	調査頻度
水温、濁度、DO(溶存酸素量)	- ダム貯水池内基準地点 - 流入河川地点 - 放流口地点	- ダム貯水池内基準地点は原則 0.1m, 0.5m, 1m 以下 1m 毎 - 流入河川地点、放流口地点は 1 層(2 割水深)	原則として 1 回/月
生活環境項目(DO(溶存酸素量)を除く)、クロロフィル a		- ダム貯水池内基準地点は 3 層(0.5m, 1/2 水深、底上 1m 又は表水層、深水層、底水層) - 流入河川地点、放流口地点は 1 層(2 割水深)	
健康項目	- ダム貯水池内基準地点 - 水道原水取水口地点(ダム貯水池から水道用水直接取水がある場合) - 必要に応じて流入河川地点、放流口地点	- ダム貯水池内基準地点は 1 層(0.5m) - 水道原水取水口地点は取水深度に応じて設定 - 流入河川地点、放流口地点は 1 層(2 割水深)	原則として 2 回/年(夏季と冬季)
植物プランクトン	ダム貯水池内基準地点	1 層(0.5m)	原則として 1 回/月
底質(粒度組成、強熱減量、COD _{sed} 、T-N(全窒素)、T-P(全リン)、硫化物、重金属等)		底泥表層 1 層	原則として 1 回/年(夏季)
2-MIB、ジェオスミン(水道水源のダム貯水池で行う)	- ダム貯水池内基準地点 - 水道原水取水口地点(ダム貯水池から水道用水直接取水がある場合)	- ダム貯水池内基準地点は 1 層(0.5m) - 水道原水取水口地点は取水深度に応じて設定	4 回/年程度(藻類の発生量が多い時期)
無機態窒素、無機態リン(富栄養化現象が生じる懸念があるダム貯水池で行う)	ダム貯水池内基準地点	3 層(0.5m, 1/2 水深、底上 1m 又は表水層、深水層、底水層)	原則として 1 回/月

- ・現地記録項目は表中の記載を省略した。
- ・生活環境項目(DO(溶存酸素量)を除く)：pH、BOD、COD、SS(浮遊物質質量)、大腸菌群数、T-N(全窒素)、T-P(全リン)
- ・生活環境項目(水生生物の保全)：全亜鉛、ノニルフェノール、LAS(直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩)
- ・健康項目：カドミウム、全シアン、鉛、六価クロム、ヒ素、総水銀、アルキル水銀、PCB、ジクロロメタン、四塩化炭素、1,2-ジクロロエタン、1,1-ジクロロエチレン、シス-1,2-ジクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタン、1,1,2-トリクロロエタン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、1,3-ジクロロプロペン、チウラム、シマジン、チオベンカルブ、ベンゼン、セレン、硝酸性窒素及び亜硝酸態窒素、ふっ素、ほう素、1,4-ジオキサン
- ・ダイオキシン類：ポリクロロジベンゾフラン、ポリクロロジベンゾパラジオキシン、DL-PCB(ダイオキシン様 PCB)
- ・底質の重金属等：鉄、マンガン、カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、総水銀、アルキル水銀、PCB、チウラム、シマジン、チオベンカルブ、セレン
- ・無機態窒素：アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸性窒素
- ・無機態リン：オルトリン酸態リン

＜調査項目の主な目的＞

- ・水温：ダム貯水池の水温成層形成状況の把握
- ・濁度：ダム貯水池の濁りの状況の把握
- ・生活環境項目：生活環境の保全に関する環境基準項目の監視
- ・クロロフィル a、植物プランクトン：富栄養化現象の発生状況の監視
- ・健康項目：人の健康の保護に関する環境基準項目の監視
- ・ダイオキシン類：ダイオキシン類に関する環境基準項目の監視
- ・底質：水質に密接に関連する底質の状況の監視
- ・2-MIB、ジェオスミン：水道水源としての性状の監視
- ・無機態窒素、無機態リン：植物プランクトンの消長と密接に関連する項目の把握

出典：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課「ダム貯水池水質調査要領」(平成 27 年 3 月版)を一部変更

表 19(1) 富栄養化に関連した事後調査計画案(曝気循環設備の場合)

