

**ダム貯水池水質改善に向けた
気泡式循環施設マニュアル(案)
～富栄養化対策のための気泡式(曝気式)
循環施設に関する技術資料～**

令和3年5月

国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課

ま え が き

我が国のダム貯水池では、富栄養化現象に伴うアオコ発生による景観障害やカビ臭発生による利水障害といった水質障害が発生することがある。国土交通省及び独立行政法人水資源機構が管理するダムを対象として平成 27 年度に実施したアンケート調査によると管理ダム中約 4 割でこういった問題が発生している。この富栄養化現象に伴う水質障害に対して、各ダム貯水池では様々な水質改善対策を実施しているが、その中でも気泡式循環施設^{※1}は導入事例の多い対策であり、富栄養化現象に対する基幹対策ともいえる。ダム貯水池では、これまで平成 17 年 10 月に公表された「曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案)」を参考に気泡式循環施設の運用や水質改善効果の確認を行っており、その中で得られたデータや知見等が蓄積されてきた。

その一方で、国土交通省、独立行政法人水資源機構及び道府県が管理するダムを対象として実施したアンケート調査によると、地方整備局、水資源機構、地方公共団体においてダム貯水池の水質管理を担当する職員は減少傾向にあり、ダム貯水池の水質管理に関する技術の継承が困難になっていくことが懸念される。具体的な数値で見ると、ダム管理を担当している職員の 87% がダム貯水池の水質に係る手引き等の整備を望むと回答しており、その理由として 51%の職員が「現場での技術の継承に困難な部分がある」ことを挙げている。

国土交通省では、これまで「ダム貯水池水質調査要領」(平成 27 年 3 月)、「ダム貯水池水質改善の手引き」(平成 30 年 3 月)を公表し、現場での水質調査の基準となる要領や水質改善対策を検討する際の参考となる手引きを整備してきた。

本マニュアルは、これまで進めてきた取り組みを引き継ぎ、ダム貯水池の水質管理を担当する職員が気泡式循環施設の設置・運用・効果確認を行う際の標準的事項や留意事項をとりまとめたものである。

なお、本マニュアルは現時点で得られている知見に基づき構成されたものであり、今後の技術革新や学術的知見の蓄積に留意頂くとともに、必要に応じて見直しを行うものとする。

※1：これまで一般的には「曝気(式)循環施設」等と呼称されてきた施設である。しかし、現場における名称の使われ方を見た時、湖底に酸素を供給し溶存酸素濃度を上昇させるための装置である「深層曝気施設」と呼び名が似ているため、施設を混同するケースが見受けられることから、本施設の方法と目的を的確に表した「気泡式循環施設」という呼び名を用いることとした。

ダム貯水池水質対策有識者委員会名簿

(順不同、敬称略)

委員長 松尾 直規 (中部大学 名誉教授)

委員 浅枝 隆 (埼玉大学 名誉教授)

〃 梅田 信 (東北大学大学院工学研究科 准教授)

〃 古賀 憲一 (佐賀大学 名誉教授)

〃 田中 宏明 (京都大学大学院工学研究科 教授)

〃 中野 伸一 (京都大学生態学研究センター 教授)

〃 山下 洋正 (国立研究開発法人土木研究所 水環境研究グループ水質チーム 上席研究員)

〃 吉村 千洋 (東京工業大学環境・社会理工学院 准教授)

事務局 津森 貴行 (国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課 流水管理室長)

〃 小澤 盛生 (〃 流水管理室 企画専門官)

〃 佐瀬 勝亮 (〃 流水管理室 流水企画係長)

〃 菊池 健太 (〃 流水管理室 係員)

〃 川崎 将生 (国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室長)

〃 西村 宗倫 (〃 水循環研究室 主任研究官)

〃 對馬 育夫 (国立研究開発法人土木研究所 水環境研究グループ水質チーム 主任研究員)

委員会開催 第1回委員会 令和3年2月8日

第2回委員会 令和3年2月22日

※委員，事務局の所属役職は、参加当時のものである。

目 次

1. 総説	1-1
1-1. 目的	1-1
1-2. 対象	1-2
1-3. 適用範囲	1-3
1-4. 本マニュアルと既往手引き・マニュアルとの関係	1-4
2. 対象とする水質変化現象と気泡式循環施設の概要	2-1
2-1. 対象とする水質変化現象	2-1
2-2. 富栄養化現象の原因となる藍藻類の概要	2-3
2-3. 気泡式循環施設の構造及び機能	2-13
3. 気泡式循環施設の設置・運用・効果確認の実施手順	3-1
3-1. 概説	3-1
3-2. 発生要因の推定	3-4
3-2-1. 発生源の推定	3-4
3-2-2. 発生メカニズムの推定	3-6
3-3. 対策の検討・実施	3-9
3-3-1. 目標設定	3-9
3-3-2. 対策の一次抽出	3-17
3-3-3. 対策選定及び諸元設定	3-19
3-3-4. 気泡式循環施設の詳細設計	3-25
3-3-5. 運用ルールの設定及びモニタリング調査(実証運用時調査)計画立案	3-27
3-4. 効果確認(対策検討・実施プロセス)	3-29
3-4-1. 対策効果発現状況の確認	3-29
3-4-2. 運用ルールの改善	3-31
3-4-3. モニタリング調査(管理運用時調査)計画立案	3-33
3-5. 効果確認(維持管理プロセス)	3-34
3-6. 運用・調査・対策施設の効率化の検討	3-36
3-6-1. 運用の効率化	3-36
3-6-2. モニタリング調査の効率化	3-37
3-6-3. 対策施設の効率化	3-38
3-7. 施設更新時の検討手法	3-39
3-7-1. 基本的な考え方と手順	3-39

3-7-2. 与条件の変化把握	3-41
3-7-3. 施設に係る技術動向の把握	3-42
4. 本マニュアル適用にあたっての留意事項	4-1
5. 資料編	5-1
5-1. 藍藻類の生理生態に関する知見	5-1
5-1-1. 環境要因と出現藻類種との関係に関する知見	5-1
5-1-2. 藍藻類の群体サイズと浮沈回数との関係に関する知見	5-3
5-1-3. 藍藻類の種の違いと温度依存性の関係に関する知見	5-3
5-1-4. 藻類種と好適水温の関係に関する知見	5-4
5-1-5. 藍藻類の増殖に影響する微量金属の存在に関する知見	5-5
5-1-6. 藍藻類の浮沈速度と体積の関係に関する知見	5-6
5-1-7. 光強度と増殖速度の関係に関する知見	5-7
5-1-8. 国立環境研究所における藍藻類に関する研究	5-9
5-2. 気泡式循環施設による水質改善効果発現状況の違いに関する知見	5-13
5-3. 発生要因の推定に関する有益な事例	5-15
5-3-1. 灰塚ダムにおける発生メカニズムの推定で示された新たな知見	5-15
5-3-2. 田瀬ダムの事例	5-15
5-4. 目標設定に係る有益な事例	5-20
5-4-1. 三春ダムの事例	5-20
5-4-2. 田瀬ダムの事例	5-22
5-5. 発生要因の推定～対策選定に係る有益な事例	5-23
5-5-1. 野村ダムの対策選定を念頭に置いた発生要因の推定事例	5-23
5-5-2. 釜房ダムにおけるカビ臭発生タイプの分類事例	5-26
5-6. 気泡式循環施設の諸元設定方法	5-31
5-6-1. 透明度の観測値がない場合の必要混合水深の設定方法	5-31
5-6-2. 空気吐出深度の設定方法	5-31
5-6-3. 施設規模(空気量・基数)の設定方法	5-33
5-7. 気泡式循環施設の詳細設計方法	5-38
5-7-1. アンカー	5-38
5-7-2. ワイヤ	5-38
5-7-3. 空気圧縮機の選定	5-38
5-7-4. 散気管の設計	5-40
5-7-5. 送気方法と配管ルート	5-41

5-7-6. 送気管の設計	5-42
5-8. 運用ルールの設定に係る有益な事例	5-45
5-8-1. 三春ダムにおける運用ルールの設定事例	5-45
5-8-2. 釜房ダムにおける運用ルールの設定事例	5-46
5-8-3. 弥栄ダムにおける運用ルールの設定とその見直し事例	5-49
5-9. モニタリング調査計画の立案に係る有益な事例	5-52
5-9-1. 田瀬ダムにおける実証運用時調査計画の立案事例	5-52
5-9-2. 鹿野川ダムにおける実証運用時調査計画の立案事例	5-56
5-10. 対策効果発現状況の確認に係る有益な事例	5-60
5-10-1. 田瀬ダムにおける富栄養化現象の抑制状況の確認事例	5-60
5-10-2. 三春ダムにおける富栄養化現象改善の指標値の達成状況の確認事例 ..	5-60
5-10-3. 田瀬ダムにおける気泡式循環施設の機能の確認事例	5-61

－ 索 引 －

本マニュアルの構成

目次構成

本マニュアルは、大きく5つの章により構成している。

1. 総説

気泡式循環施設を設置・運用し、その効果確認を行う際の基本的な考え方、適用範囲について記載している。

2. 対象とする水質変化現象と気泡式循環施設の概要

本マニュアルを読むうえで基礎となる事項として、富栄養化現象や藍藻類による水質障害の概要、気泡式循環施設の概要について解説している。

3. 気泡式循環施設の設置・運用・効果確認の実施手法

気泡式循環施設を設置・運用し、その効果確認を行う際の手順や方法等を「ダム貯水池水質改善の手引き」において示されている水質改善対策の体系に沿って解説している。

また、既存の気泡式循環施設を更新する際に検討すべき事項やその手順についても解説している。

4. 本マニュアル適用にあたっての留意事項

本マニュアルに基づいて各ダム貯水池において気泡式循環施設の設置・運用・効果確認を行う際に必要と考えられる留意事項について記載している。

5. 資料編

3章において解説した各項目について、技術的・専門的な事項に関する最新知見や事例等を紹介している。

各章の構成

本マニュアルの各章における構成を以下に示す。

(箱書き)

気泡式循環施設の設置・運用・効果確認に関する検討を行う上で、基本となる事項を記載している。

【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、解説を記載している。

【●章の参考文献】

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、手引き、マニュアル、書籍等を章毎にまとめて記載している。

1. 総説

1-1. 目的

本マニュアルは、ダム貯水池において発生する富栄養化現象への対策として気泡式循環施設を活用する際の設置・運用・効果確認の方法について、基本的事項及び留意事項等を示すものである。

【解説】

ダム貯水池では、上流から流入する栄養塩類が貯水池内に滞留すること等が要因となり、富栄養化現象に起因する水質障害（アオコ、淡水赤潮、カビ臭等）が発生することがある。本マニュアルで対象とする気泡式循環施設は、これら富栄養化現象のうち藍藻類に由来する水質障害がダム貯水池で発生した場合に実施する対策の一手法であり、これまで多くのダム貯水池で効果を挙げてきた。

本マニュアルでは、藍藻類由来の富栄養化現象への対策として気泡式循環施設を導入しているダム貯水池において実施されてきた調査をもとに解析及び検討を行った結果を例示することにより、同施設を効果的・効率的に導入するための方向性を示すことを目的とした。

また、富栄養化現象の原因の一つとなる藍藻類については、古くから数多くの研究が行われてきており、現在も研究途上である。本マニュアルでは、これら研究成果の中から気泡式循環施設の導入の際に参考となる知見を整理した。

なお、本マニュアルは、現時点で収集できた藍藻類に関する知見、気泡式循環施設の諸元設定方法、既往実績の中で有益と考えられる運用方法、効果確認方法等について記載したものである。

藍藻類の生理生態については、現在も研究が進められている途上であり、気泡式循環施設に関しても、今後の技術革新により、より効率的な循環混合手法や的確な効果確認方法が確立される可能性があることから、今後の学術的・技術的な知見の蓄積に留意頂くとともに、必要に応じて見直していくこととする。

1-2. 対象

本マニュアルにおいて対象とする水質改善対策は、藍藻類に由来する富栄養化現象への対策として導入される気泡式循環施設とする。

【解説】

気泡式循環施設とは、水温差（密度差）によって成層化したダム貯水池において、気泡の浮力により貯水池中底層部の低水温水塊を表層へ連行し、貯水池内に循環流を発生させることにより、水温成層状況を変化させる機能を持つ施設をいう。

気泡式循環施設は、これまで各ダム貯水池において「曝気循環施設」「曝気装置」等の名称で呼ばれてきた。本施設は底層嫌気化対策として導入される深層曝気施設と異なり湖水を曝気する（貯水池底層の湖水を空気や酸素と接触させて溶存酸素(DO)濃度を上昇させる）ことを主たる目的としていないことから、その違いを明確にするために本施設の機能を端的に表す名称として参考文献 1)において使用されている用語を参考に「気泡式循環施設」と呼称することとした。

1-3. 適用範囲

本マニュアルは、河川管理施設として設置されたダムにおいて気泡式循環施設の設置・運用・効果確認に係る検討を行う際に適用する。

【解説】

本マニュアルは、河川法第 3 条の規定に基づく河川管理施設のダム（同法第 17 条に規定する兼用工作物のダム、特定多目的ダム法第 2 条に規定する多目的ダム、独立行政法人水資源機構法第 2 条に規定する特定施設を含む）において気泡式循環施設の設置（施設の改良や更新を含む）、運用、効果確認に係る各種検討を行う際に適用する。

以下に本マニュアルで想定する気泡式循環施設の設置に係る適用範囲を示す。

(1) 新設時

富栄養化現象が発生しているが対策が実施されていない既設ダムにおいて、気泡式循環施設を導入する場合。なお、建設予定あるいは建設中のダムにおいて富栄養化現象が懸念されている場合にも参考とすることができる。

(2) 既存施設の能力不足に伴う施設改良時

気泡式循環施設が既に導入されているが十分な効果が得られていないダムにおいて、気泡式循環施設の運用条件、規模、配置に問題がある場合に、気泡式循環施設の増設・配置の見直し等を行う場合。

(3) 既存施設の老朽化に伴う更新時

既存の気泡式循環施設の老朽化に伴い施設を更新する際や、古い年代に空気揚水筒式の気泡式循環施設が設置されたダムにおいて、施設更新の際にエネルギー効率の高い散気方式に交換されるような場合に、気泡式循環施設の規模・配置・運用の見直し等を行う場合。

1-4. 本マニュアルと既往手引き・マニュアルとの関係

本マニュアルは、「ダム貯水池水質改善の手引き」に示されている水質改善対策の体系に基づいて構成されるものである。

本マニュアルは、「曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案)」に記載されている気泡式循環施設に関する事項を更新したものである。

【解説】

本マニュアルは、「ダム貯水池水質改善の手引き」（平成 30 年 3 月 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課）（以下「手引き」という。）に示されている水質改善対策の体系のうち「1. 発生要因の推定」「2. 対策検討・実施」「3. 効果確認(対策検討・実施プロセス)」「4. 効果確認(維持管理プロセス)」「5. 運用・調査・対策施設の効率化検討」の各作業ステップにおいて、気泡式循環施設を対象とした場合に実施すべき標準的事項及び留意事項を記載したものである。

その具体的内容は「3. 気泡式循環施設の設置・運用・効果確認の実施」に取りまとめている。また「5. 資料編」では、技術的な事項について新たな学術的知見や事例等を掲載している。

本マニュアルは、「曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案)」（平成 17 年 10 月 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課）（以下「旧マニュアル」という。）に記載されている事項のうち富栄養化対策としての気泡式循環施設の運用に関する事項を更新するとともに、設置・効果確認に関する事項を追加したものである。したがって、選択取水設備に関する事項については、引き続き旧マニュアルを参照することとする。