調査項目	調査地点	調査深度	調査頻度
・ 常時監視項目 水温、濁度、DO(溶存酸素量)	・ ダム貯水池内基準地点※ ・ 流入河川地点 ・ 放流口地点	・ ダム貯水池内基準地点※では水深20mまでは1m毎、それ以深は1～5m毎 ・ 流入河川地点、放流口地点では1層(2割水深)	原則として、2回/日以上(日中及び夜間)
・ 定期監視項目			
植物プランクトン、クロロフィルa、COD、BOD、SS(浮遊物質)、T-N(全窒素)、無機態窒素、T-P(全リン)、無機態リン	・ ダム貯水池内基準地点※ ・ 流入河川地点 ・ 放流口地点 ただし、植物プランクトンはダム貯水池内基準地点※のみ	・ ダム貯水池内基準地点※では3層(0.5m, 1/2水深, 底上1m又は表水層, 深水層, 底水層) ・ 流入河川地点、放流口地点では1層(2割水深)	6月～9月は2回/月～1回/週、10月～5月は1回/月～2回/月を目安とするが、 具体的な調査頻度は水温成層の形成状況を考慮して、ダム毎に設定
2-MIB、ジェオスミン(腐敗臭発生への対策として曝気循環設備の設置等を伴う対策を実施した場合)	・ ダム貯水池内基準地点※ ・ 放流口地点 ・ 水道原水取水口地点(ダム貯水池から水道用水直接取水がある場合)	・ ダム貯水池内基準地点※では3層(0.5m, 1/2水深, 底上1m又は表水層, 深水層, 底水層) ・ 放流口地点では1層(2割水深) ・ 水道原水取水口地点は取水深度に応じて設定	
・ 循環混合層の形成範囲を把握するための項目 水温(自記録式水温計等により測定)	ダム貯水池の適切な地点	水温鉛直分布が把握できる適切な深度	原則として、2回/日以上(日中及び夜間)

・ 無機態窒素：アンモニア態窒素，亜硝酸態窒素，硝酸性窒素

・ 無機態リン：オルトリン酸態リン

※ダム貯水池内基準地点：曝気循環設備による循環混合層の形成状況を確認する上で適切な地点を指し、曝気循環設備の近傍（吐出空気の影響を直接受けない程度の離隔を確保する）とする。

＜調査項目の主な目的＞

・ 常時監視項目、定期監視項目：曝気循環設備の運用状況、効果の把握

・ 循環混合層の形成範囲を把握するための項目：曝気循環設備による循環流によって強制的に混合する層の形成範囲の把握

出典：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課「ダム貯水池水質調査要領」（平成27年3月版）を一部変更

表 19(2) 富栄養化に関連した事後調査計画案(選択取水設備の場合)

調査項目	調査地点	調査深度	調査頻度
・常時監視項目 水温、濁度	・ダム貯水池内基準地点※ ・流入河川地点 ・放流口地点	・ダム貯水池内基準地点※では鉛直方向に1m毎 ・流入河川地点、放流口地点では1層(2割水深)	原則として、1回/日以上
・定期監視項目 COD、BOD、SS(浮遊物質)、T-N(全窒素)、無機態窒素、T-P(全リン)、無機態リン	・ダム貯水池内基準地点※ ・流入河川地点 ・放流口地点	・ダム貯水池内基準地点※では3層(0.5m, 1/2水深, 底上1m又は表水層, 深水層, 底水層) ・流入河川地点、放流口地点では1層(2割水深)	原則として、1回/月
・貫入状況を把握するための項目 水温、濁度	ダム貯水池で湛水部末端からダム貯水池内基準地点※に縦断的に調査地点を設定	流入水の貫入状況が把握できる適切な深度	流入水の貫入過程に応じた適切な頻度を設定

- ・無機態窒素：アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸性窒素
- ・無機態リン：オルトリン酸態リン

※ダム貯水池内基準地点：ダム貯水池に流入した濁水や栄養塩類が、選択取水設備により適切に放流されていることを確認する上で適切な地点を指し、選択取水設備の近傍とする。

<調査項目の主な目的>

- ・常時監視項目、定期監視項目：選択取水設備の運用状況、効果の把握
- ・貫入状況を把握するための項目：選択取水設備によるダム貯水池の濁質の貫入状況の把握

出典：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課「ダム貯水池水質調査要領」（平成27年3月版）を一部変更