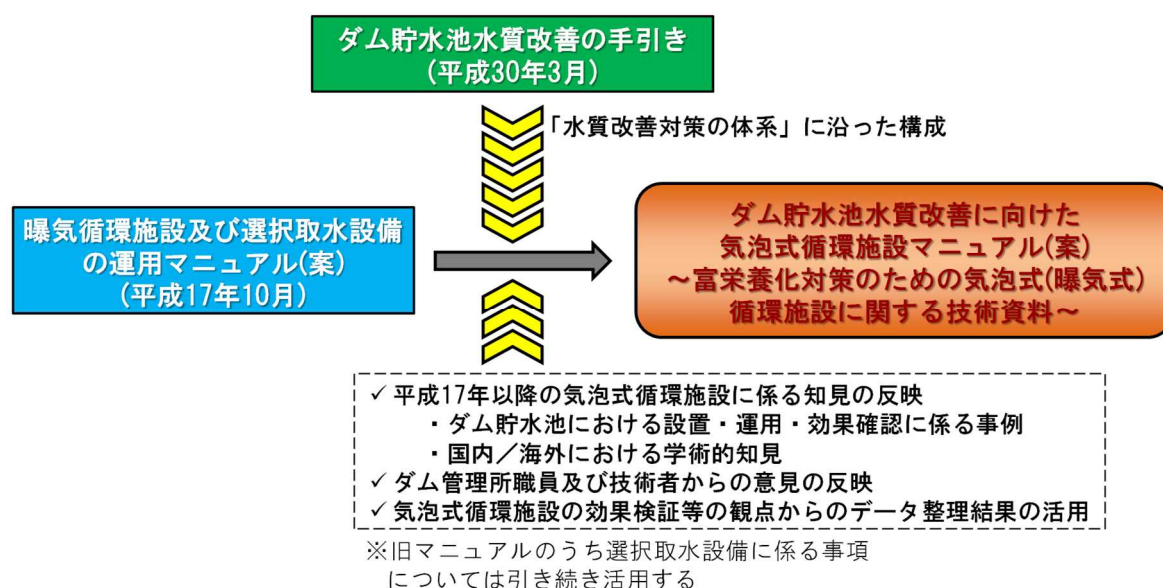


図 1.1 本マニュアルと既往手引き・マニュアルとの関係

ダム貯水池で水質変化現象が発生した場合に実施する調査、対策検討、効果確認等の一連の作業において、適用する要領・手引き等を整理したものを図 1.2 に示す。

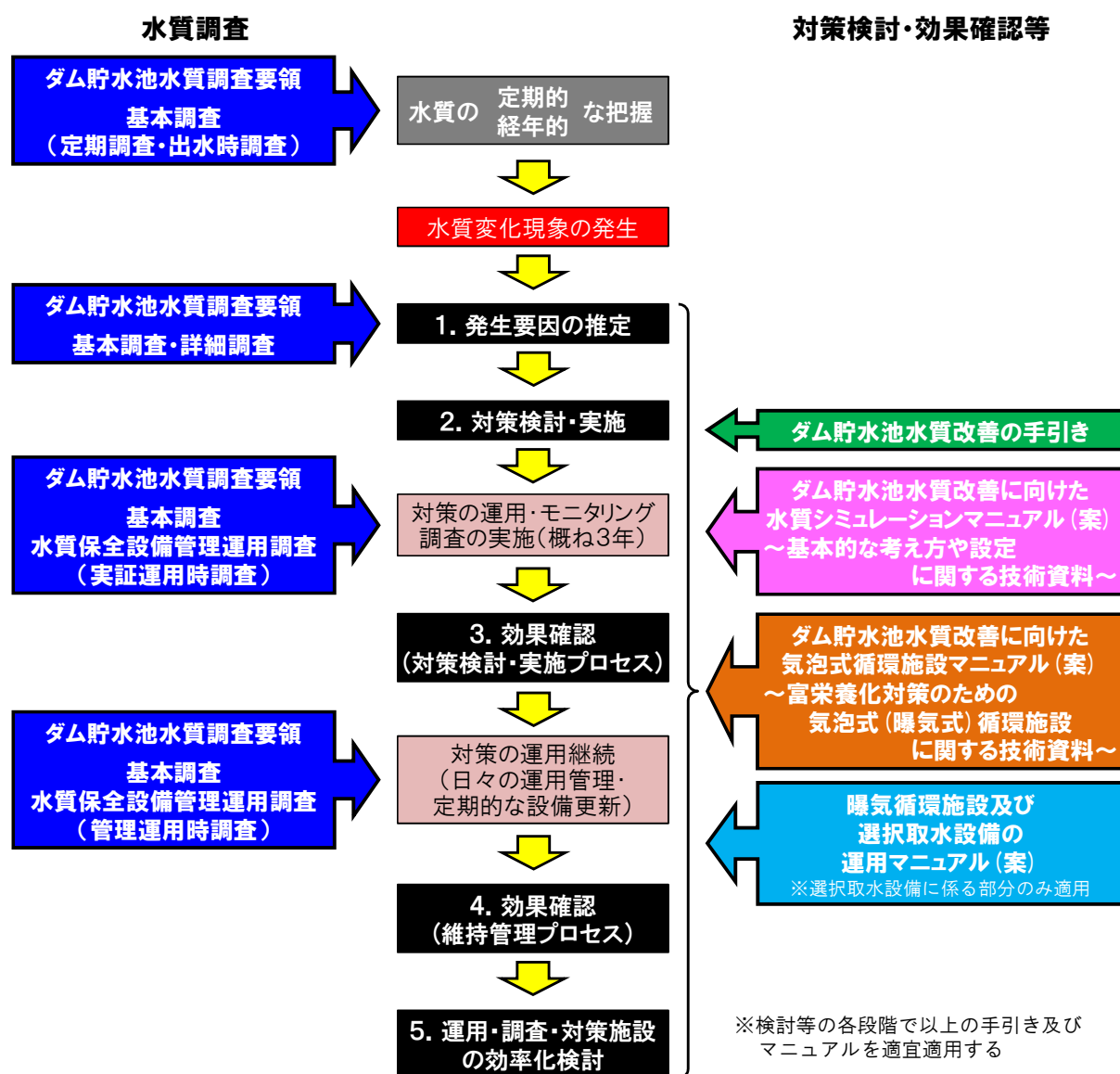


図 1.2 既往要領及び手引きの適用範囲

【1 章の参考文献】

- 1) 古里栄一・曹磊・久納・今本博臣・奥西将之・前田広人：気泡式循環対策の必要施設規模指標に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 75, No. 2, I_691-I_696, 2019
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/75/2/75_I_691/_article/-char/ja/
- 2) 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 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 17 年 10 月
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam7/pdf/bakki_sentaku.pdf
- 3) ダム貯水池水質改善の手引き：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 30

年 3 月

https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf2/damtyosuichisuisitukaizentebikiH30.pdf

- 4) ダム貯水池水質調査要領：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 27 年 3 月 https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/suishitsu/index.html

2. 対象とする水質変化現象と気泡式循環施設の概要

2-1. 対象とする水質変化現象

本マニュアルで対象とする主な水質変化現象は、富栄養化現象のうち藍藻類の大量発生に伴う水質障害とする。

【解説】

富栄養化現象とは、ダム貯水池において窒素やリン等の栄養塩類の濃度が高まり、その結果、生物生産が増大する現象を指す。

富栄養化現象による影響としては、一次生産の増大によるCODの上昇、透明度の低下、水色の変化、pHの上昇等の変化が生じ、更に現象が進むと、アオコや淡水赤潮等の発生とそれに伴う景観の悪化、藍藻類の一部が生成するカビ臭等により、ダム貯水池内及び放流先の下流河川における水利用への影響等がある。

また、富栄養化現象が進行すると、大量発生した植物プランクトンの死骸が沈降・堆積し分解されることなどにより、主に変水層（温度躍層）以深のDO（溶存酸素量）が減少する。DOの減少が更に進み嫌気状態になると、底泥に堆積した栄養塩類の溶出が顕在化し、富栄養化現象を更に促進させる場合もある。

本マニュアルでは、これら富栄養化現象のうち藍藻類の大量発生に伴う水質障害のうち以下(1)～(4)の現象を主な対象とし、気泡式循環施設によりこれら藍藻類の発生抑制を目的とした設置・運用方法及び施設導入後の効果確認方法について示すこととする。なお、底層嫌気化に伴って発生する放線菌を原因とするカビ臭現象については、気泡式循環施設の空気吐出口を湖底付近とすることで効果を期待できる場合もあるが、水質改善効果発現機構が異なることから本マニュアルの対象外とする。

富栄養化現象には、渦鞭毛藻類の大量発生に伴って発生する淡水赤潮や緑藻類の大量発生に伴って発生する水の華等もあるが、これらの現象に対しては気泡式循環施設による対策効果が見込めず導入実績も殆どないことから、本マニュアルの対象外とする。

- (1) 藍藻類 *Microcystis* 属(ミクロキスティス)の異常増殖によるアオコ発生【景観障害・利水障害】
- (2) 藍藻類 *Dolichospermum* 属(ドリコスペルマム)(旧名称 *Anabaena* 属 アナベナ)の異常増殖によるアオコ、カビ臭(ジェオスミン)の発生【景観障害・利水障害】
- (3) 藍藻類 *Aphanizomenon* 属(アフアニゾメノン)の異常増殖によるアオコ、カビ臭(ジェオスミン)の発生【景観障害・利水障害】
- (4) 藍藻類 *Pseudanabaena* 属(シュードアナベナ)(旧名称 *Phormidium* 属 フォルミディウム)や *Oscillatoria* 属(オシラトリア)の異常増殖によるカビ臭(2-MIB)の発生【利水障害】



図 2.1 藍藻類によるアオコ現象の事例
 (① : *Microcystis* 属によるアオコ現象／② : *Dolichospermum* 属(旧名称 *Anabaena* 属)によるアオコ現象／③ *Microcystis* 属によるスカム／④ : *Microcystis* 属による湖水着色状況)

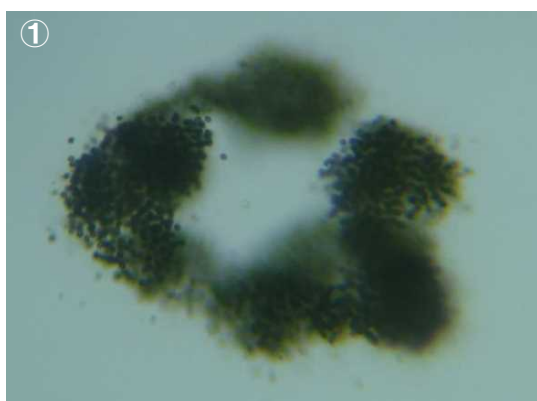


図 2.2 藍藻類の顕微鏡写真
 (① : *Microcystis* 属 ② : *Dolichospermum* 属(旧 *Anabaena* 属)
 ③ : *Aphanizomenon* 属 ④ : *Pseudanabaena* 属(旧名称 *Phormidium* 属))

2-2. 富栄養化現象の原因となる藍藻類の概要

気泡式循環施設の設置・運用・効果確認は、富栄養化現象の原因となる藍藻類の生態的特徴や近年の分類体系の変更に留意して実施するものとする。

【解説】

ダム貯水池で発生する藻類には、本マニュアルで対象とする富栄養化現象の原因となる藍藻類のほか、珪藻類、緑藻類、渦鞭毛藻類等、多種に渡る。このうち、本マニュアルで対象とする藍藻類は、アオコの原因となる藍藻類とカビ臭の原因となる藍藻類に大別され、その組み合わせは前項で述べた(1)～(4)の通りである。また、藍藻類を原因とする水質障害（アオコ・カビ臭）について、原因藻類属との関係を整理したものを図 2.3 に示す（一部、ダム貯水池での水質障害事例は少ない藍藻類種も属レベルで記載し図を構成している）。



図 2.3 藍藻類の種類と水質障害との関係

本マニュアルで対象とする富栄養化現象の原因となる藍藻類は、ダム貯水池内の栄養塩類濃度が高い場合のほか、ダム貯水池表層付近の光・水温の状況が増殖に適した環境となった場合に寡占的に増殖すると言われているが、藍藻類の生態的特徴は属種により少しずつ異なる。このため、その特徴を把握することは、気泡式循環施設の設置・運用・効果確認において重要なだけでなく、効果の発現にも大きく影響する。

また、カビ臭の原因となる藍藻類の一部については、近年、海外においてカビ臭の原因となる一部の藍藻類について分類体系の変更が行われた。これにより、今までよりも詳細なカビ臭物質生成メカニズムの推定が可能となった事例がある。したがって、最新の知見を考慮して検討等を行うことが望ましい。

なお、藍藻類の一部は毒素を体内に生成することが知られており、海外での報告事例が多い。本マニュアルでは、参考としてこれら藍藻類が生成する毒素についても紹介する。各ダム貯水池ではこれら情報を参考にし、必要に応じて対応を講ずることが望ましい。

以下にアオコ・カビ臭等の原因となる藍藻類の概要を示す。なお、アオコ・カビ臭等の原因となる藍藻類の生理学的あるいは生態学的に関する国内外の有益な知見については、「5-1. 藍藻類の生理生態に関する知見」に取りまとめた。

(1) アオコ・カビ臭の原因となる藍藻類の概要

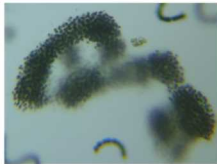
ダム貯水池で発生する富栄養化現象のうち、藍藻類を原因とする水質障害としてはアオコの大量発生による景観障害や藍藻類の発生に伴い生成されるカビ臭物質（ジェオスミン・2-MIB）による利水障害が挙げられる。アオコに関しては、ダム貯水池の景観障害という形で顕在化することが多い。また、過度に集積すると湖面上に集積してスカム状になり死滅すると、強烈な腐敗臭を発する場合もある。カビ臭に関しては、ダム貯水池からの直接取水あるいはダム下流河川からの取水した後の浄水場において検出されると、活性炭やオゾン等によるカビ臭除去が必要となることで問題が顕在化する。また、浄水場の処理能力を超えるカビ臭が発生した場合には、供給された水道水中にカビ臭物質が残存し、ユーザーからの苦情等で問題が顕在化することもある。このため、水道事業体では浄水場でのカビ臭物質除去の体制を構築するとともに、水道水源となるダム貯水池においてカビ臭物質の発生状況の監視やダム管理者と連携した対応等を行っているケースも多く見受けられる。

これら水質障害を発生させる藍藻類は、P2-1の(1)～(4)に示す属種のものが主であるが、それぞれの属種毎に生態的特徴が少しずつ違うことが知られている。表 2.1 はアオコを形成する *Microcystis* 属あるいはアオコとカビ臭を併発する *Dolichospermum* 属・*Aphanizomenon* 属についての生態的特徴を整理したものである。これによると増殖に適した水温や光要求性に違いがあることがわかる。例えば、初夏～秋季に渡り発生するアオコ現象について、季節により出現する藻類種が異なる（6月中は *Dolichospermum* 属、7月以降は *Microcystis* 属など）事例が見られるが、この特徴に基づいて整理すると種の変化の理由も説明ができる。

なお、地球温暖化をはじめとする気候変動の影響によりダム貯水池の表層水温が以前よりも高くなる傾向が確認されているダム貯水池では、表層水温がアオコ・カビ臭の原因となる藍藻類の増殖に適する水温帯に移行することにより、これまで顕在化していなかったアオコ・カビ臭現象が発生することが懸念される¹⁾。

藍藻類は、細胞内に浮袋となるガス胞(エアロトープ)を有しており、細胞あるいは群体・糸状体の比重により浮上と沈降を繰り返すことが知られている。特に *Microcystis* 属に関してはその特徴が顕著である。明け方にガス胞によって得られる浮力で浮上してくると、貯水池表層付近で光を利用して光合成を行う。光合成に伴って細胞分裂を行いながら細胞内への貯蔵物質も増えくると、相対的に細胞の比重は重くなり、ガス胞による浮力が相対的に小さくなると、昼過ぎからは表層から水温躍層付近まで沈降していく。その過程で呼吸と光合成

表 2.1 藍藻類の種類と生態的・生理的特徴の違い

水質障害		アオコ	アオコ・カビ臭			
原因藻類	属名	Microcystis 属	Dolichospermum 属		Aphanizomenon 属	
			螺旋型	直鎖型		
	出現種	Microcystis aeruginosa Microcystis wessenbergii Microcystis ichthyoblabe	Dolichospermum mucosum Dolichospermum spiroides	Dolichospermum smithii Dolichospermum viguieri	Aphanizomenon klebahnii	
	写真					
生態的特徴	鉛直分布	ガス胞による浮力により表層に集積し、表水面を膜状に覆う。		ガス胞による浮力により表層に集積するが、膜状になるのは稀。		ガス胞による浮力により表層に集積するが、スカム状にはならない。
	最適水温	25℃	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
生理的特徴	アオコ形成	○	○	○	○	
	カビ臭生成	×	○	○	○	
	藍藻毒生成	○	○	○	○	

のバランスが逆転し呼吸が卓越するようになると、今度は細胞の比重が軽くなり、再びガス胞による浮力を受けて沈降から浮上へと転ずる。そして明け方に再び表層付近に到達し、光合成をおこなう。これが *Microcystis* 属の日周運動である。その他の藍藻類についても上述するような浮上と沈降は行われるが、*Microcystis* 属ほどの速度は有しておらず、数日かけて浮上・沈降すると言われている。なお、貯水池表層付近で利用する光については、適度な強度が適していると言われており、藍藻類が夏季の強い日射に長時間曝されると逆に光合成を阻害される(強光阻害)場合もある。

これと合わせて、藍藻類は1年を通じた消長サイクルも有している。アオコの原因となる藍藻類は、水中の環境が適合しない期間はダム貯水池の湖底に沈降している。*Microcystis* 属は群体(コロニー)の状態で湖底に存在し、*Dolichospermum* 属や *Aphanizomenon* 属は細胞の中でも不適合環境下において種を残すことに特化したアキネート(休眠細胞)が湖底に存在して越冬する。春になり水温上昇やそれに伴う湖底面付近の嫌気化等の要因によりこれら藍藻類が発芽し、水中へと回帰する(一部のダム貯水池では、春季の出水による貯水池上流部の攪乱によって、湖底に存在する藍藻類が物理的に湖水中へ回帰することが影響している場合もある)。この発芽に必要な要件としては、一般的に光と水温が知られており、このことから1年を通じて光の透過しない深度の湖底は発生源として機能していない(光が届かないため発芽できない)ものと考えられている。ただし、渇水時の利水補給、水運用方法の変更、事前放流等により貯水位が例年よりも低下した場合には、光の透過する範囲が変化すること

で、従前は発生源として機能しなかった部分が新たに発生源として機能する可能性がある。このような場合には、秋季に突然アオコが発生する等の例年と異なるアオコ発生状況が観察される可能性がある。

貯水池内への回帰後は、上述した日周運動により徐々に細胞密度を増加させることで、アオコ現象が徐々に顕在化し、貯水池表面が浮上したアオコにより緑色に着色する(図 2.1 ①、②、④写真)。このような状態の時には、COD、クロロフィル a 等の藻類存在量を示す水質指標が高くなるほか、T-N、T-P 等の栄養塩類濃度も藻類存在量の増大に伴って高くなる。また、pH や DO の値も高くなる。浮上したアオコの集積が過度に進むと、集積したアオコが貯水池表面でスカム状になり(図 2.1 ③写真)死滅する場合もある。なお、貯水池によっては、発芽直後にアオコ現象が顕在化する場合もあるが、これは湖底に蓄積した藍藻類の存在量が極めて多く、湖底から回帰した量だけでアオコが顕在化する細胞密度に達していることが原因と考えられる。

秋季になり貯水池内の水温が低下してくると、増殖に適した環境が破壊されることにより藍藻類は徐々に増殖をやめ次の年へ向けた越冬のために湖底にそのまま沈降したり、アキネートを形成して湖底に沈降させたりする。

以上の日周運動と 1 年の消長サイクルを模式的に図化したものが図 2.4 である。



図 2.4 アオコを形成する藍藻類の日周運動と 1 年の消長サイクル

アオコの発生に関しては、水温や水質といった貯水池環境だけでなく、湖面付近の風向・風速特性も大きな影響を及ぼす。特に藍藻類の中でも相対的に浮力が大きく湖水表面まで浮上しやすい特徴を有する *Microcystis* 属については、風による吹送の影響が大きく、各ダム貯水池で集積しやすい場所や時間帯等が特定しやすい。

例えば図 2.5 の事例では、湖面付近の風速が 0.5m/s 以下の時にアオコの視認時間が長くなっており、風速が 0.5m/s 以上の時のアオコ視認時間との違いが明確に表れている。この事例のダムでは午後になると風が強くなる傾向があり、アオコの浮上時間と風の弱い時間帯が一致していることも相まって、午前中のアオコ現象が顕著となっている。

アオコ対策として局所対策を考える際には、以上に示したように風による集積特性を把握することが重要となる。

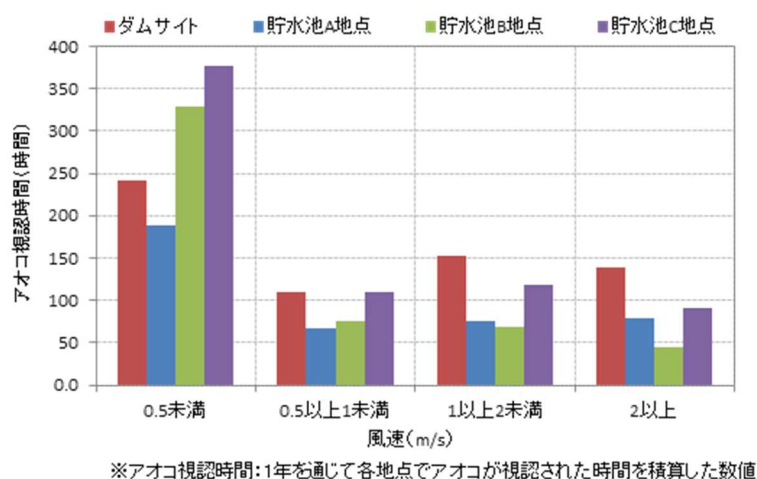


図 2.5 風速とアオコ視認時間との関係性の整理事例

通常、アオコ・カビ臭の原因となる藍藻類の存在有無や存在量を把握するためには、顕微鏡による同定計数が必要であるが、夏季にクロロフィル a 濃度が高くなる（一般的には 25 $\mu\text{g/L}$ を超過する）とこれら藍藻類が寡占的に増殖している場合が見られることから、こういった水質指標を目安に状況を把握することも可能であり、気泡式循環施設をはじめとする水質改善対策の目標設定にも活用できる（目標設定については、3-3-1. 目標設定を参照）。

(2) カビ臭の原因となる藍藻類の概要

わが国では、P2-1 (1)～(3) で示したアオコ・カビ臭の原因となる藍藻類とは異なり、アオコ状態にはならないもののカビ臭現象を発生させ、深刻な問題を引き起こすタイプの藍藻類、(4)に示した *Pseudanabaena* 属(旧名称 *Phormidium* 属)等のような藍藻類も存在する。

水道水質基準では、カビ臭物質(ジェオスミン、2-MIB)が水質基準項目に設定されており、基準値は 10ng/L 以下となっている。上水道において実際に問題が顕在化するのは、浄水場から給水されて一般家庭等で利用される際に、水道水がカビ臭いあるいは風呂を沸かした時に揮発してカビ臭さを認識することで顕在化することが多い。カビ臭を感じるレベルは人によって大きく差があり数 ng/L～100ng/L 程度と幅が広い。このため、浄水場ではガスクロマトグラフ質量分析計(GC/MS)による定量分析だけでなく、人による官能分析を併用している場合もある。

カビ臭が発生した場合、浄水場では活性炭やオゾンによりカビ臭物質の吸着・除去を行って処理する。近年では、ガスクロマトグラフ質量分析計による分析を自動化し、分析結果に応じて自動的に活性炭を投入する等の対応も見られるようになってきた。

これらカビ臭の原因となる藍藻類は、ダム貯水池内で寡占的に増殖して優占種化しなくても数 10～100 糸状体/mL 程度の低レベルの存在量でカビ臭現象が顕在化することが特徴の一つとして挙げられる。

また、カビ臭の原因となる藍藻類は、光合成の二次代謝産物としてカビ臭物質を生成すると言われているが、個体の生長に余裕がある時に多くのカビ臭物質を生成するという説や、該当藻類の増殖に適さない(ストレスとなる)環境の方が生成するカビ臭物質が多くなるという説等あり、カビ臭を生成するメカニズムについては依然として不明な点が多い。さらに、下流河川の河床に付着性藍藻類が繁茂することで、カビ臭現象が顕在化する事例も報告されている。

ダム貯水池でカビ臭現象が発生する場合、以前はその原因藻類として *Phormidium* 属が疑われることが多かった。しかし、実際のダム貯水池でのカビ臭現象の発生状況を見てみると、*Phormidium* 属が確認されているがカビ臭物質は検出されたりされなかったり、*Phormidium* 属細胞密度とカビ臭物質濃度との間に量的関係が見出せない等、両者の関係性が明瞭でない場合も多く散見された。

その原因の一つとして挙げられるのが、貯水池内で確認される *Phormidium* 属が、同種と同定されるにもかかわらず、発臭・非発臭のタイプがあり、両者の区別ができない、という“分類・現象の複雑さ”である。

一方、国外では、Komarek による藍藻類の新たな分類案が提案され、国内でも一部の研究者がこれに着目した研究を進めつつあり(表 2.2)、実際に新たな分類体系に基づいた藻類分析を行うことで、これまで明瞭でなかったカビ臭原因藻類とカビ臭物質の関係性が明確になった事例も確認されるようになった(表 2.3)。以上の分類体系の変化に伴い、従来は *Phormidium* 属と呼ばれていた属種が *Pseudanabaena* 属、*Planktothrix* 属等に詳細分類され、カビ臭を生成する属種とそうでない属種の違いも明確になってきた。

また、最近では従来行われてきた顕微鏡を用いた藍藻類の形態的特徴に着目した分類同定に代わって、DNA解析を用いてカビ臭物質を生成する遺伝子を持つ藻類の存在有無を確認することで原因を特定する方法も確立されつつある。

なお、水道事業者は、以上に示した名称による藻類の同定ではなく、旧名称を用いている場合も多く、藻類種とカビ臭との対応関係も若干異なる。水道事業者は主に「日本の水道生物」²⁾に掲載されている藻類種名とカビ臭との関係性(表 2.4)を利用していることから、これも水道事業者から提供される水質データを参照する際には参考になる。

表 2.2 新たな分類体系に基づく属種とカビ臭生成との関係²⁾

種 類 (学名)	生活体制 (生息場所)	カビ臭産出能		備 考
		ジェオスミン	2-MIB	
<i>Geitlerinema splendidum</i>	底 生 型	+		
<i>Jaaginema geminatum</i>	底 生 型		+	
<i>Leibleinia subtilis</i>	底 生 型	+		
<i>Lyngbya aestuarii</i>	底 生 型		+	
<i>Oscillatoria curviceps</i>	底 生 型		+	
<i>Oscillatoria tenuis</i> var. <i>levis</i>	底 生 型		+	
<i>Oscillatoria variabilis</i>	底 生 型		+	
<i>Phormidium allorgei</i>	底 生 型	+		
<i>Phormidium amoenum</i>	底 生 型	+		
<i>Phormidium breve</i>	底 生 型	+	+	株特異的
<i>Phormidium chalybeum</i>	底 生 型		+	
<i>Phormidium cortianum</i>	底 生 型	+		
<i>Phormidium favosum</i>	底 生 型		+	
<i>Phormidium formosum</i>	底 生 型	+		
<i>Phormidium</i> strain LM689	底 生 型		+	
<i>Phormidium simplissimum</i>	底 生 型	+		
<i>Phormidium</i> sp. strain NIVA 51	底 生 型	+	+	
<i>Phormidium tenue</i>	底 生 型		+	
<i>Phormidium uncinatum</i>	底 生 型	+		
<i>Phormidium viscosum</i>	底 生 型	+		
<i>Planktothrix prolifica</i>	底 生 型	+		
<i>Porphyrosiphon martensianus</i>	底 生 型		+	
<i>Tychonema bornetii</i>	底 生 型	+		株特異的
<i>Tychonema granulatum</i>	底 生 型	+	+	
<i>Hyella</i> sp.	着 生 型		+	
<i>Microcoleus</i> sp.	着 生 型	+		
<i>Anabaena circinalis</i>	浮遊性型	+		
<i>Anabaena crassa</i>	浮遊性型	+		
<i>Anabaena lemmermannii</i>	浮遊性型	+		
<i>Anabaena macrospora</i>	浮遊性型	+		
<i>Anabaena solitaria</i>	浮遊性型	+		
<i>Anabaena viguieri</i>	浮遊性型	+		
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	浮遊性型	+		
<i>Aphanizomenon gracile</i>	浮遊性型	+		
<i>Oscillatoria limosa</i>	浮遊性型		+	
<i>Planktothrix agardhii</i>	浮遊性型	+	+	株特異的
<i>Planktothrix cryptovaginata</i>	浮遊性型		+	
<i>Planktothrix perornata</i>	浮遊性型		+	
<i>Planktothrix perornata</i> var. <i>attenuata</i>	浮遊性型		+	
<i>Pseudanabaena catenata</i>	浮遊性型	+	+	
<i>Pseudanabaena limnetica</i>	浮遊性型		+	
<i>Symploca muscorum</i>	土 壌	+		

表 2.3 従来分類・新分類・カビ臭生成能の比較事例

従来の分類	Komarekによる分類	カビ臭物質生成能	
		2-MIB	Geosmin
<i>Phormidium tenue</i>	<i>Pseudanabaena catenata</i> <i>Leptolyngbya</i> sp. (short cell) <i>Leptolyngbya</i> sp. (long cell) <i>Komvophoron</i> sp.	○	
<i>Phormidium</i> spp.	<i>Jaaginema gracile</i> <i>Jaaginema</i> cf. <i>quadripunctatum</i> <i>Geitlerinema amphibium</i> <i>Geitlerinema nematodes</i> <i>Geitlerinema splendidum</i>		○
<i>Oscillatoria</i> spp.	<i>Phormidium breve</i> <i>Phormidium chlorinum</i> <i>Phormidium terebriforme</i> <i>Phormidium inundatum</i> <i>Oscillatoria subbrevis</i>		
<i>Nostocales</i>	<i>Anabaena ocillarioides</i> <i>Anabaenopsis</i> sp.		

表 2.4 カビ臭の種類と原因藻類種の関係

(「日本の水道生物-写真と解説-改訂版」³⁾より異臭味に関する箇所を抜粋)

現象		原因生物
湖沼・貯水池	2) 異臭味 A) かび臭・土臭 a) ジェオスミン	<i>Anabaena macrospora</i> <i>A. mucosa</i> <i>A. planctonica</i> <i>A. spiroides</i> var. <i>crassa</i> <i>A. ucrainica</i> <i>Streptomyces</i>
	b) 2-メチルイソボルネオール	<i>Oscillatoria tenuis</i> <i>O. limnetica</i> <i>Phormidium autumnale</i> <i>P. tenue</i> <i>Streptomyces</i>
	B) 魚臭・生ぐさ臭	<i>Cryptomonas</i> <i>Uroglena</i> <i>Mallomonas</i> <i>Synura</i> <i>Chrysochromulina</i> 淡水海綿類 コケムシ類
	C) 海藻臭	<i>Gonyostomum</i>

(3) 藍藻類が生成する毒素の概要

アオコやカビ臭の原因となる藍藻類の一部には、肝臓毒や神経毒といった毒素を生成する種類も存在する。藍藻類が生成する毒素に関する報告は、1878 年にオーストラリアのアレキサンドリア湖で発生した家畜死亡について G. フランシスが Nature 誌に発表したのが最初とされている。その後、1930 年代から 1940 年代にかけて、カナダ、アメリカ、オーストラリア、南アフリカを中心に牛、馬、羊等の家畜やアヒル、ガチョウ等の水鳥、キジ、野ウサギ等の野生動物の被害が数多く報告された。近年では、2007 年に中国の太湖でアオコが大発生し、市民が飲用水確保に奔走した事件、1996 年にブラジルでアオコが発生する水源を利用していた病院で多くの透析患者が亡くなる事件等がある⁴⁾⁵⁾。日本における報告は、1980 年東京都立衛生研究所の渡辺ら⁶⁾によりなされたものが最初とされているが、人間への目立った健康被害はこれまでのところ報告されていない。なお、藍藻類が生成する毒素に関しては、生物濃縮についての知見は少なくその実態は不明確だが、生物体内への残留性についてはいくつか報告されている⁷⁾⁸⁾ことから、生態系への影響も懸念される。

藍藻類が生成する主な毒素と生成する藍藻類種は表 2.5 に示す通りである。この中でも最も良く知られているのは *Microcystis* 属が生成するミクロキスチン(microcystin)であり、我が国のダム貯水池においても調査が行われている事例もある。

表 2.5 藍藻類が生成する毒素

毒の種類	藍藻類種	毒素の種類
神経毒	<i>Anabaena flos-aquae</i>	アナトキシン-a アナトキシン-a(S)
	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	アフアントキシン
肝臓毒	<i>Anabaena flos-aquae</i>	ミクロキスチン (ヘプタペプチド)
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	
	<i>Microcystis viridis</i>	
	<i>Oscillatoria agardhii</i>	
	<i>Nodularia spumigena</i>	ノジュラリン (ペンタペプチド)
	<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	シリンドロスペルモプシン (アルカロイド)
	<i>Umezakia natans</i>	

以上のような状況からWHO(世界保健機関)では、ミクロキスチンの飲料水中の暫定ガイドライン値として 0.001mg/L を 1998 年 3 月に設定⁹⁾するほか、2003 年には表 2.6 に示すように水遊び水域のガイドラインも定めている。また、国独自で表 2.6 に示すようなガイドラインを定めている国も多く、アメリカでは表 2.7 に示すように州毎に対策レベルが設定されている。

表 2.6 各国の水遊び水域のガイドライン

	水遊び水域ガイドライン(対策レベル)			
WHO(2003)	急性健康被害のリスク	シアノバクテリア (細胞/mL)	クロロフィルa ($\mu\text{g/L}$)	ミクロキスチンレベル ($\mu\text{g/L}$)
	低い	<20,000	<10	<10
	中程度	20,000~100,000	10~50	10~20
	高い	100,000~10,000,000	50~5,000	20~2,000
	非常に高い	>10,000,000	>5,000	>2,000
オーストラリア	10mg/L 全ミクロキスチン、全シアノバクテリア体積 > 4mm ³ /L, <i>Microcystis aeruginosa</i> > 50,000細胞/mL			
カナダ	20mg/L 全ミクロキスチン、全シアノバクテリア > 100,000細胞/L			
ニュージーランド	12mg/L 全ミクロキスチン、全シアノバクテリア体積 > 1.8mm ³ /L			

表 2.7 アメリカ各州における対策レベルの設定状況

州名	対策レベル
カリフォルニア州	ミクロキスチン 0.8 $\mu\text{g/L}$ アナトキシン-a 90 $\mu\text{g/L}$ シリンドロスペルモプシン 4 $\mu\text{g/L}$
ニューハンプシャー州	50%以上の細胞が有毒プランクトンで構成される場合
ケンタッキー州 スイスビル地域	忠告:シアノバクテリア > 20,000細胞/mL 注意:シアノバクテリア > 100,000細胞/mL
ロードアイランド州	スカムの目視確認 シアノバクテリア > 70,000細胞/mL
ウィスコンシン州	シアノバクテリア > 100,000細胞/mL スカム層確認
バーモント州	目視で確認可能なスカムの存在 シアノバクテリア 4,000細胞/mL ミクロキスチン-LR 6mg/L アナトキシン-a 10 $\mu\text{g/L}$

一方、我が国においては、水道水質基準や水浴場の水質の判定基準等に藍藻類が生成する毒素に関する基準は設けられていない（東京都では要検討項目として挙げられており、目標値 0.0008mg/L(暫定値)が示されている）。しかし、一部のダム貯水池では、水質調査項目に毒素を追加して監視するとともに、毒素が検出された場合には、取水先の浄水場等に連絡し、ダム貯水池からの取水深を変更する等の対応を行っているところもある。

なお我が国では、浄水処理過程で毒素は分解処理されることが殆どであり、水道利用において問題となることは多くない。ただし、湖面利用等で直接藍藻類に触れる（主にアオコ状態の湖水に触れる）場合には、アオコが皮膚に付着する等したときにかぶれる場合があり、注意が必要である。

2-3. 気泡式循環施設の構造及び機能

本マニュアルで扱う気泡式循環施設は、湖水の密度差によって成層化しているダム貯水池において、気泡の浮力により周囲の水塊を連行させ、貯水池内に循環流を発生させることにより、水温成層状況を変化させて富栄養化現象の原因となる藍藻類の寡占的増殖を抑制する施設である。

【解説】

(1) 概要

気泡式循環施設は、貯水池内の中底層から気泡を吐出し、気泡の浮力により周囲の低水温水塊を連行することで、貯水池内に等水温(等密度)の層を形成する施設である。

この作用により、貯水池内では富栄養化現象の原因となる藍藻類が表層付近に滞留できる時間が短くなり、増殖に必要な光・水温等の条件が適合しにくくなることで、藍藻類の寡占的な増殖が抑制され、水質改善効果が発現すると言われている。

気泡式循環施設には、空気の吐出方式、設置方式により幾つかの種類に分類することができ、目的や条件に応じて適切な方式を採用する。

以下より、気泡式循環施設の構造及び機能について解説する。

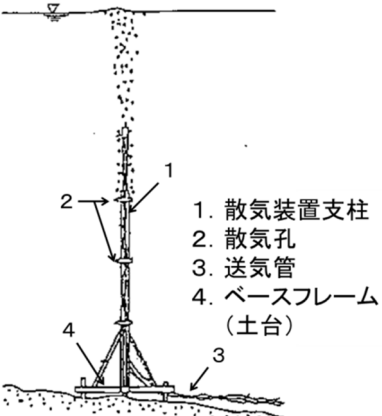
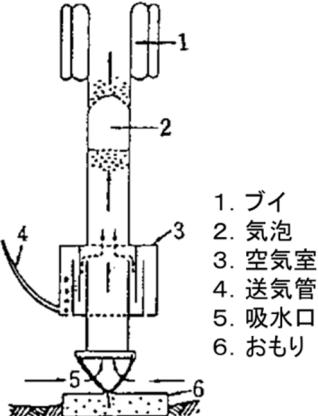
(2) 構造

1) 形式

気泡式循環施設には、表 2.8 に示すように「散気方式」「空気揚水筒方式」がある。散気方式は、国土交通省及び独立行政法人水資源機構が管理するダムにおいて、導入している事例が多い。一方、空気揚水筒方式は、水道専用ダムにおいて導入事例が多い傾向がある。

散気方式と空気揚水筒方式の特徴を表 2.8 に示す。

表 2.8 気泡式循環施設の形式

散気方式	空気揚水筒方式
地上のコンプレッサーより送られた空気を水中に設置された空気吐出口から吐出させ、気泡の浮力により上昇流を生じさせて貯水池内を循環混合させる方式である。 循環混合のエネルギー効率は他の方式よりも高い(定常状態を仮定した実験データによる経験式より¹⁾)とされている。 空気吐出口標高よりも下層の湖水が滞留しやすく、底層の貧酸素化が促進される場合がある。	地上のコンプレッサーより送られた空気を揚水筒の下部の空気室に貯め、間欠的に気泡塊(気泡弾)を揚水筒から吐出させ、揚水筒内の水を押し上げるとともに底層の水を筒内に吸入する。気泡弾の浮力により上昇流を生じさせ、貯水池内を循環混合させる方式である。 吸水口から底層の湖水を吸引するため、底層貧酸素化の抑制対策としても機能する。
	