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。

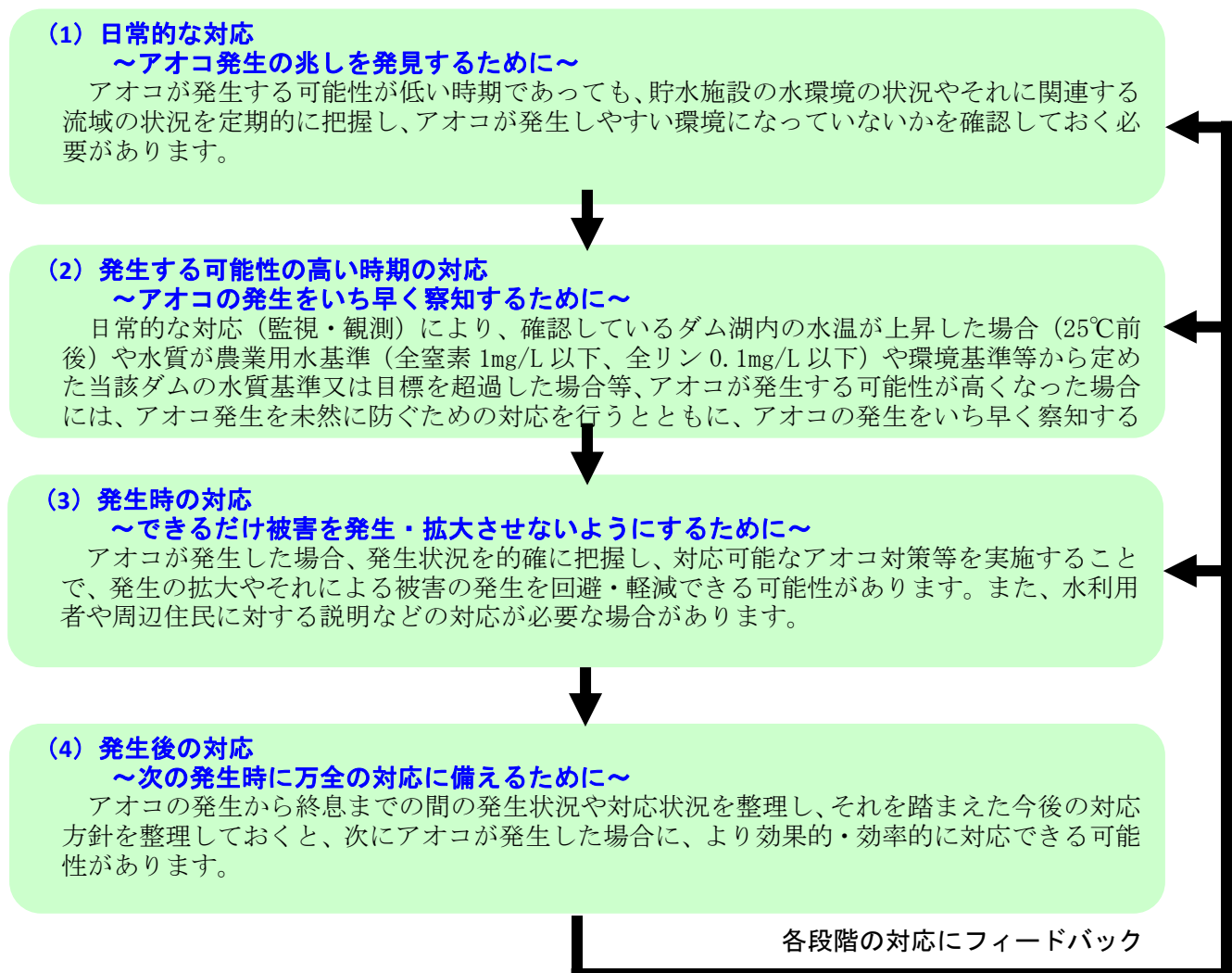


図 23 富栄養化現象への対応の流れ（アオコを例に）

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、利水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】

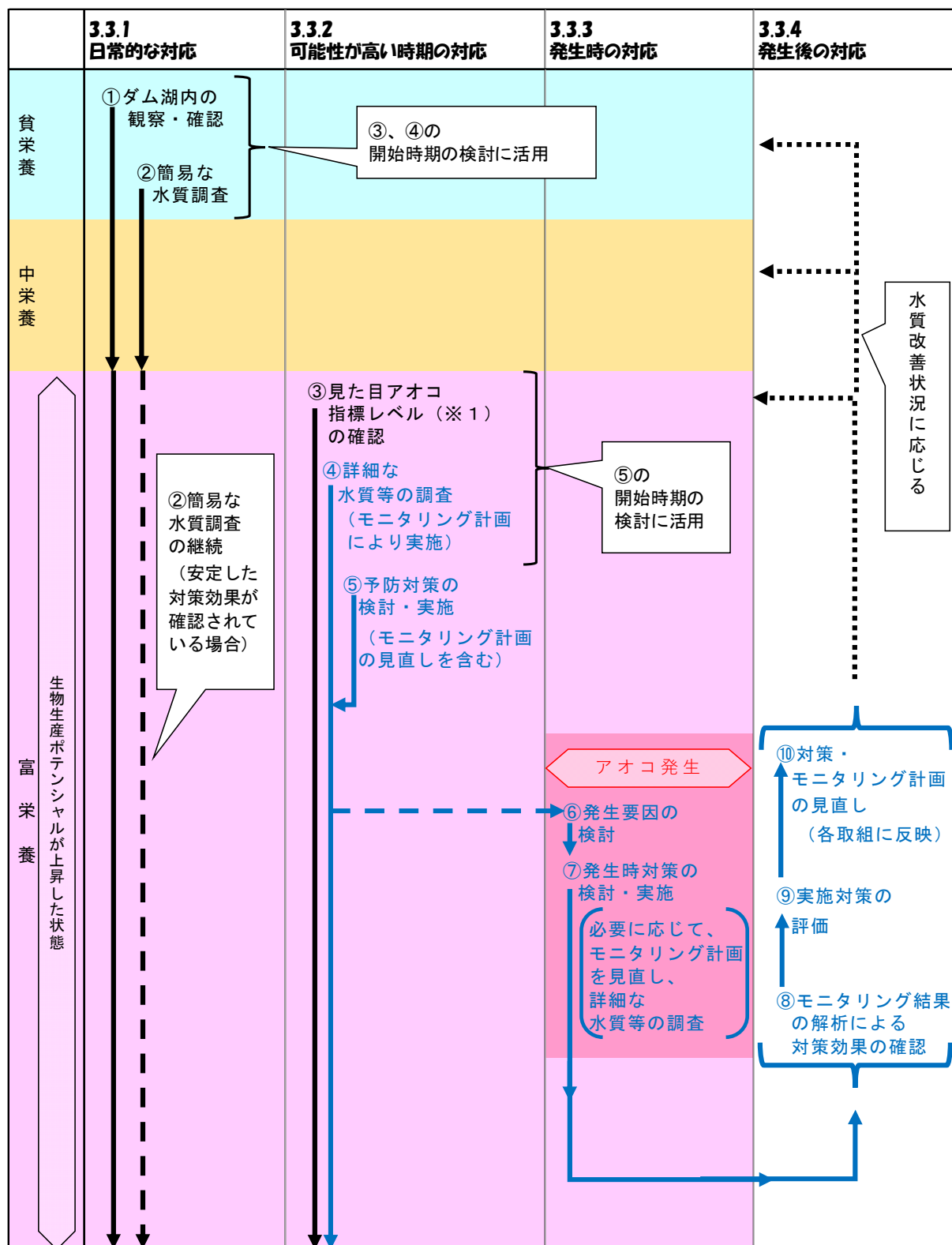
ダム管理者は、ダム貯水池において富栄養化現象発生 の 兆しを発見するために日常的かつ継続的にダム貯水池の状況を観察・確認するなどの対応を行う。富栄養化現象が発生しやすい時期には対応を強化し、例えばアオコが発生した際には、既 に示したとおり図 23 のフローに基づいて対策内容の検討・実施や効果確認等を行い、各段階で適切な水質が維持されるよう努める必要がある。