2) 構成

散気方式の気泡式循環施設には、設置方式の違いから「湖底設置式」と「水面設置式」の2種類に分けられる(図 2.6)。

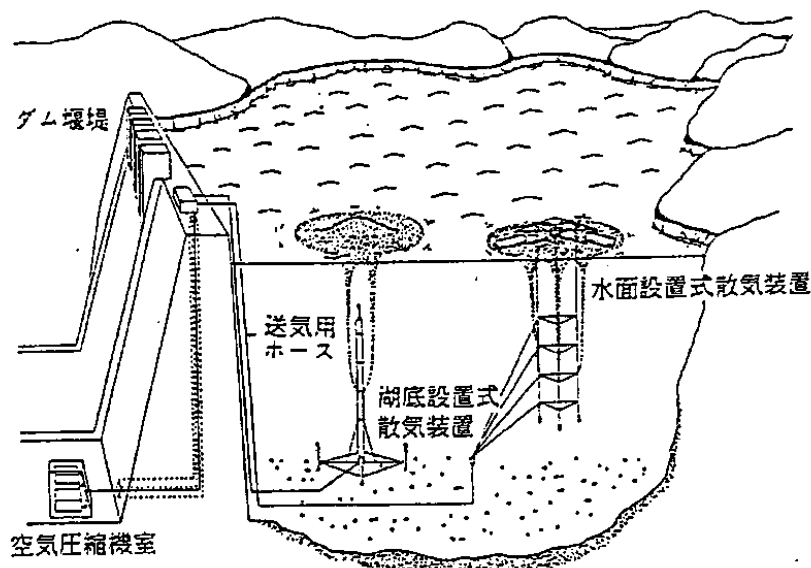


図 2.6 気泡式循環施設の設置方式の例(湖底設置式・水面設置式)

a) 湖底設置式の気泡式循環施設

湖底設置式の気泡式循環施設（図 2.7）は、貯水池の底部に気泡式循環施設本体を支持部材によって固定し、地上に設置した空気圧縮機で生成する圧縮空気を送気管、切替弁、送気管を介して、気泡式循環施設本体に取り付けられている空気吐出口に送気して水中に散気する。

空気吐出口の標高を変更する場合には、空気吐出口の位置を変更することなく、地上において切替弁を操作して指定する位置にある空気吐出口に連結されている送気パイプに送気して、空気吐出口から散気させることが可能な構造である。

本方式は、湖底にベースプレートを設置しているため、水面設置式に比べて施設構造が安定しているが、供用開始後のダム貯水池では、ダイバーによる潜水作業で施工する範囲が多くなるため、施工性（貯水池深部の暗所での作業が増えることによる）や維持管理性、経済性に留意する必要がある。

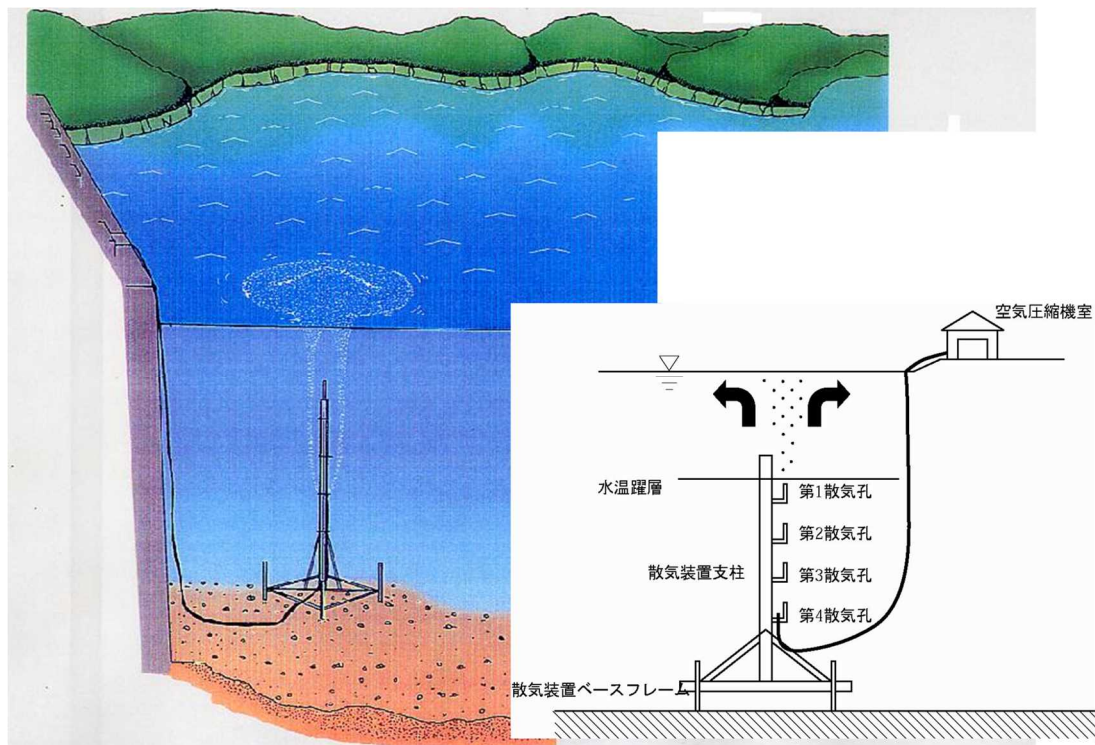


図 2.7 湖底設置式の気泡式循環施設の構成要素 (例)

b) 水面設置式の気泡式循環施設

水面設置式の気泡式循環施設（図 2.8）は、貯水池の水面に支持フロートの浮力によって気泡式循環施設本体をつり下げ、地上に設置した空気圧縮機から送気管、切替弁、送気管を介して、気泡式循環施設本体に取り付けられている散気管に送気して水中に散気する。

散気標高は、基本的には水位に追従することになるが、支持フロートにウインチを設置することにより、貯水池の条件に応じて空気吐出口の標高を変更することが可能となる。

本方式は、散気管が水中に垂下された状態となり湖底に支持された状態ではないため、出水時に流速が増大する箇所に設置した場合は、装置の破損やワイヤーと送気管が絡まる等の問題が発生する場合もあり注意が必要である。こういった問題を回避する場合にもウインチを設置しておく、出水時の故障を回避するために散気管を巻き上げる等の対応が可能となる。

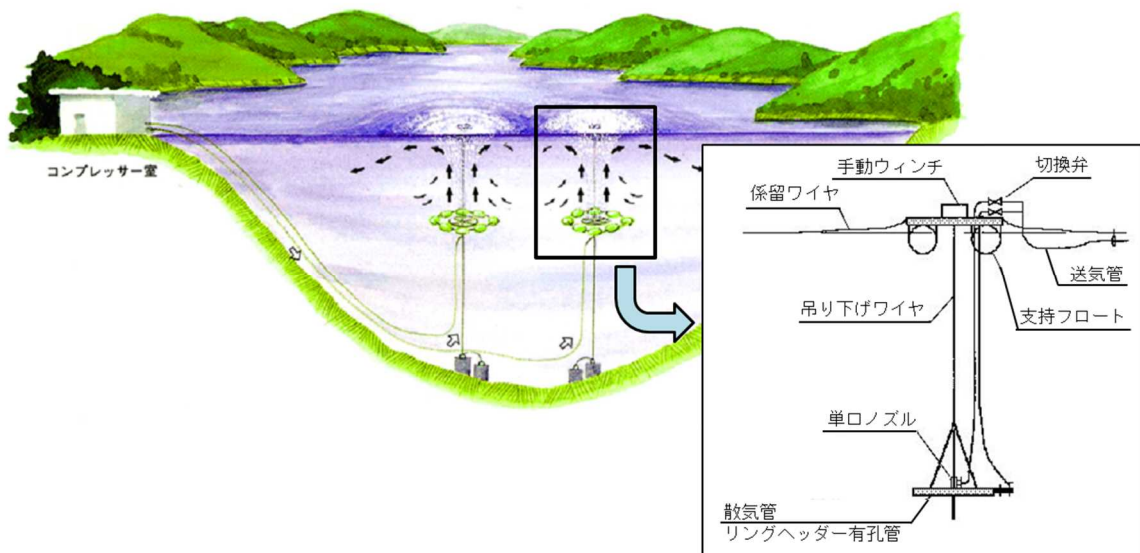


図 2.8 水面設置式の気泡式循環施設の構成要素 (例)

(3) 機能

気泡式循環施設による水質改善は、1) 流動制御機能 が発現することにより、2) 藍藻類の増殖抑制機能 が発現すると考えられている。

1) 流動制御機能

気泡式循環施設によりダム貯水池内に形成される流動状況は、図 2.9 に示す模式図により説明できる¹¹⁾¹²⁾。以下に形成される流動状況の概略を示す。

- 気泡式循環施設の空気吐出口から放出された気泡は、周辺の低温水を巻き込みながら上昇する（内部(上昇)プルーム(上昇流)の形成）。
- 上昇した空気と低温水が水面に到達すると、気泡は大気に抜け、低温水は上昇時の勢いで周囲に広がる。
- 周囲に広がった低温水は、表層水よりも冷たく密度が大きいいため、勢いを失ったところで急激に降下する（外部(下降)プルーム(下降流)の形成）。
- 降下に転じた低温水は、外部プルームよりも外側の周辺水を巻き込み混合しながら降下し、周囲の水と密度が等しくなった深度で横方向に広がり始める（イントリユージ

ョン流(貫入流)の形成)。

- 以上の流れが長時間継続すると、イントリュージョン流の厚みが徐々に厚くなり、最終的には表層と空気吐出口付近の密度が同等となる状態が広域に広がり、貯水池全体が混合した状態となる。
- 以上の作用により、表層と空気吐出口付近の水温が同等となるとともに、空気吐出口付近の水温は相対的に上昇する。これにより、気泡式循環施設を稼働する前には存在していた表層付近の水温躍層（一次躍層）は解消され、空気吐出口付近に強固な水温躍層が形成される。

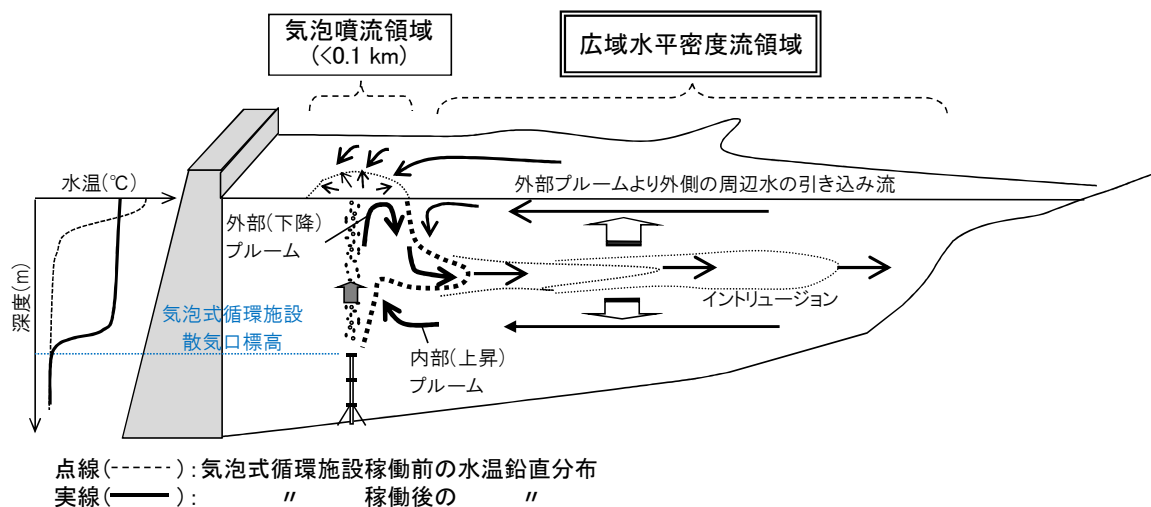


図 2.9 気泡式循環施設による流動状況(概略) (参考文献 12) に一部加筆修正)

2) 藍藻類の増殖抑制機能

1)に示した流動制御機能により、貯水池内が混合した状態となると、藍藻類の寡占的増殖に不適合となる a) 光制限効果、b) 循環混合効果、c) 水温低下効果 が発現し、藍藻類の増殖促進機能が発現しにくくなると考えられている。なお、気泡式循環施設の稼働により貯水池が混合した状態になると、混合希釈の効果によりCODやクロロフィルa濃度が低下することが一般的であるが、藍藻類の寡占的増殖が抑制される代わりにその他の藻類の増殖が促進されて、CODやクロロフィルa濃度が低下しない場合もある。

a)～c) 各々の効果は以下のようにまとめられる。

a) 光制限効果

貯水池内の温度躍層の位置と光合成量・藻類量の鉛直分布を模式的に表すと、図 2.10 のようになる。

図 2.10 の左図は、温度躍層が真光層内にある状態を示している。このとき、植物プラ

ンクトンは（種類により多少異なるが）基本的には大部分が水面から温度躍層の間に分布し、特にガス胞を有する藍藻類はその深度間での鉛直日周運動を行い、ガス胞を有さない植物プランクトンは自重により沈降する。温度躍層の位置が真光層内にあり、温度躍層の下端まで光が届く状態であれば、その範囲では藻類は活発に光合成することができる。このため、真光層内の光合成量（藻類の増殖量）は多くなり、結果として藻類量は表層付近と温度躍層近辺で多くなるなどして全体として藻類量も多くなる。

一方、図 2.10 の右図は、温度躍層が真光層より深い位置にある状態を示している。このとき、温度躍層が真光層より深い位置にあると、光が届く深度は左図と同じであるが、真光層以深では藻類は光合成ができない（すなわち増殖ができない）。一様な温度分布を持つ層は鉛直方向に混合されやすいため、層内に均等に分布する藻類は、浅い位置にいるものは増殖できるが、深い位置にいるものは増殖ができず、全体としては左図の状態よりも光合成量は少なく藻類の量も少なくなる。

以上の効果は光制限効果と呼ばれており、藍藻類が緑藻類や珪藻類と比較して光に対する耐久性が弱い（光要求性が強い）ことを勘案すると、温度躍層が有光層より深い位置にある状態を形成することは、藍藻類の増殖抑制に対してより高い効果を発揮させるものと考えられている。しかし、近年の研究によると、藍藻類は日射に対して必ずしも強くなく、むしろ光の多少弱い場所を好むという報告や藍藻類の種類によってこの性質が異なるという報告等があり、対策の目標種によって温度躍層の位置を変える必要も出てきている。

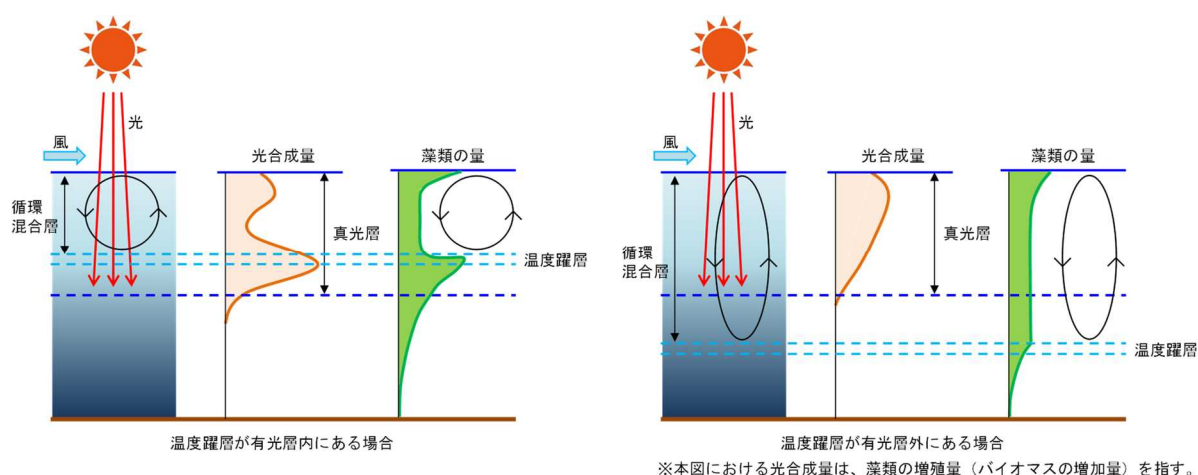


図 2.10 貯水池内の温度躍層の位置と光合成量・藻類量の鉛直分布の関係（模式図）

b) 循環混合効果

ダム貯水池で発生する主な植物プランクトンは、藍藻類、緑藻類、珪藻類の3種類である。緑藻類と珪藻類は基本的に自ら生育する位置を変えることができないが、藍藻類の一部の種は細胞内にガス胞（エアロトープ）を有しており、ガス胞による浮力を用いて鉛直方向に生育する位置を変えることができる。具体的には、光合成と呼吸のバランスにより

細胞の密度が変化し、光合成が呼吸よりも卓越して比重が重くなると沈降し、呼吸が光合成よりも卓越して比重が軽くなると浮上する。これにより、藍藻類は1日の中で鉛直方向に移動（日周運動）すると言われている。

このため、成層が安定して表層付近の水が滞留しやすくなると、藍藻類は表層～温度躍層間に集積しやすくなり、光を優先的に摂取することができるようになるため、表層付近の緑藻類や珪藻類の量が徐々に減少し、結果として藍藻類が寡占的に増殖することとなる。

このとき、気泡式循環施設により循環混合層が形成されると、表層付近に形成されていた一次躍層が解消するとともに、空気吐出口付近に強固な温度躍層が形成されることで貯水池内の水温鉛直分布が大きく変化する。これに伴い、表層付近に集積していた藍藻類の鉛直方向の移動範囲（深度）が広がり、緑藻類や珪藻類との競合が促進されると、藍藻類よりも増殖速度の速い緑藻類や珪藻類も増えることができるようになり、結果として藍藻類の寡占的増殖が抑制される（十分な空気吐出深度を確保した場合には、藻類全体の生産量が縮減し、藻類量が減少することもある）。さらに、藍藻類の鉛直方向の移動範囲が広がることにより、貯水池深部へ到達した藍藻類のガス胞（エアロトープ）が収縮することで浮力が低下し、そのまま湖底へ沈降することによりアオコ発生抑制効果を発揮する。なお、気泡式循環施設の空気吐出口が補償深度よりも大幅に深い位置（藻類の光合成量がゼロとなる深度）に設置された場合は、藍藻類だけでなく全ての藻類の増殖がなくなるため、藻類全体の生産量が縮減される。

ただし、「2-2. 富栄養化現象の原因となる藍藻類の概要」に示した対象とする藍藻類に関しては、種類によりガス胞の数や大きさが異なるため、浮沈の程度も異なる。したがって、気泡式循環施設による循環混合効果もこの浮沈の程度が大きいものほど大きくなる傾向があることから、発生している藍藻類の属種により効果発現の程度に違いが生じることには注意が必要である。

c) 水温低下効果

成層が形成されている貯水池の成層形成の違いと藻類の鉛直分布の関係を模式的に示すと図 2.11 のようになる。

表層付近が受熱により温まると、表層付近に成層が形成され、藻類の増殖量は多くなる。しかし、気泡式循環施設により循環混合が促進されると、表層付近の水温が低下し、藻類の増殖量も少なくなる。