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◆

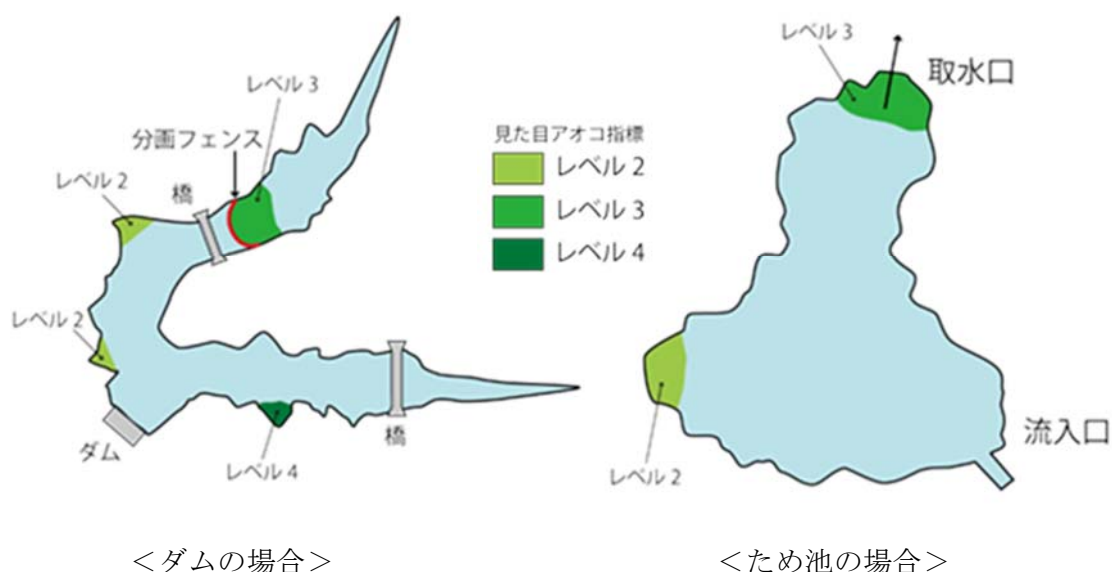
「見た目アオコ指標レベル」は、アオコの状況（程度）を目視による確認で判断できるように、レベル0～レベル6の7段階にレベル化したもので、国立環境研究所で開発された指標です。

「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)。

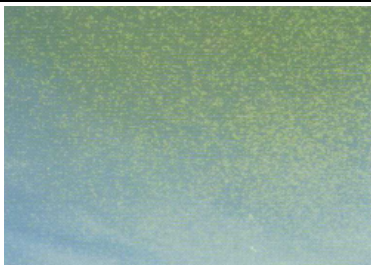
なお、アオコが風によって集積している場所は、調査対象として不適ですので、調査地点としないように注意してください。