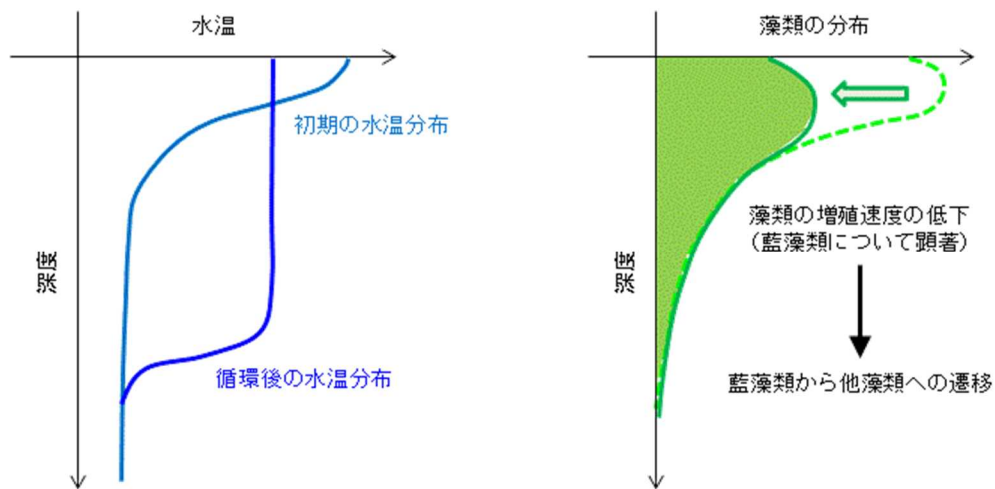


図 2.11 表層水温の低下と藻類への効果(模式図)

特に藍藻類は、緑藻類や珪藻類と比べて高水温を好むことが知られており（図 2.12）、気泡式循環施設により表層の水温を藍藻類の増殖に適した水温以下に低下させることができれば、緑藻類や珪藻類の増殖との競争状態が創出され、結果として藍藻類の寡占的増殖を抑制することができる¹²⁾。

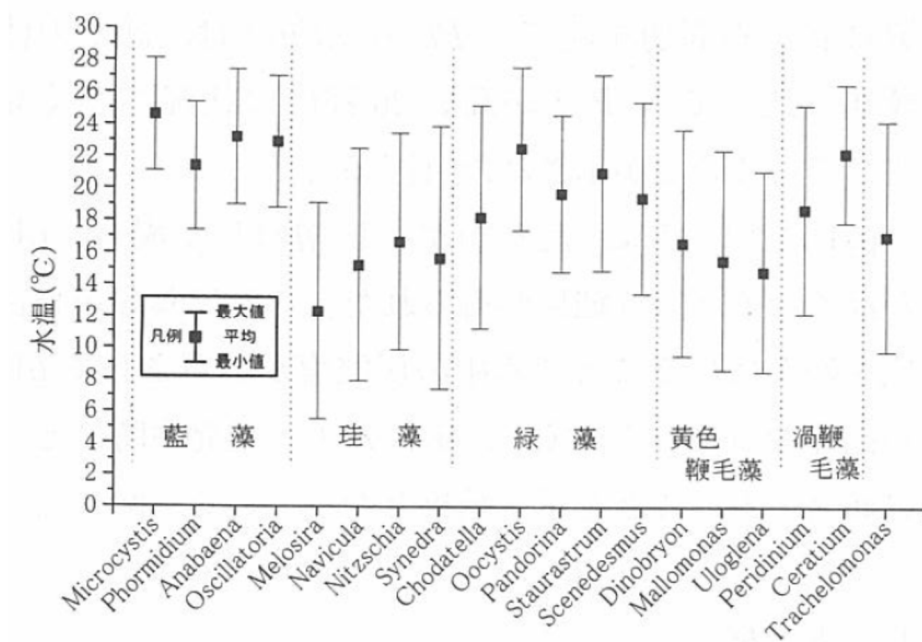


図 2.12 藍藻類とその他藻類の発生時水温の違い¹³⁾

(4) 留意事項

気泡式循環施設の運用は、発生している藍藻類由来の富栄養化現象への効果とその他の水質変化現象への影響とがトレードオフの関係となる場合がある。複数の水質変化現象への対

応が求められる場合には、気泡式循環施設の運用が及ぼす影響を事前に検討し、水質改善の優先度やバランスを勘案して気泡式循環施設の導入を決定する必要がある。

気泡式循環施設の運用に関する具体的な留意事項については、「4. 本マニュアル適用にあたっての留意事項」に詳述している。

【2章の参考文献】

- 1) 梅田信・落合雄太：気候変動による国内のダム湖水質への影響評価，土木学会論文集 G(環境)，Vol. 68, No. 5, I_127-I_135, 2012
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejer/68/5/68_I_127/article/-char/ja/
- 2) 岸田直裕・秋葉道宏：総説 水道における障害生物—シアノバクテリア—，日本食品微生物学会誌 Vol. 26, No. 4, p196-p. 197, 2009
- 3) 日本の水道生物 -写真と解説- 改訂版：日本水道協会，1993 年
- 4) 彼谷邦光：飲料水に忍びよる有毒シアノバクテリア，裳華房，2001
- 5) 渡辺真利代・原田健一・藤木博太：アオコ・その出現と毒素，東京大学出版，1994
- 6) 渡辺真利代・大石真之：藍藻 *Microcystis Aeruginosa* の毒性-1979 年の結果-，東京都立衛生研究所研究年報，pp. 273-274
- 7) 環境儀 アオコの有毒物質を探る-構造解析と分析法の開発-：国立環境研究所，No. 52, 2014 <https://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/52/02-03.html>
- 8) 浪越通夫：古くて新しいアオコ毒素マイクロシスチン類，化学と生物 39 巻，5 号，p. 313-p. 321, 2001
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kagakutoseibutsu1962/39/5/39_5_313/pdf
- 9) Ingrid Chorus, Jamie Bartram：Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management, WHO, 1999
https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/toxicyanobact/en/
- 10) 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 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 17 年 10 月
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam7/pdf/bakki_sentaku.pdf
- 11) 水理公式集[2018 年版]：土木学会，pp872
- 12) 古里栄一，久納誠，丹羽薫，梅田信：貯水池気泡循環対策による広域水平密度流～低ブルーム数における実用式～，土木学会論文集 G(環境)，Vol. 71, No. 7, III_455-III_466, 2015
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejer/71/7/71_III_455/article/-char/ja/
- 13) 天野邦彦：多目的ダム貯水池の水温と流入河川・貯水池特性との関連について，ダム工学, 2000 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsde1991/10/2/10_2_128/pdf/-char/ja

3. 気泡式循環施設の設置・運用・効果確認の実施手順

3-1. 概説

気泡式循環施設の設置・運用・効果確認は、水質改善対策の体系に基づき、気泡式循環施設の適否判断と気泡式循環施設が選定された場合に実施する事項により実施するものとする。

【解説】

気泡式循環施設の設置・運用・効果確認を行う際は、「ダム貯水池水質改善の手引き」（平成 30 年 3 月 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課）において示されている水質改善対策の体系（図 3.1）に基づき、以下の手順で検討を進めることを基本とする。

検討の手順は、「気泡式循環施設の適否を判断するために実施する事項」と「対策として気泡式循環施設が選定された場合に実施する事項」に大別され、図 3.1 に示す水質改善対策の体系化の概念図もそれに合わせて手引きに加筆・修正を施している。

■ 気泡式循環施設の適否を判断するために実施する事項（図 3.1 中 **A** の範囲）

1. 発生要因の推定

富栄養化現象の継続性が想定され、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、水質改善対策の必要性の判断や気泡式循環施設の適否を判断するための基礎的な情報を得るため、「発生源の推定」及び「発生メカニズムの推定」により発生要因の推定を行う。

2. 対策検討・実施（気泡式循環施設の適否判断前）

富栄養化現象の対策として気泡式循環施設を設置する場合には、発生要因の推定結果等を踏まえた上で、「目標設定」、「対策の一次抽出」、「対策選定」を行う。

■ 対策として気泡式循環施設が選定された場合に実施する事項（図 3.1 中 **B** の範囲）

2. 対策検討・実施（気泡式循環施設の適否判断後）

対策として気泡式循環施設が選定された場合に「諸元設定」、「対策の詳細設計」、「運用ルールの設定及びモニタリング調査計画の立案」、「対策の実施」を行う。

3. 効果確認（対策検討・実施プロセス）

対策検討・実施プロセス段階にある気泡式循環施設は、「対策効果発現状況の確認」、「運用ルールの改善」、「モニタリング調査計画立案（管理運用時調査）」により効果確認を行う。

効果確認の結果、気泡式循環施設の有効性が十分に確認されなかった場合には、「発生要

因の推定」、「対策検討・実施」等の必要な段階に立ち返る。

4. 効果確認(維持管理プロセス)

維持管理段階にある気泡式循環施設は、施設運用により得られる水質改善効果を継続的に確認する。効果確認の結果、富栄養化現象の再発や対策効果の低下等の変化が確認された場合には、対策検討・実施プロセスの「発生要因の推定」、「対策検討・実施」等に立ち返る。

5. 運用・調査・対策施設の効率化検討

気泡式循環施設による対策効果の有効性が確認された場合には、「運用の効率化」、「モニタリング調査の効率化」について検討する。また、気泡式循環施設の更新時には、新技術の適用も含めて、効果的・効率的な対策となるよう「対策施設の効率化」について検討する。

以上に示した各々の手順について基本的事項及び留意事項を次項より示す。

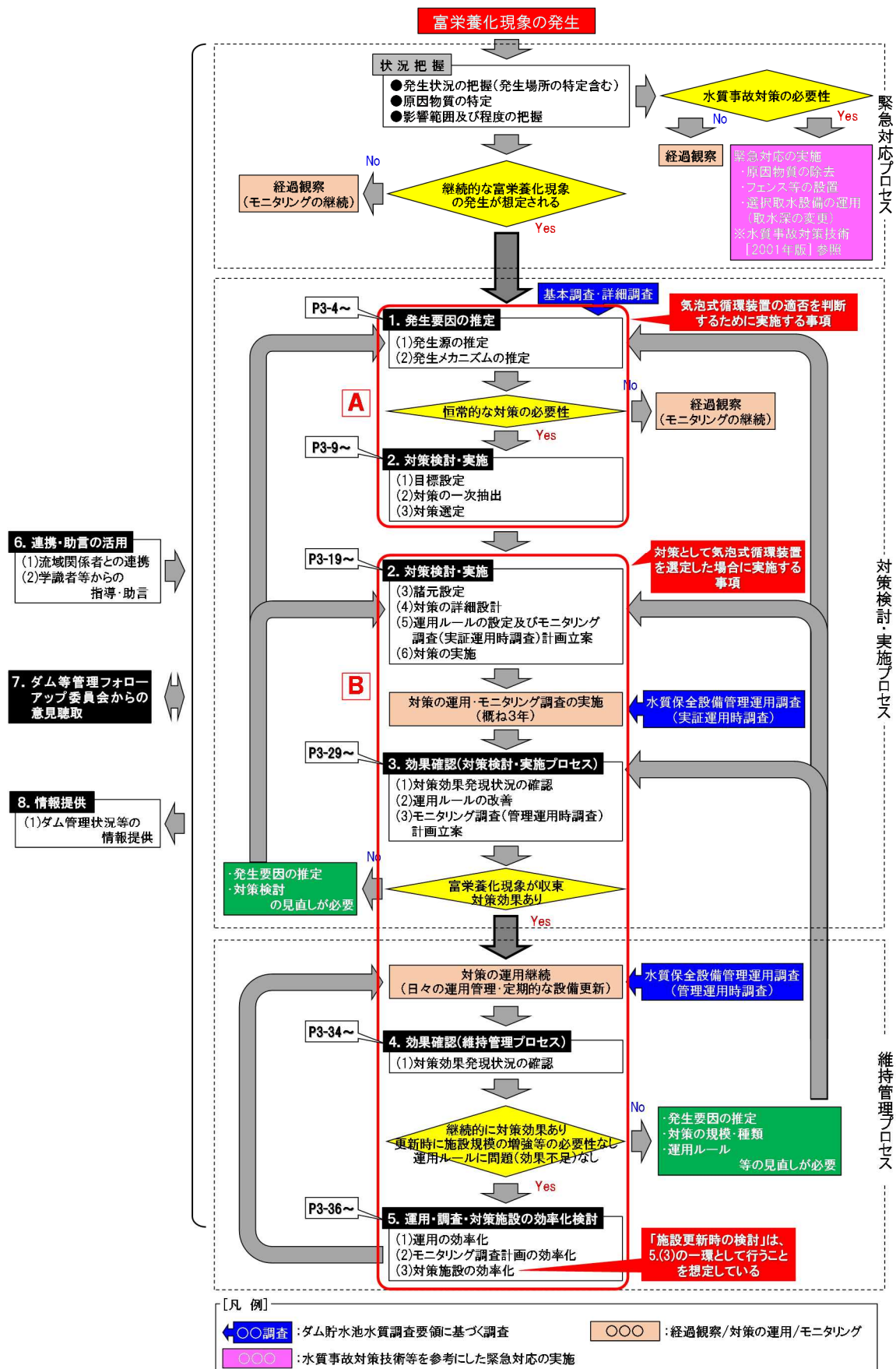


図 3.1 水質改善対策の体系化の概念図

(「ダム貯水池水質改善の手引き」P13 を一部改変 赤枠内が本マニュアルの主な対象範囲)

3-2. 発生要因の推定

3-2-1. 発生源の推定

藍藻類由来の富栄養化現象に関する発生要因を推定するためには、流域、流入水、貯水池内について原因となる藍藻類や栄養塩類等の発生源を推定することを基本とする。

【解説】

藍藻類由来の富栄養化現象の発生要因を推定するためには、「ダム貯水池水質調査要領」（平成 27 年 3 月 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課）（以下「調査要領」という。）に基づいて実施される基本調査（主に定期調査）、詳細調査、緊急対応プロセスにおいて取得した状況把握の結果を解析し、アオコ・カビ臭発生等の原因となる藍藻類の種類や増殖の場といった発生源を推定することが重要である。

また、藍藻類の増殖には栄養塩類が必要不可欠であり、ダム貯水池内で藍藻類に摂取される栄養塩類（汚濁負荷）の発生源を推定することも同様に重要である。

なお、汚濁負荷量を的確に把握するためには、平水時だけでなく出水時の水質調査が重要である（詳細は調査要領の出水時調査を参照）。また、ダム貯水池の特性によっては、湖底からの栄養塩類の溶出負荷にも留意する必要がある。

ダム下流河川でアオコ・カビ臭等の発生が確認された場合には、支川からの流入やダム下流河川が発生源となっている可能性もあることから、情報を広範に収集する必要がある。また、ダム貯水池で発生しダム下流河川に放流されたアオコに由来する多糖質が泡状物質となって確認される場合もあることから、こういった情報の収集にも配慮することが望ましい。

発生源を推定するための一般的な調査としては、以下が挙げられる。

①調査要領に記載された調査に基づく検討

- ・アオコ・カビ臭発生時の貯水池内での植物プランクトン調査結果による原因藍藻類の特定（場合によっては最新の分類体系を用いた種レベルまでの詳細な特定やDNA解析によるカビ臭生成種であるかの確認が必要となる）^{※1}
- ・本川及び支川の平常時と出水時の流入栄養塩類の濃度の把握（流量との積により負荷量として把握する必要もある）
- ・流域の土地利用状況や排水処理形態の変化に伴う排出負荷の変化の把握（フレーム調査^{※2}を定期的実施することによりその変化量の把握が可能となる）
- ・底質調査結果に基づく栄養塩類の蓄積状況の経年的変化の把握

②調査要領に記載されていない調査に基づく検討

- ・貯水池内の底泥表面の植物プランクトン調査によるアオコ・カビ臭の原因となる藍藻類の主な発生源の把握^{※3}

- ・貯水池内の底泥の性状把握によるアオコ・カビ臭の原因となる藍藻類の主な発生源及び底泥中の栄養塩類含有量の把握
- ・貯水池内の底泥を試料とした溶出量試験による底泥からの栄養塩類の供給量の把握
- ・ダム下流河川の河床の付着藻類調査によるカビ臭の原因となる付着性藍藻類の存在有無の確認^{※4}

※1：近年、大規模DNA塩基配列取得装置（次世代シーケンサー）を用いた手法により、網羅的に植物プランクトンを把握できるようになった³⁾。この手法は、従来の光学顕微鏡による検鏡や大腸菌を用いたクローニング手法によるDNA塩基配列取得と比べ、効率的かつ網羅的な解析が可能であるため、迅速な発生源の推定（原因藍藻類の特定）が可能であると考えられる。また、本手法は、原因藍藻類の特定だけではなく、藍藻類等を含む動植物プランクトン種の網羅的な把握が可能なことから、気泡式循環施設の運用効果を評価する際に、存在する微生物種の全体像を把握できることを活用し、装置稼働前後の微生物種の構成の変化から効果を間接的に評価することにも活用することが期待される。

※2：ダム貯水池流域の汚濁負荷を把握するためには、流域の様々な汚濁源となるものについて把握する必要がある。汚濁源としては、人間や家畜、工場・事業場、土地の利用状況などが考えられ、それら各要素の諸量(汚水処理形態別の人口、農業種別土地利用面積、畜産頭数、森林面積、出荷額、水量及び水質原単位等)の調査をいう。

※3：底泥上の藍藻類が原因となって富栄養化現象が発生する(底泥からの初期供給量が現象発生に大きく影響を及ぼす)場合もあることから、各ダム貯水池の状況を勘案し、必要に応じて実施する調査である。

※4：近年、河床の付着性藍藻類がカビ臭原因物質を生成することにより、ダム下流河川においてカビ臭現象が発生する事例が報告されている。

以上の調査に基づく検討の結果、アオコ・カビ臭の原因となる藍藻類が当該ダム貯水池における藍藻類の発生に影響を及ぼすのに十分な量が流入河川から供給されている場合には、気泡式循環施設によりそれ以上の増殖は抑制可能であろうが、流入してくる藍藻類の死滅は期待できないことから、本対策の効果発現が限定的となる可能性がある。

また、当該ダム貯水池において底泥からの栄養塩溶出が著しく、湖内への栄養塩負荷源として無視できない程度であることが判明した場合には、気泡式循環施設を湖底面付近から吐出させることにより栄養塩の溶出抑制による効果が期待できる可能性もある。

以上のような事例も含め、アオコ・カビ臭の原因となる藍藻類の発生源に係る知見は、学術的研究の進展や既往事例の蓄積等により、随時追加、変更されていく可能性があることに留意する必要がある。