◆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。

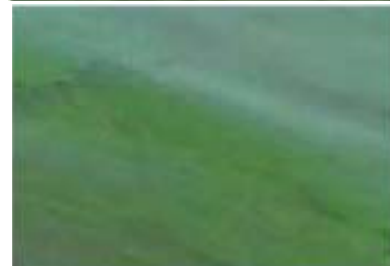
見た目アオコ指標（八郎湖版）

- 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	

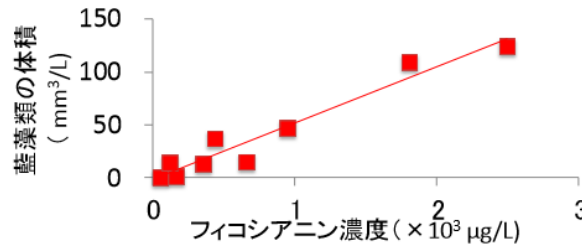




コラム (5/5) ; ◆◆◆もう一つのアオコ現存量の指標「フィコシアニン」◆◆◆

◆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。



(平成24年6月～8月の霞ヶ浦における調査)



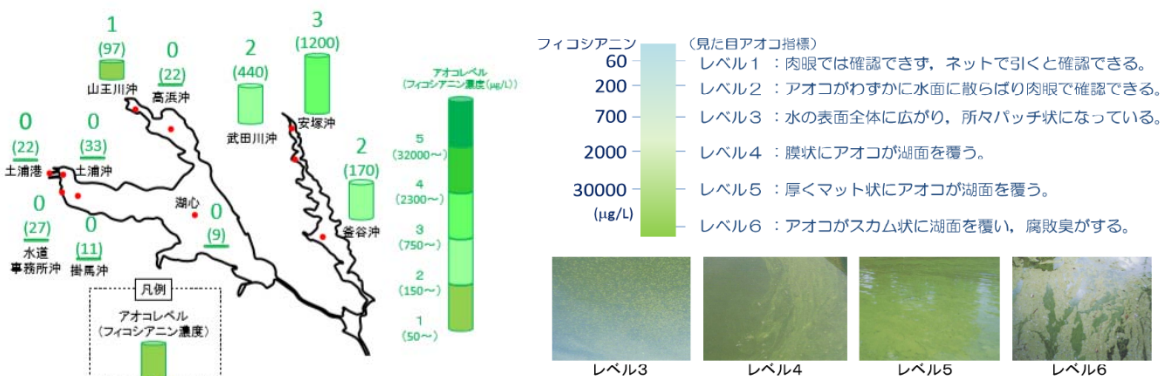
左フィコシアニン、右クロロフィル
(リン酸緩衝液で抽出) (エタノールで抽出)

※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。 ・原則として春季～秋季1回/週、冬季1回/月。 ■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。 ・6月～9月は2回～1回/月を目安とする。 ■生物異常発生水域目視記録。 ・原則として1回/日、長期化した場合は1回/週

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。

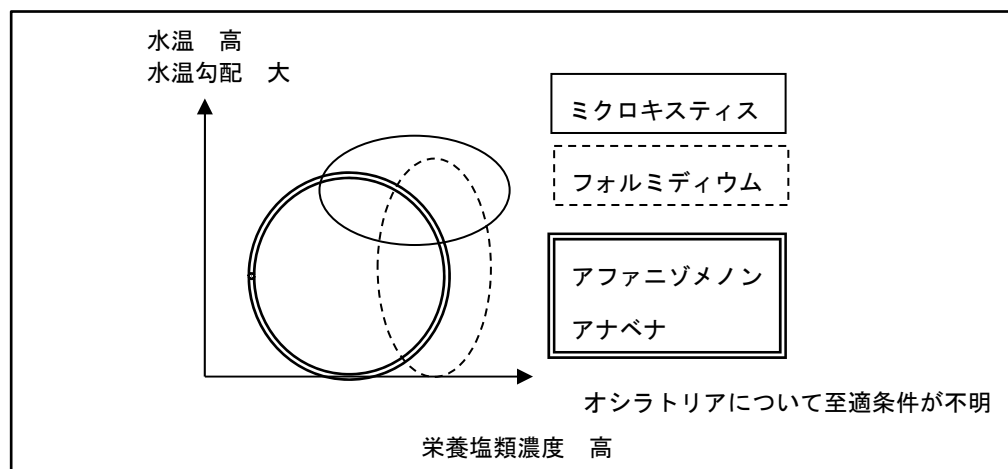


図 27 主なアオコの優占種の至適環境のイメージ



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

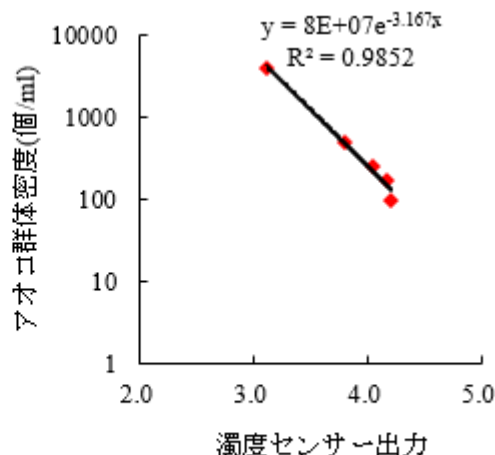
写真 1 に示す 5 段階のアオコ濃度の水に対する、濁度センサー (DFRobot 社製, SEN0189, 写真 2) の出力とアオコ群体密度の関係は、図①のように 1 対 1 の関係がある。



写真 1 校正実験に用いた水

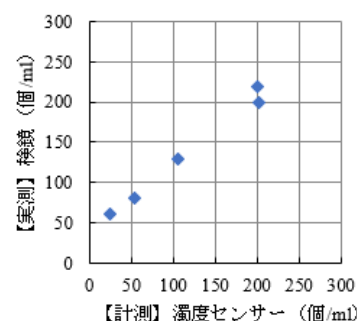


写真 2 濁度センサー



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）。

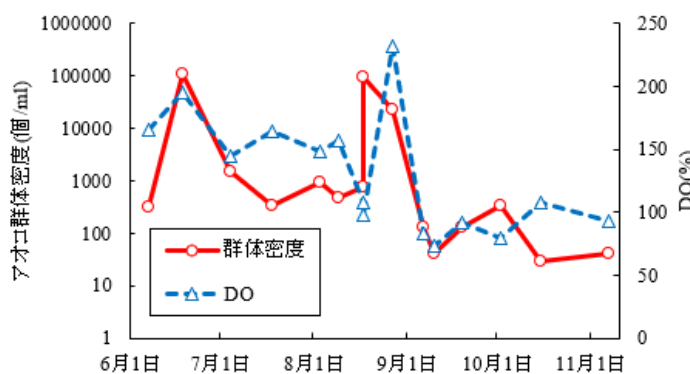


図② アオコ濃度の計測値と実測値の関係

(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。

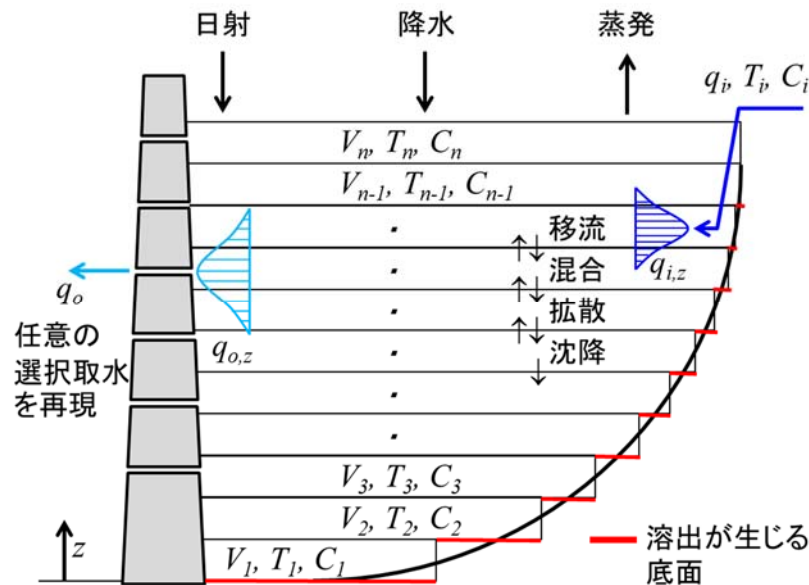


図 ① 鉛直 1 次元モデルの概念図

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】

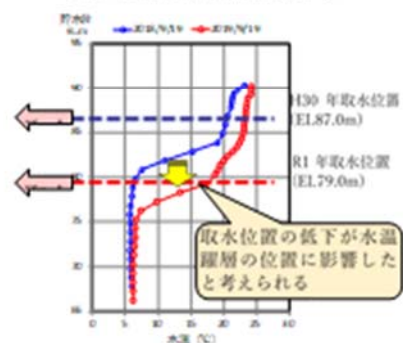
■ 貯水池内の熱や物質の流動

- 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

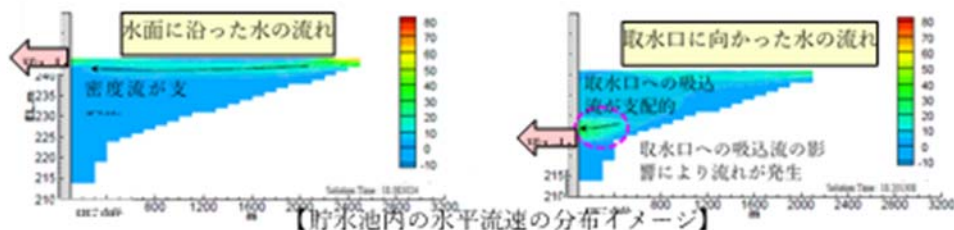
- 取水口付近で生じる吸込流が、水温躍層の位置に影響を与える（右図）。
- 表層取水の場合（下左図）は、水面に沿った水の流れが主となるため、表層付近に水温躍層が形成される。
- 深層取水の場合（下右図）は、取水近傍に生じた吸込流の影響を受けて、表層から取水位置にかけて生じる緩やかな流れにより、取水口下層に水温躍層が形成される。