3-2-2. 発生メカニズムの推定

藍藻類由来の富栄養化現象に関する発生要因を推定するためには、流域、流入水、貯水池内、放流水、下流河川における水質調査結果、水質シミュレーション、既往事例等を用いて、富栄養化現象による影響を明確にするとともに、富栄養化現象の発生メカニズムを推定することを基本とする。

【解説】

富栄養化現象とは、ダム貯水池において窒素やリン等の栄養塩類の濃度が高まり、その結果、植物プランクトンが異常増殖する現象を指す。富栄養化現象による影響としては、一次生産の増大による透明度の低下、水色の変化、pHの上昇等の変化が生じ、更に現象が進むとアオコや淡水赤潮等の発生とそれに伴う景観の悪化、カビ臭の発生による利水障害等があり、その影響は広範囲に及ぶ。このうち本マニュアルで扱う気泡式循環施設によって対策が可能なのは、アオコ・カビ臭発生の原因となる藍藻類の発生を抑制する場合に限られる。

藍藻類由来の富栄養化現象の発生メカニズムを推定するためには、水質調査結果及び底質調査結果の解析や水質シミュレーションを用いた解析により対象となる藍藻類の発生過程を把握することが重要である。また、藍藻類の発生によって影響を受ける対象(景観、上水道等)や影響の程度をできる限り定量的に把握する必要がある。

藍藻類の異常増殖に影響を及ぼす因子は多岐にわたり、且つ、詳細な因果関係については十分に解明が進んでいないことから、富栄養化現象の発生メカニズム解明は慎重に行う必要がある。そのため、発生要因の推定に対するP D C Aサイクル(図 3.2)の導入が重要となるが、発生メカニズムの推定に注力しすぎると、その解明に長期間を要し、対策実施が遅れてしまうことも考えられる。

このことから、富栄養化現象が現状では不確定要素を多分に含む現象であることを念頭に置き、対策検討に必要な解明レベルを十分に見定めた上で発生メカニズムの推定を行うことが重要である。

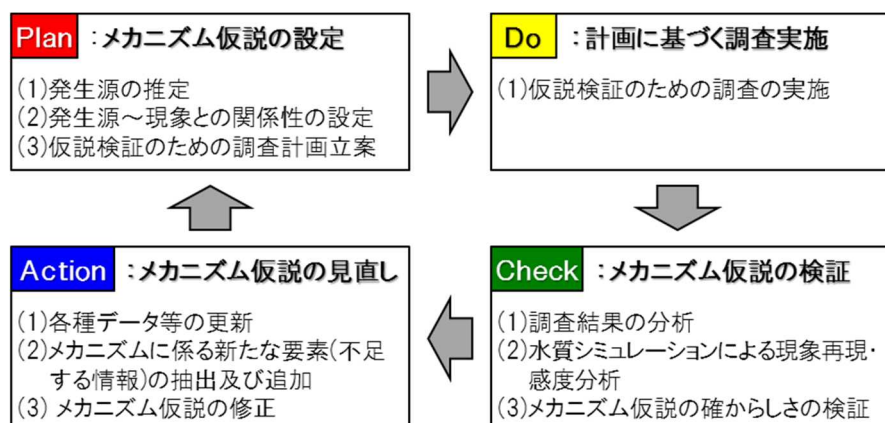


図 3.2 発生メカニズムの推定に関する P D C A サイクルの概念図

富栄養化現象の発生メカニズムを推定するための一般的な調査・検討としては、以下が挙げられる。

[Plan：メカニズム仮説の設定]

- ・アオコ・カビ臭等の原因となる藍藻類の消長と環境要素(気象・水文・水質)との応答関係を解析し、原因藍藻類の発生に影響を及ぼす主要な要因を絞り込む。
- ・アオコ・カビ臭等の発生による影響対象や問題の発生時期、発生期間、発生程度等を明確化する(例：貯水池内のアオコ発生レベルの推移、上水道取水地点や着水井等におけるカビ臭濃度の推移、上水道利用者からの情報提供の内容等)。
- ・水質シミュレーションを用いた再現計算により、アオコ・カビ臭等発生時の貯水池内の流動特性及び水質特性を把握する。
- ・以上の結果から、アオコ・カビ臭等の発生源の推定、発生源と現象が顕在化している地点との関係性の推定等を行い、アオコ・カビ臭等発生メカニズム仮説を設定する。
- ・設定したアオコ・カビ臭等発生メカニズム仮説の検証のために必要となる情報を整理し、検証に資する調査計画を立案する。

[Do：計画に基づく調査実施]

- ・調査計画に基づく調査を実施する。

[Check：メカニズム仮説の検証]

- ・調査結果を分析し、アオコ・カビ臭等発生メカニズム仮説との照合を行う。
- ・調査結果を用いるなどして、必要に応じて水質シミュレーションの改良を行い、アオコ・カビ臭等発生時の貯水池内の流動特性及び水質特性等の見直しを行う。
- ・水質シミュレーションを用いた感度分析により、アオコ・カビ臭等の発生に影響を及ぼしている環境要素の絞り込みを行う。
- ・以上の結果を踏まえ、アオコ・カビ臭等発生メカニズムの確からしさを検証する。

[Action：メカニズム仮説の見直し]

- ・前項までの作業を踏まえて、必要に応じてアオコ・カビ臭等発生メカニズム仮説の見直しを行う。

以上に示す調査・検討を行い発生メカニズムの推定を行った結果、藍藻類が水深 20m 程度未満の浅水深の範囲で寡占的に増殖することがアオコ・カビ臭現象の主たる要因となっている(浅水深の範囲で増殖した藍藻類が貯水池全体に移動することでアオコ・カビ臭現象が顕在化する場合等)ことが判明した場合には、気泡式循環施設を設置しても水質改善効果は限

定的となったり、逆に増殖を促進する場合もあることから、気泡循環施設の適否を判断する際には貯水池地形（特に稼働時の貯水池の水深）には特に注意を払う必要がある。

アオコ発生に関しては、学術的研究の進展や既往事例の蓄積等により発生メカニズムを推定するための調査の内容が随時追加、更新されている。このため、調査実施にあたっては、近年の技術動向を参考にすることの重要性が特に高いことに留意する必要がある。

3-3. 対策の検討・実施

3-3-1. 目標設定

富栄養化現象に対する水質改善目標の設定は、主に貯水池及び下流河川における利水、景観への影響等を考慮して藍藻類細胞密度、クロロフィル a 濃度、アオコレベル、カビ臭濃度、水温・水温勾配等を用いて設定することを基本とする。

【解説】

気泡式循環施設による対策を検討する際には、対策により期待する水質状況に対し、例えば「発生している富栄養化現象を抑制する」あるいは「発生している富栄養化現象に起因する具体的な問題を回避する」といった湖面利用者や利水者の目線に立った目標を設定する。また、気泡式循環施設による対策を実施後の効果を把握するために、富栄養化現象と関連性の強い水質項目を用いた具体的な指標値も併せて定める。

目標設定において、水質改善の目標だけでなく具体的な指標値を定めるのは、気泡式循環施設による対策の実施後、その効果を確認する際に一定の指標値で評価することにより、水質改善対策の有効性を明確に示すことができるほか、対策の見直しが必要な場合にも設定した指標値と実態との乖離を把握することで見直しの方向性やレベルを判断することができるためである。

指標値の設定は、設定した値の性格や意味を十分考慮して行う。例えば、設定した指標値がそれを超過すると大きな影響や被害を引き起こす明確な閾値である場合には、厳密な管理が必要となる。一方、設定した指標値が対象生物の増殖環境を表す値や栄養塩環境を示す目安値である場合には、指標値の対象の超過は許容され、おおむねその値以下を維持していれば目的は達成していると評価できる。

このように、指標値の設定は、対策の対象となる水質変化現象の性質や水質変化現象によって引き起こされる水質問題の影響の程度によって捉え方も異なることから、各ダム貯水池において十分に吟味して行うことが重要である。

富栄養化現象による影響は、上水道への影響(主にカビ臭)、貯水池での景観の悪化として顕在化する。したがって、富栄養化現象に対する水質改善目標は、利水関係者の意見等も参考にして、対象物への影響を一定程度に縮減・緩和するために必要となる水質項目や景観レベル等をより具体的に設定することが重要である。

また、気泡式循環施設は、空気吐出により貯水池内の循環混合を促すことを目的に設置される施設であることから、表層水温や水温勾配といった施設稼働により変化の及ぶ項目を設定することも考えられる。

以下に、気泡式循環施設による富栄養化現象への対策を行う上での水質改善目標の設定例を挙げる。

目標の設定例

- ・貯水池内でアオコが確認される期間を短縮する
- ・貯水池内でアオコが確認される範囲(面積)を縮小する
- ・貯水池内で発生するアオコが下流河川での水利用等に影響を与えないようにする
- ・貯水池内で発生するカビ臭の原因となる植物プランクトンの増殖を抑制し、上水道に影響を与えないようにする

指標値の設定例

- ・夏季の藍藻類細胞密度を◎cells/mL 以下に維持する
- ・夏季のクロロフィル a 濃度を● μ g/L 以下に維持する
- ・貯水池内のアオコレベル*を○以下に維持する
- ・水道取水地点のカビ臭原因物質の濃度を△ng/L 以下に維持する
- ・貯水池の日最高水温勾配を▲ $^{\circ}$ C/m 以下に維持する

※アオコレベルの設定に関しては、国立研究開発法人国立環境研究所の提案する「見た目アオコ指標」等が参考になる。(https://www.nies.go.jp/kanko/tokubetu/setsumei/sr-024-98b.html)

(1) 藍藻類細胞密度

当該ダムにおける藍藻類細胞密度と水質障害発生状況との関係を整理し、水質障害の発生の可能性が高いと判断される藍藻類細胞密度を指標値として設定する。

図 3.3 は、全国のダム貯水池で実施した植物プランクトン調査と水質障害発生との関係性を整理したものである。これによると、藍藻類の種類により水質障害が発生する時に出現している細胞密度に違いがあることが分かる。以上の結果を一覧で整理したものを表 3.1 に示す。

当該ダムにおいて藍藻類細胞密度を指標値として設定する際は、図 3.3 及び表 3.1 を参考にしつつ当該ダムにおいても同様の整理を行い、適切な値を設定することが望ましい。

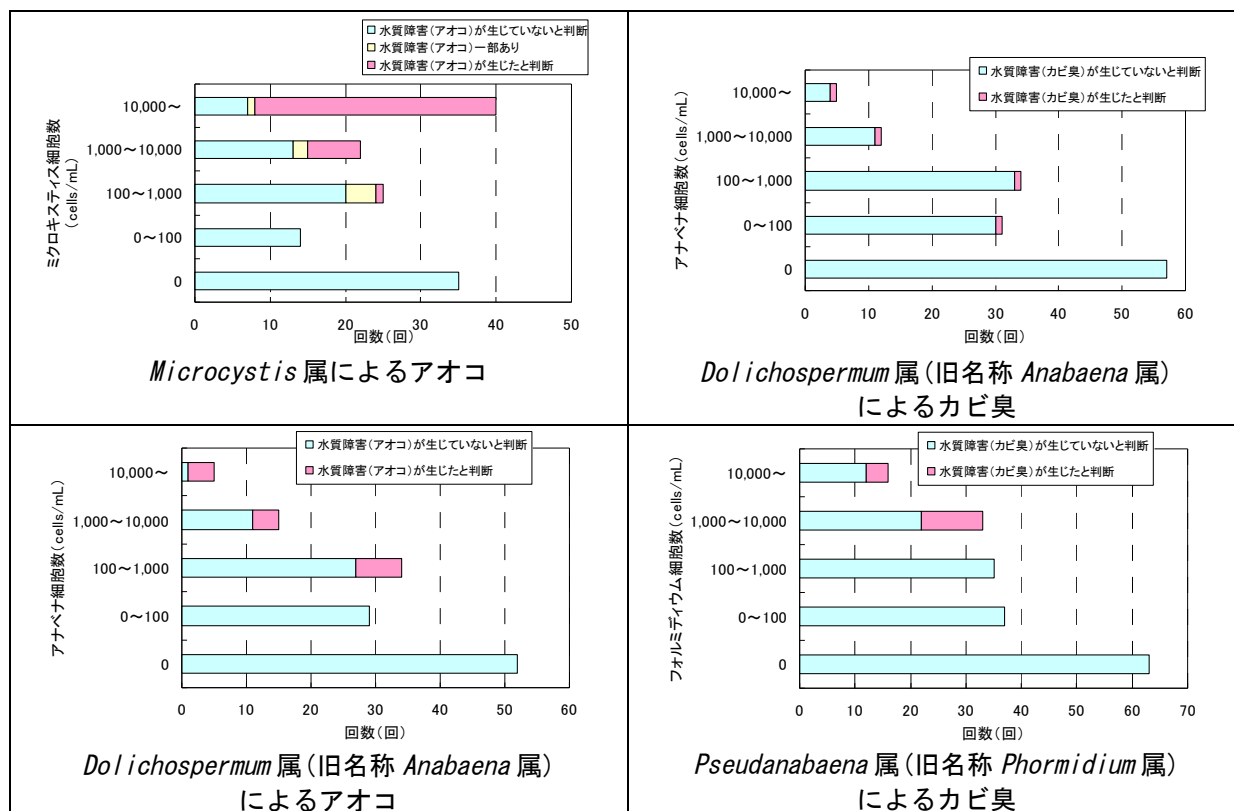


図 3.3 藍藻類細胞密度と水質障害の関係

表 3.1 藍藻類の細胞密度と水質障害の関係

藻類種	水質障害の種類	細胞密度と水質障害の関係
<i>Microcystis</i> 属	アオコ	・ 10,000cells/mL 以上 → 水質障害が発生 ・ 1,000cells/mL 以上 → 水質障害発生の可能性大 ・ 1,000cells/mL 以下 → 水質障害発生の可能性小
<i>Dolichospermum</i> 属 (旧名称 <i>Anabaena</i> 属)	アオコ	・ 100cells/mL 以上 → 水質障害発生の可能性大 ・ 100cells/mL 以下 → 水質障害発生の可能性小
	カビ臭	・ 明確な関係性は得られていない
<i>Pseudanabaena</i> 属 (旧名称 <i>Phormidium</i> 属)	カビ臭	・ 1,000cells/mL 以上 → 水質障害発生の可能性大 ・ 1,000cells/mL 以下 → 水質障害発生の可能性小

(2)クロロフィルa濃度

藍藻類が異常増殖し、アオコやカビ臭等の水質障害が発生している時は、一般的にクロロフィルa濃度も高くなっている。当該ダムにおけるクロロフィルa濃度と藍藻類細胞密度との関係を整理し、水質障害の発生の可能性が高いと判断されるクロロフィルa濃度を指標値として設定する。

図 3.4 は、Aダムにおける *Microcystis* 属細胞密度（当ダムでは群体数/mL で計数している）とクロロフィルa濃度との関係をアオコ発生／非発生で色分けして整理したものである。

これによると、クロロフィル a 濃度がおおむね $20 \mu\text{g/L}$ 以下であればアオコは非発生の状況が維持できるものと考えられる。この値は、OECDの示す富栄養化レベルとクロロフィル a 濃度との関係(表 3.2)において中栄養程度以下のレベルともおおむね一致している。

当該ダムにおいてクロロフィル a 濃度を指標値として設定する際は、図 3.4 や表 3.2 を参考しつつ当該ダムにおいても同様の整理を行い、適切な値を設定することが望ましい。なお、クロロフィル a 濃度は 1 日の間に数倍変化する場合もあることから、実際の藻類発生量(バイオマス量)との関係性が把握できないこともある。このため、クロロフィル a 濃度を用いた目標設定を行う際には、対象とする藍藻類の細胞密度とクロロフィル a 濃度の関係についてあらかじめ整理し、目標値としての適用性を判断することが望ましい。

なお、近年は藍藻類の存在量を把握するための水質指標としてフィコシアニン濃度を計測する事例もみられ⁴⁾、現地で計測可能な機器も開発されている。ただし、フィコシアニンは藍藻類だけでなくクリプト藻類等も持つ色素であることから、適用にあたっては当該ダムの出現藻類種を事前に把握し、藍藻類以外の藻類によるフィコシアニン濃度と混同しないよう気を付ける必要がある。

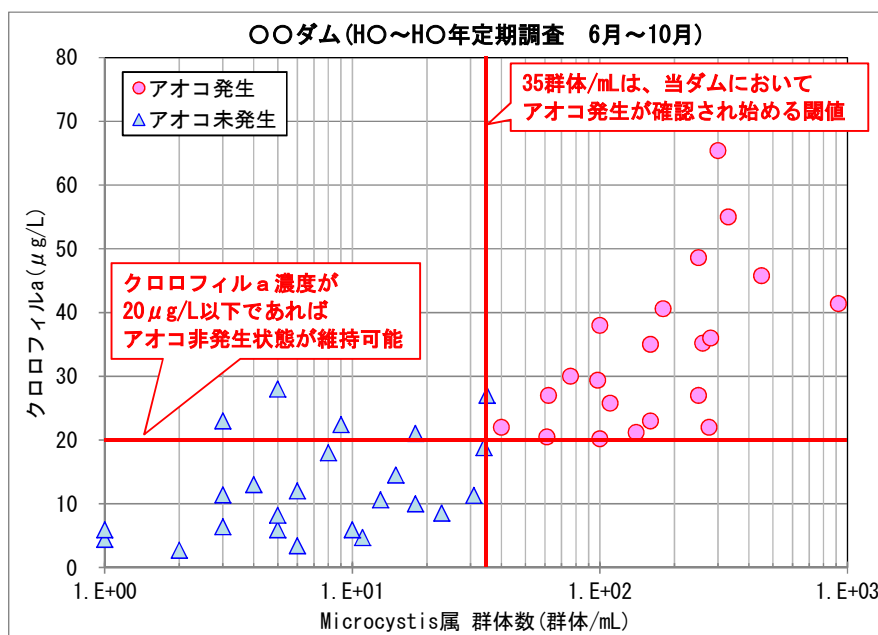


図 3.4 クロロフィル a 濃度と水質障害の関係から水質目標指標値を設定した事例

表 3.2 富栄養化の限界及び階級(湖沼工学 P224 より抜粋)

	貧栄養	中栄養	富栄養	
最大クロロフィル濃度 ($\mu\text{g/L}$)	< 8.0	$8 \sim 25$	$25 \sim 75$	OECD

※湖沼工学での表示単位は「 mg/m^3 」である

(3) アオコレベル

藍藻類が異常増殖すると、湖面が緑色を呈したアオコ状態となる。アオコの発生状況は、国立環境研究所が提案する「見た目アオコ指標」(図 3.5) により湖面の着色程度をレベル化することが可能であることが知られているほか、一部のダム貯水池では湖水をろ紙にろ過し、ろ紙の色合いの違いでアオコの発生状況(湖面の着色度合い)をレベル化する方法が採用されている(図 3.6、図 3.7)。

図 3.8 は、アオコ現象の原因となる藍藻類 *Microcystis* 属の細胞密度とアオコレベルとの関係を整理した事例である。*Microcystis* 属は細胞密度が 10,000cells/mL 以上になると湖面のアオコが視認されることが一般的に知られており(表 3.1)、これを下回る時のアオコレベルはレベル 2 であるといえる。

当該ダムにおいてアオコレベルを指標値として設定する際は、図 3.8 と同様の整理を行い、適切な値を設定することが望ましい。

	
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。 (ネットで引いたり、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: うっすらとすじ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。 国立環境研究所 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。	

図 3.5 見た目アオコ指標 (出典：国立環境研究所)



図 3.6 ろ紙の色合いの違いでアオコ状態をレベル化する方法

アオコレベル (アプリ上の表示レベル)	ろ紙の見た目	アオコレベル (アプリ上の表示レベル)	ろ紙の見た目
レベル0		レベル3	
レベル1		レベル4	
レベル2		レベル5	

図 3.7 ろ紙の色合いとアオコレベルとの関係の例

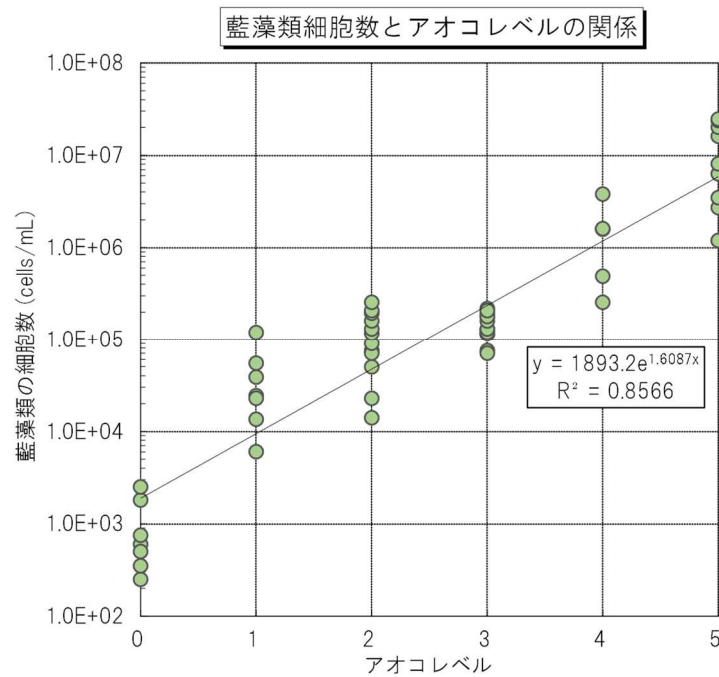


図 3.8 *Microcystis* 属細胞密度とアオコレベルの関係から水質目標指標値を設定した例

(4) カビ臭濃度

一部の藍藻類が生成するカビ臭物質(ジェオスミン、2-MIB)は、水道取水されると浄水場で水質障害として認識される。一部の浄水場では、原水のカビ臭物質濃度が一定値を超過すると、活性炭等により十分にカビ臭物質を除去できず、給水中にカビ臭物質が残存した状態となる。このため、ダム貯水池においてカビ臭濃度の指標値を設定する際には、取水先の浄水場でのカビ臭物質処理能力を考慮することが重要である。このとき、ダム貯水池からの直接取水の場合は、発生したカビ臭物質が直接浄水場へ送水される場合も考えられることから、「ダム貯水池におけるカビ臭濃度の指標値＝浄水場でカビ臭物質の処理が可能な原水のカビ臭濃度」となるが、下流河川から取水する場合は、流下過程でのカビ臭物質の消散や希釈によりカビ臭濃度が低減することも考えられることから、これを加味した指標値の設定とすることが望ましい。

図 3.9 は、ダム基準地点表層のジェオスミン濃度と浄水場の取水原水のジェオスミン濃度を整理した事例である。本事例では、浄水場において水道水質基準である 10ng/L を下回するため、両者の関係性からダム貯水池表層におけるジェオスミン濃度 100ng/L 以下を水質目標指標値として設定した。

当該ダムにおいてカビ臭濃度を指標値として設定する際は、図 3.9 のような整理を行うとともに、水道事業者とも協議の上、適切な値を設定することが望ましい。

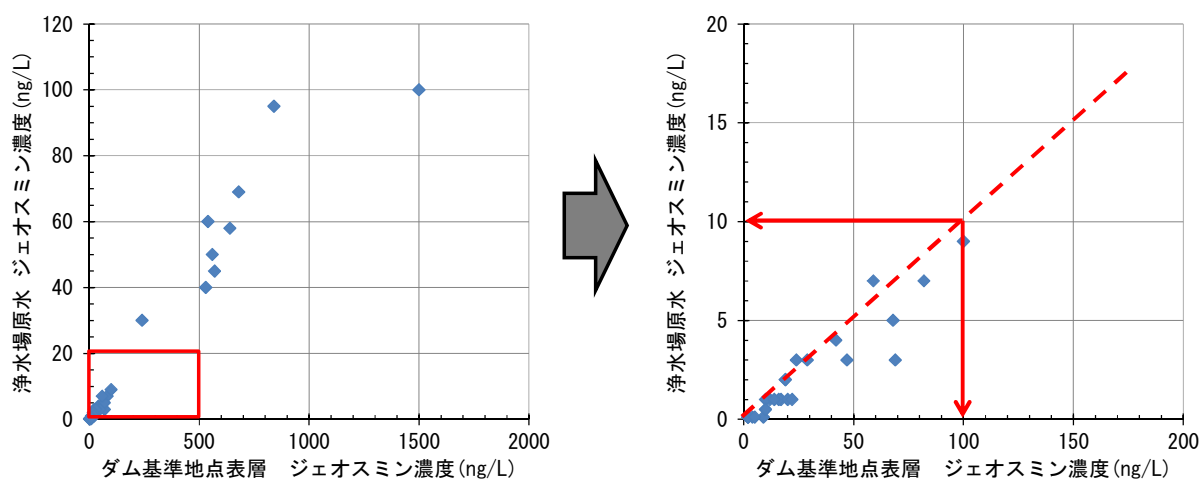


図 3.9 ダム基準地点と取水原水のカビ臭濃度の関係から水質目標指標値を設定した例

(5) 水温・水温勾配

藍藻類の年最大細胞密度とその時の表層水温あるいは水温勾配との関係を整理し、水質障害の発生がみられない表層水温や水温勾配を指標値として設定する。

図 3.10 は、水質障害のうちアオコ現象の原因となる藍藻類 *Microcystis* 属の細胞密度と水温勾配の関係を整理したものである。*Microcystis* 属は細胞密度が 10,000cells/mL 以上に

なると湖面のアオコが視認されることが一般的に知られており(表 3.1)、これを下回る時の水温勾配(日最大値)は $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ であるといえる。このことから、指標値としては水温勾配 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ が一つの目安となる。なお、水温勾配の日最大値が $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下を維持できると、夜間の放射冷却時に表層水温が低下して水温勾配が $0^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下となる、つまり上下層の湖水が循環する傾向が強いことが経験的に知られている。

当該ダムにおいて水温あるいは水温勾配を指標値として設定する際は、図 3.10 と同様の整理を発生している水質障害の原因藻類について行い、適切な値を設定することが望ましい。なお、本整理を行う際に、降雨日のデータは水温勾配が平常時の状況と異なるため除外する必要がある点に注意が必要である。

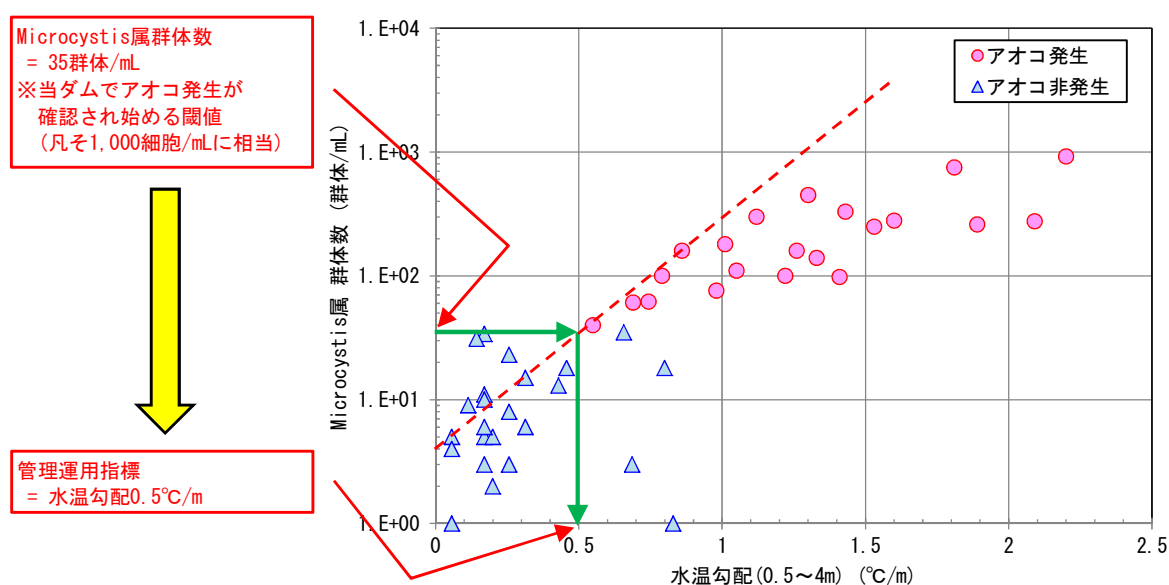


図 3.10 *Microcystis* 属細胞密度と水温勾配の関係から水質目標指標値を設定した例

3-3-2. 対策の一次抽出

水質改善対策は、発生要因の推定結果を踏まえ、水質改善効果が期待できる対策を一次抽出したうえで、水質シミュレーション等を用いて選定することを基本とする。

【解説】

当該ダム貯水池における水質改善対策を選定する際には、様々な対策の効果を網羅的に予測・評価するのではなく、発生要因の推定結果を踏まえ、水質改善の可能性を有する対策を一次抽出したうえで、水質シミュレーションや貯水池特性の類似する他ダムでの対策事例等を参考に選定することが効率的である。なお、貯水池特性の類似するダムは、貯水池規模、回転率、負荷量等の貯水池特性が類似するダム貯水池や周辺地域で同種の水質変化現象が発生しているダム貯水池を指す。

ここでは発生要因の推定結果を踏まえて、気泡式循環施設を対策の一次抽出で採用する際のポイント（適合しやすい条件等）を示す。

(1) 藍藻類の発生源・発生メカニズム

アオコ・カビ臭等の原因となる藍藻類が、十分な深度(20m 程度以上)のある水域の貯水池内表層付近(水温躍層が形成される範囲)において寡占的に増殖することがアオコ・カビ臭現象の主たる要因である場合は、気泡式循環施設の稼働により水温躍層を破壊して循環混合層を形成することによって、水質改善効果が発現されることが期待できることから、対策候補として有力と考えてよい。

一方、藍藻類がダム貯水池の上流河川から多量に流入して当該ダム貯水池で増殖しなくても一定の藍藻類が存在する場合や、藍藻類が水深 20m 程度未満の浅水深の範囲で寡占的に増殖することがアオコ・カビ臭現象の主たる要因となっている場合には、気泡式循環施設による水質改善効果が限定的になったり、施設稼働によりかえって富栄養化現象が促進することもあることから、過去の当該ダムにおける藍藻類の発生経緯や水質シミュレーションを用いた予測計算結果等を踏まえて慎重に判断することが望ましい。

(2) 循環混合層形成の可能性

気泡式循環施設は、空気吐出口から放出された空気が周辺の低温水を巻き込みながら上昇することで貯水池内に循環混合層を形成し、藍藻類の増殖に不適合な環境を創出する仕組みであることから、空気吐出口付近に表層との水温差の大きい低水温の水塊が十分に存在することが強固な循環混合層を形成する上で重要なポイントとなる。

したがって、(1)に示した条件に適合し且つ気泡式循環施設の設置位置付近に十分な量の低水温塊が存在する場合には、対策候補として有力と考えてよい。

一方、利水放流施設等により貯水池底層の湖水が頻繁に入れ替わるため、気泡式循環施設

導入前から気泡式循環施設の空気吐出標高よりも下に水温躍層が形成されている場合には、気泡式循環施設の運用による循環混合効果が限定的となる場合が多いことから、対策の選定や配置、運用方法を検討する際に留意する必要がある。

3-3-3. 対策選定及び諸元設定

気泡式循環施設を選定する際は、一次抽出した対策について水質シミュレーションや経験的な算出式を活用する等して水質改善効果を予測し、水質改善効果の比較や経済性等から総合的に判断したうえで選定することを基本とする。

気泡式循環施設の諸元設定は、対策選定時の条件をもとに気泡式循環施設の位置、基数、1基あたりの空気吐出量等について適切に設定することを基本とする。

【解説】

気泡式循環施設を水質改善対策として選定する際は、「3-2-2. 発生メカニズムの推定」において使用した水質シミュレーションモデルに気泡式循環施設による流動を表現できるサブモデル(Asaeda and Imberger⁵⁾による二重プルームモデル等)を付加した予測計算や気泡式循環施設の設置事例から得られた経験的な算出式等を用いた予測を行い、当該ダムにおける水質改善効果を予測し、その他の対策と比較の上で決定する。

対策を決定する際には、予測計算結果の比較に加えて、経済性(対策導入による効果と対策導入に要する費用のバランス)、対策実現性(対策施設の設置スペース等の制約)、緊急性(対策実施に要する時間が問題解決に求められる期間を満たしているか)等の観点から総合的に判断する。

以上の検討の結果、気泡式循環施設が選定された場合は、水質シミュレーションによる予測計算結果や経験的な算出式を用いて対策施設の規格(規模・基数・配置等)を決定し、「3-3-4. 気泡式循環施設の詳細設計」及び「3-3-5. 運用ルールの設定及びモニタリング調査(実証運用時調査)計画立案」に必要な情報として整理する。

富栄養化現象に関しては、水質シミュレーションによる現象再現及び対策による効果の予測計算のうち、貯水池内流動を扱う流動モデルに関しては、広く一般に使われているモデルを用いることにより密度流的な影響が顕著ではない平水時の現象に関しては再現がおおむね可能である。一方、植物プランクトンや動物プランクトンの生物生産、捕食、死滅、沈降、競合等を扱う生態系モデルに関しては、いまだその生態が未解明な部分も多くあり、広く一般に使われているモデルは、クロロフィルa濃度はおおむね良好に再現できるが、課題が残されている。例えば、植物プランクトンを藍藻類、珪藻類、緑藻類に大別して計算するモデルもあるが、植物プランクトンの種別までは考慮されていない場合が多い。また、競合関係については概念的なモデルが使用されている。また、カビ臭を問題とする場合には原因となる藍藻類の消長とカビ臭の発生に相関関係が見られない場合がある。

このため、気泡式循環施設の諸元設定をする際に、水質シミュレーション結果のみを拠り所としてその効果を予測すると、実際に対策を実施した際に当初想定しない状態(十分に水質改善効果が得られない、アオコからカビ臭に現象が変化する等)となる可能性もある。

したがって、富栄養化現象への対策として気泡式循環施設を導入する際には、水質シミュレーションの活用だけでなく、貯水池特性の類似する他ダムでの対策事例も参考に検討することが望ましい。なお、他ダムにおける対策選定事例や諸元設定方法は、「5. 資料編」に紹介している。

気泡式循環施設の諸元設定の流れを図 3.11 に示すとともに、各項目における基本的な実施事項について概説する。

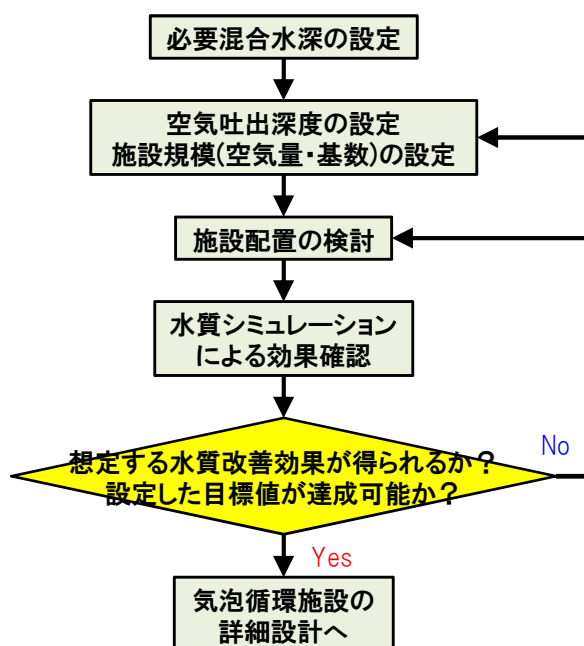


図 3.11 気泡式循環施設の諸元設定の流れ

(1) 必要混合水深の設定

必要混合水深とは、気泡式循環施設の稼働により生じる循環混合により藍藻類の増殖抑制効果が発現するために必要となる水深であり、基本的には藍藻類の鉛直方向の分布範囲が補償深度以深となるように設定する。気泡式循環施設の空気吐出水深は、この必要混合水深よりも深くすることで水質改善効果が発現する。

補償深度とは、植物プランクトンの光合成と呼吸が等しくなる深度のことをいい、この深度までの水柱を真光層または生産層という。補償深度より深い層では、光合成より呼吸が卓越し、植物プランクトンの増殖ができなくなるため、これが気泡式循環施設による必要混合水深の目安となる(図 3.12)。

補償深度は、太陽光の強さや貯水池の濁り等の条件によって変わるが、平均的には相対照度 1%の深度($D_{1\%}$)にほぼ相当するといわれている。透明度(D_s)と $D_{1\%}$ の関係は、下式⁶⁾⁷⁾で近似的に成り立つことが知られており、透明度の計測データから補償深度を推定することも