【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】



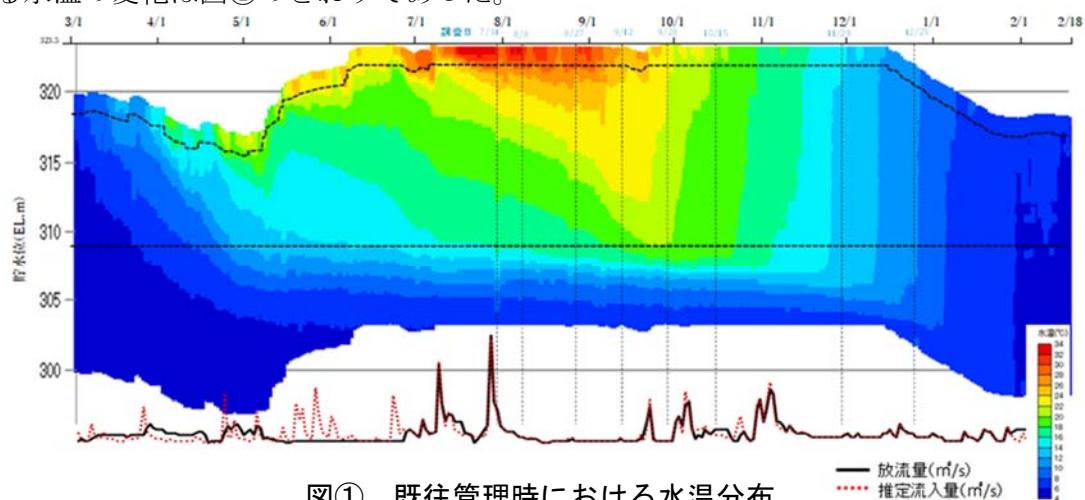
検討事例3；モニタリングによる対策検討例

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。

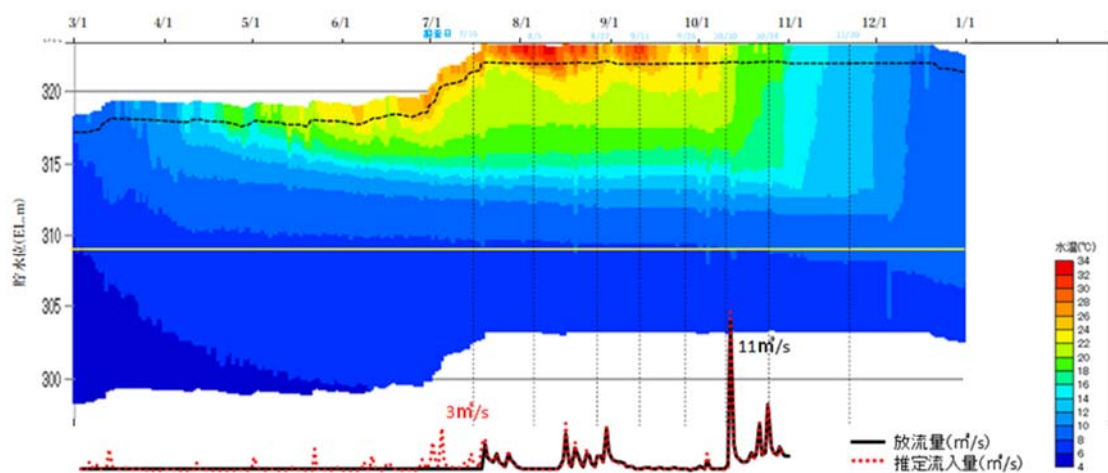
Bダムにおける既往のダム管理方法は、昼間に表面取水ゲート（水面下1.5m）、夜間に第2取水孔（満水位下14m）を用いた取水を基本としていた。この際のダム湖最深部における水温の変化は図①のとおりであった。



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）の分布は一様と見なす。
- ・ダム湖のように横断方向に水質分布が一様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。

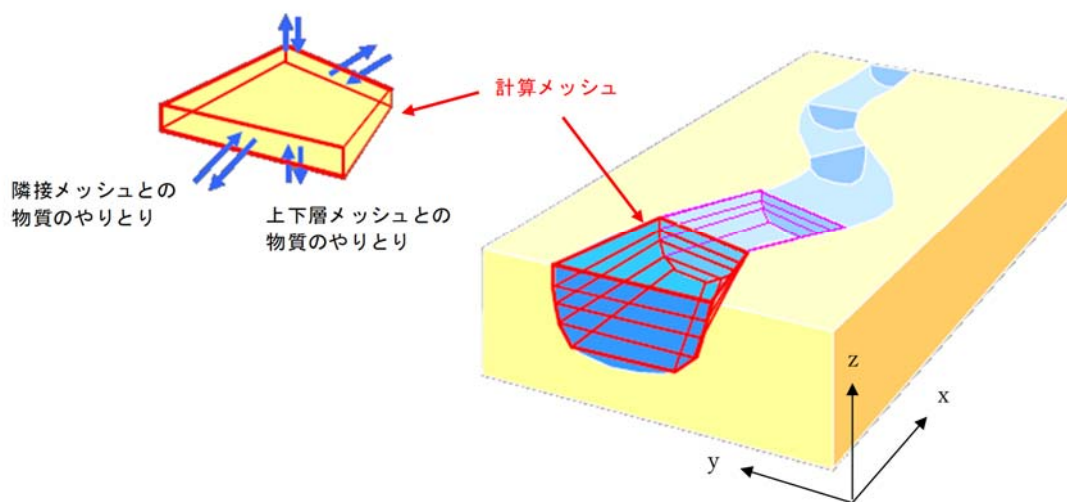


図 ① 鉛直 2 次元モデルの概念図

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。

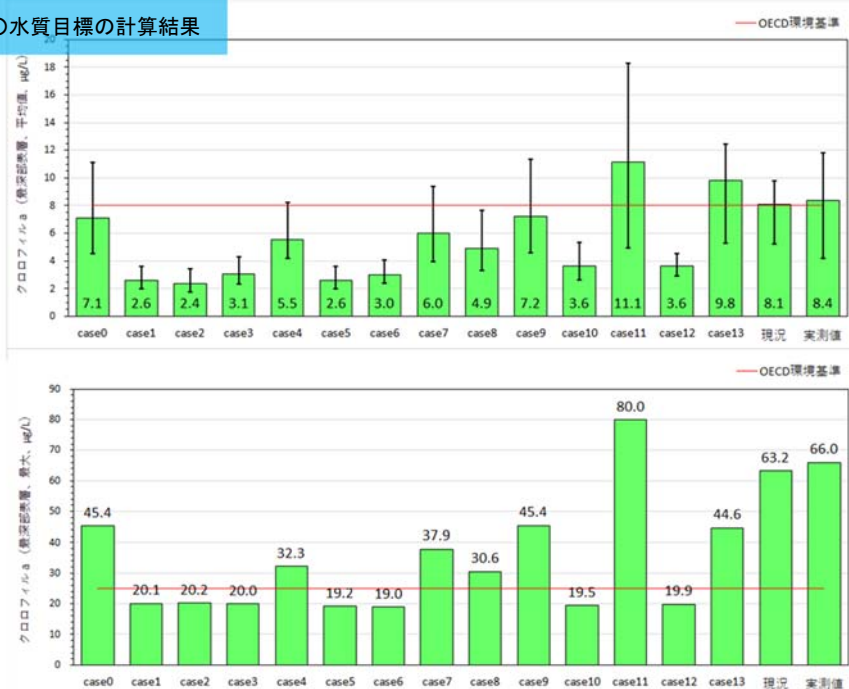
分画フェンスに関しては、分画フェンスが無いケースでクロロフィル a 濃度が低くなった。これは、分画フェンスが無い場合、曝気に伴う鉛直循環流によるアオコ等の植物プランクトンを底層に取り込む能力が高くなったためと考えられた。

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

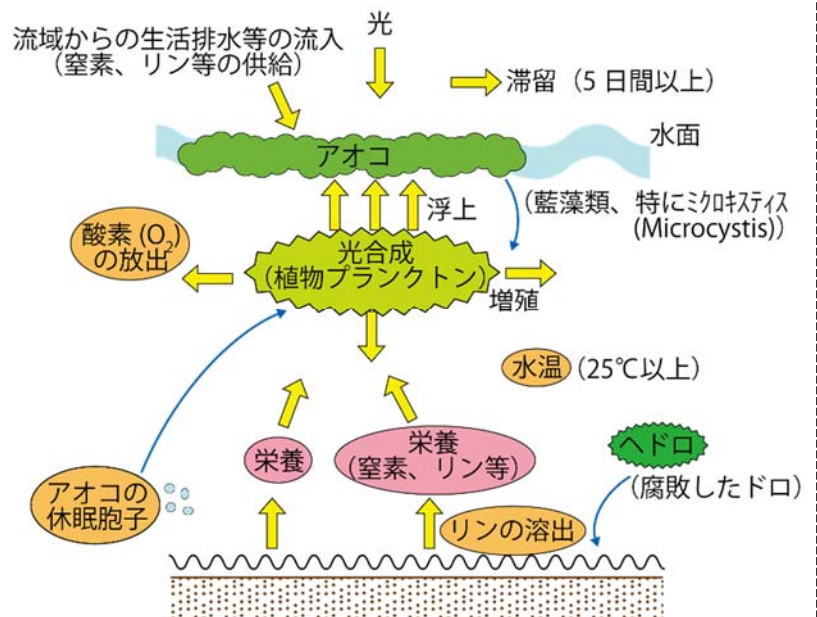
アオコとは、ダム貯水池で特定のプランクトン（ミクロキスティス、アナベナ等）が異常増殖して水面に集積する現象であり、特に夏の高気温・水温時や、栄養塩類濃度の高い水の滞留といった条件下で発生することがあります。ダム貯水池のアオコの発生・増殖の要因としては、気象条件の変化等によって主に以下の5つがあげられます。

- 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

◎◎◎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。