できる。なお、補償深度と透明度の関係については、上記以外にも諸説あり、一般的には沿岸域や湖沼では透明度の2～2.5倍と言われている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

$$D_{1\%} = 2.67 \times D_s$$

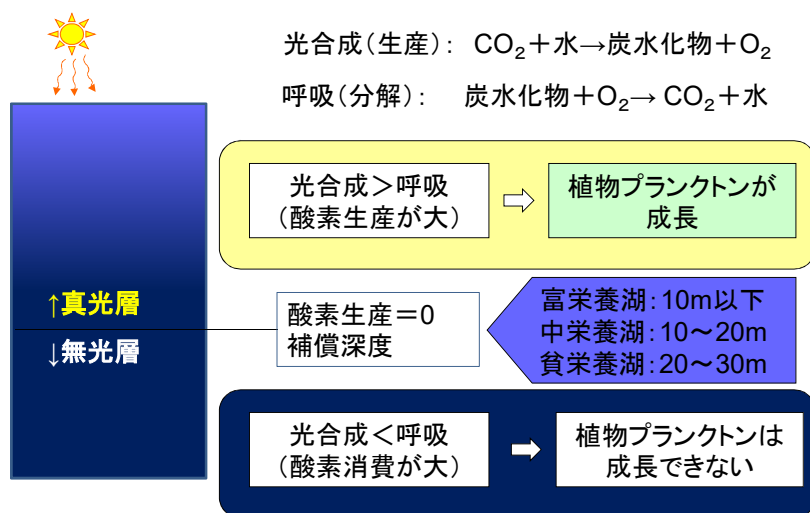


図 3.12 補償深度と光合成・呼吸の関係

(2) 空気吐出水深の設定

気泡式循環施設の空気吐出深度は、必要混合水深よりも深くなるよう余裕をみて設定する。空気吐出深度を設定するうえで考慮すべき事項としては以下が挙げられるが、経験的には空気吐出深度の最小値として20m程度が目安となる(5-6-2. (2))。

- ・空気吐出水深と水温躍層の距離が大きいほど循環混合効率は高まるが、空気吐出水深を深くすると、水圧による抵抗が大きくなる分、空気吐出に必要となるエネルギーや空気量がより多く必要になる。そのため、循環混合効率とエネルギー効率のバランスから最適な空気吐出水深を設定することが重要である。
- ・ダム貯水池の最大水深が必要混合水深位以上であることが気泡式循環施設を設置する場合の前提条件となる。水位変動が大きいダム貯水池では、水位低下に伴い必要混合水深が確保できなくなる可能性も考慮して設定する必要がある。
- ・空気吐出位置が湖底に近接し過ぎていると、空気吐出初期に底泥を巻き上げることで濁りの上昇や栄養塩類の供給が懸念される場合もあることから、湖底面とは一定の離隔(経験的には2～3m程度)を設ける必要がある。
- ・空気吐出深度により送気する空気の必要圧力が変わるため、空気吐出深度は空気圧縮機的能力に影響する。このため、所定の空気量が支障なく送気及び吐出される深さを設定する必要がある。

- ・気泡式循環施設設置前から濁水長期化の問題も抱えるダム貯水池では、空気吐出水深が深くなると濁水長期化現象を助長する場合もあるため、空気吐出水深の設定時には両現象に配慮した運用方法を検討するなどの留意が必要である。

(3) 施設規模(空気量・基数)の設定

気泡式循環施設の施設規模(空気量・基数)の設定にあたっては、以下に示す2通りの考え方があがるが、何れの考え方を採用するかは、水質改善目標の設定の仕方や経済性等を考慮して総合的な観点から判断する必要がある。

a) 水温成層形成後に気泡式循環施設を稼働開始させて水温躍層を低下させる場合に必要となる規模

- ・稼働期間は短くなるが、必要とするエネルギーがb)より多くなる
- ・水位低下等により成層期間中に気泡式循環施設を一時的に停止することが多い場合に適用

b) 水温成層が形成される前から気泡式循環施設を稼働開始させて水温躍層の位置を保持させるために必要となる規模

- ・必要とするエネルギーはa)より少なくなるが、成層期間中に連続運転させる必要がある
- ・水位変動が小さく夏季に気泡式循環施設を連続運転可能な場合に適用

気泡式循環施設の施設規模(空気量・基数)の設定方法を以下に示すが、気泡式循環施設による成層破壊の過程は複雑であることから、当該ダム貯水池内の躍層形成状態等を考慮し、適切に設定することが重要である。

施設規模の具体的な設定方法は、5-6-3. に記載する。

(4) 施設配置の検討

気泡式循環施設の配置は、吐出水深の確保、効果的・効率的な位置及び間隔、経済性、施工性、維持管理の容易さ等を考慮して決定する。

1) 吐出水深の確保

貯水池の縦横断形状、貯水位の変動範囲等から、吐出水深が稼働期間を通じて確保可能で所定の効果が得られる位置を選定する。

2) 効果的・効率的な配置

貯水池の平面形状、縦横断形状等から、効果的・効率的に気泡式循環施設の稼働による流動の効果が得られる位置を選定する。

配置の方法には、集中型と分散型の2通りがあり、例えば、貯水池全域に気泡式循環施設の稼働による流動が及ぶように分散型の配置とする場合や、効果を発現する範囲を限定させ効率的に循環混合効果を得られるように集中型の配置とする場合などがある。

富栄養化現象の原因となる藍藻類の増殖を抑制するという観点からは、配置方法は分散型を採用することが望ましい。但し、これにより上流河川の流入部付近に気泡式循環施設を配置することになる場合は、河川からの流入水が貯水池表層と混合しやすくなり、表層に栄養塩を供給しやすくなってしまう可能性もある。こういった条件下では、気泡式循環施設をできる限り流入部付近から離れた位置に配置することも必要である。

また、湾曲部や入江部などの滞留しやすい箇所は、気泡式循環施設の効果が及びにくく、水温躍層が解消しにくい。こういった条件下では、これら付近にも気泡式循環施設を配置することも考慮して、全体の配置バランスを検討することが望ましい。

なお、気泡式循環施設の配置については、ダム堤体付近に集中的に配置する場合と対象範囲内に分散配置する場合とが考えられるが、両者の効果に関するメリット/デメリットについてはダム貯水池の特性の違い等が影響するためか、明らかになっていない。このため、後述する水質シミュレーションを活用するなどして決定する必要がある。

3) 複数配置の場合の設置間隔

集中型の配置をする場合は、気泡式循環施設同士が循環流を干渉しない距離を確保して配置する必要がある。循環流を干渉しない距離は、一次循環流(内部ブルーム)の半径が凡そ40m程度であることから、その2倍以上を確保するものとし、おおむね100m以上の離隔を設けることが一般的である。

また、分散型の配置をする場合は、気泡式循環施設の稼働により形成される循環混合層に抜けが生じないように適当な間隔で配置する必要がある。この場合の最適な離隔は、貯水池の特性(平面形状、縦横断形状、夏季の水温上昇特性等)により異なることから、例えば、水質シミュレーションにより得られた計算結果から、表層水温や水温勾配を縦断方向の複数地点で算出し、地点間の差がなくなるような配置を感度分析的に行う方法等が有効である。

4) 経済性・施工性・維持管理の容易さ

水質シミュレーションによる効果予測を行い、その結果から総吐出空気量及び気泡式循環施設の基数が確定した段階で、陸上に設置する空気圧縮機(コンプレッサー室)の用地確保、気泡式循環施設(浮体)の係留の容易さ、電力供給(商用電力からの引き込み)の条件、建設費、維持管理費等の事項について複数の配置計画案を策定し、比較検討を行ったうえで適切な設置位置を決定する。

(5) 水質シミュレーションによる効果確認

以上を踏まえて仮設定した諸条件を水質シミュレーションで再現し、気泡式循環施設により形成される循環混合層の状況、藻類生産量の変化（クロロフィル a の変化）、優占種化する藻類群（藍藻/緑藻/珪藻）の変化やその時期を現況と比較し、水質目標の達成状況等により効果確認を行う。

気泡式循環施設の施設規模や配置を決定する際は、図 3.11 に示すようにトライアル・アンド・エラーにより適切な施設規模・配置に近づけることが可能となるが、作業の効率性を考慮すると、前述の(3)及び(4)の段階で候補となる施設規模・配置を数ケース設定しておき、各ケースでの水質シミュレーションを行って比較選定することが望ましい。

3-3-4. 気泡式循環施設の詳細設計

気泡式循環施設は、現場条件を踏まえた詳細な設置位置や係留施設の設計、施工計画の検討等を行うことを基本とする。

【解説】

気泡式循環施設は、係留施設・空気圧縮機・散気管・送気管で構成され(図 3.13)、これらの設置にあたっての詳細設計を行う。

気泡式循環施設の詳細設計では、現場条件を踏まえた詳細な設置位置や係留施設の設計(構造計算を含む)、空気圧縮機の選定、送気方法与配管ルート、施工計画の検討を行う。

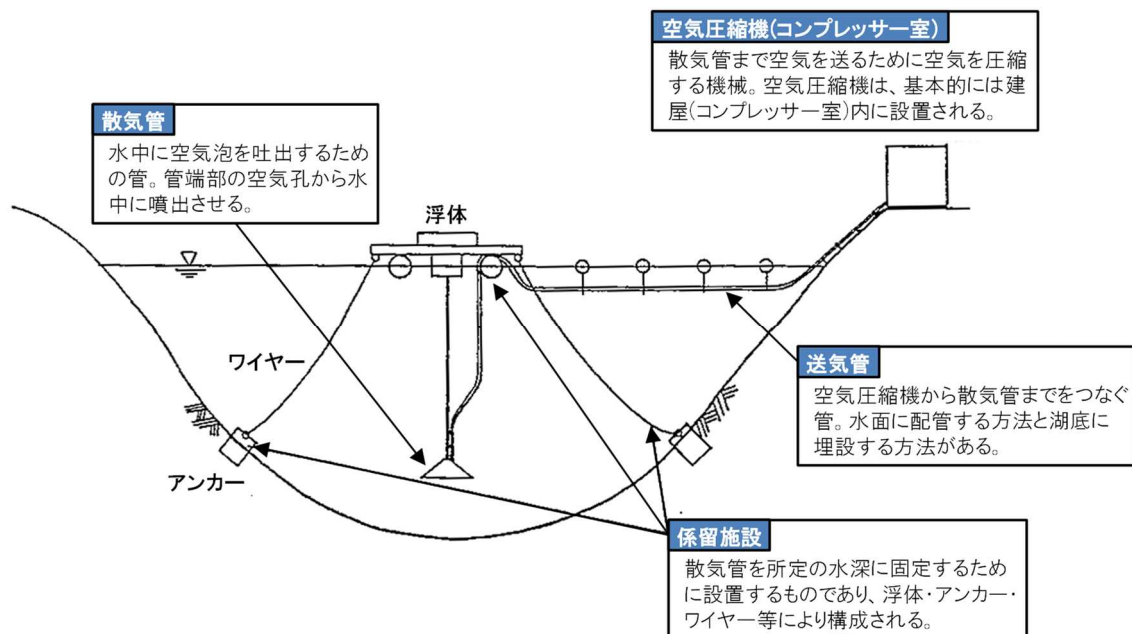


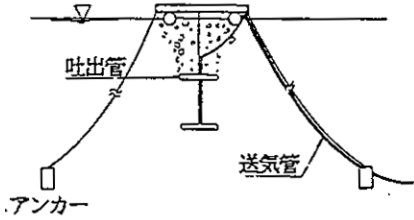
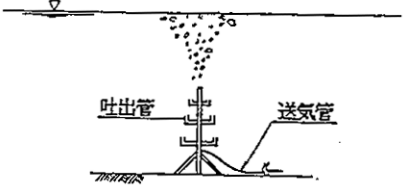
図 3.13 気泡式循環施設の構成

気泡式循環施設の設置方式には、「湖底設置式」と「水面設置式」があるが(表 3.3)、水位変動や地形等のダム貯水池の特性に応じて適する方式を採用する。

自立方式は、水位が変動すると背圧が変動し、それにつれて空気吐出量変動する。また、気泡の上昇に伴う連行流量のパターンも散気装置の水深に大きく影響を受けることから、水位変動の影響は装置の機能に大きく影響を与える。また、湛水後のダム貯水池では大規模な潜水作業を伴うため、現実には施工に困難を伴う場合が多い。

一方、浮体方式は、以上の自立方式のデメリットを解消できる点で優位であるが、フロートが湖面の流れを妨げたり、出水時にワイヤーが絡まったり断線したりする場合もあるため、出水時の流入河川水の流速が速くなる箇所への設置は避けるなど、設置や維持管理に注意が必要である。

表 3.3 気泡式循環施設の支持方式による特徴

	水面設置式	湖底設置式
概略図		
特徴	散気管の深さを調節して、任意の深さから気泡を吐出することが可能	湖底から立ち上げる形式であり、指定した標高から気泡を吐出することが可能
水面利用に対する支障	フロートが支障となる	支障なし
水位変動の影響	水位変化に追随する方式ため影響はないが、貯水位低下時には湖底に接触する可能性もあり注意が必要	水位変化に伴い空気吐出標高が変化する
堆砂の影響	水面に浮いているため影響を受けない	湖底に設置しているため堆砂による埋没の可能性がある
装置の湖内移動	係留ワイヤーの長さを変えることで多少の設置位置変更は可能	移設不可能
ダム建設段階での設置	浮体を浮かべておける程度まで湛水しないと設置できない	湛水前の設置が容易であり、湛水途中から使用も可能
ダム湛水後の設置	湖底形状によらず設置可能	湖底面に平地がない場合は施工性に劣る
維持補修	比較的容易に引き上げ可能であり、補修しやすい	引き上げて補修することは困難

複数基の気泡式循環施設を設置する場合には、空気圧縮機と散気装置との接続方法も検討する必要がある。空気圧縮機と散気装置との接続方法には、空気圧縮機1台に対して散気装置1基を接続する方法、複数の空気圧縮機と複数の散気装置を接続し空気圧縮機の点検や交換時の対応を容易にする方法等がある。このため、各ダム貯水池における気泡式循環施設の設置条件や経済性等を勘案し、適切な方法を選定することが重要である。

3-3-5. 運用ルールの設定及びモニタリング調査(実証運用時調査)計画立案

気泡式循環施設を設置するダム貯水池では、実証運用時の運用ルールを設定するとともに、水質改善対策の有効性を確認するためのモニタリング調査(実証運用時調査)計画を立案することを基本とする。

【解説】

(1) 運用ルールの設定

気泡式循環施設の設置が決まったダム貯水池では、実際の稼働にあたって実証運用時の運用ルールを設定を行う。この段階での運用ルールは、水質シミュレーションによる予測計算や他ダムにおける事例等をもとに設定するが、操作が煩雑とならないよう貯水池運用の実態に合わせたものとする必要がある。

運用ルールの設定は、年により受熱量の違いから水温成層の形成状況が異なることから、水質自動監視装置のデータを用いて水温や水温勾配等を指標に稼働時期を決めることが望ましく、その意味では水質自動監視装置が設置されていないダム貯水池では、気泡式循環施設の導入に併せて水質自動監視装置も設置することが有用な場合もある。

水質自動監視装置の設置が困難な場合には、水質シミュレーションによる予測計算や他ダムでの事例を参考に稼働期間（例：5月1日～10月31日等）を設定することになるが、その場合は稼働後の効果確認において、その妥当性を定期的に検証し必要に応じて見直すことが必要である。

(2) モニタリング調査(実証運用時調査)計画立案

気泡式循環施設の運用ルールの設定と併せて、対策実施による効果を確認するため、実証運用時のモニタリング調査計画を立案する。この段階におけるモニタリング調査計画は、以下の事項を確認することを目的として、新技術を活用した観測機器の導入等も視野に入れ、必要な項目や頻度を設定する。

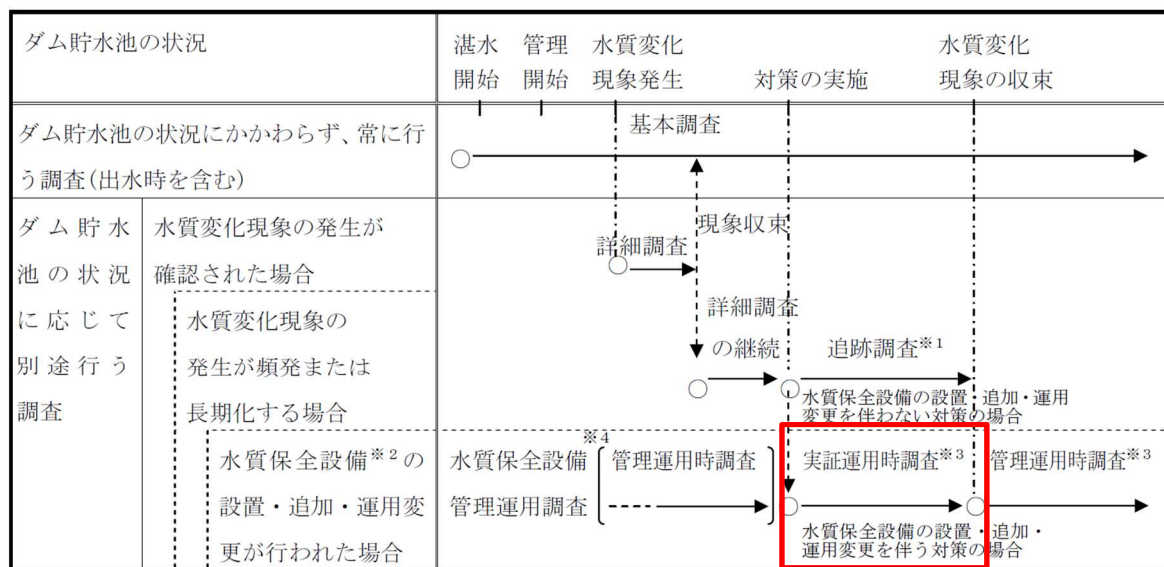
- ・ 富栄養化現象の抑制状況または富栄養化現象に起因する具体的な問題の回避状況
- ・ 水質改善の指標値の達成状況
- ・ 水質改善対策の機能
- ・ その他の水質変化現象への影響

気泡式循環施設の効果確認のためのモニタリング調査は、共通して必要となる調査もあるが、設定した水質改善目標によって異なる調査もあるため、上記の目的に応じてモニタリング調査の内容を十分に検討したうえで計画作成を行うことが重要である。

なお、このモニタリング調査は、調査要領における水質保全設備管理運用調査の中の実証運用時調査に位置付けられる。モニタリング期間は、おおむね3年を目安としている。

この調査を実施することにより、対策の効果が十分に確認されない場合等には、モニタリング期間を延長して水質改善効果の再確認を行うことや、状況に応じて必要な段階まで検討プロセスを立ち返って見直す。

表 3.4 ダム貯水池の状況に応じた調査の種類(調査要領 P I -3 より抜粋)



3-4. 効果確認(対策検討・実施プロセス)

3-4-1. 対策効果発現状況の確認

対策検討・実施プロセスにある気泡式循環施設の効果発現状況は、モニタリング調査結果等を用いて気泡式循環施設による対策の有効性の観点から評価を行うことを基本とする。

【解説】

気泡式循環施設による水質改善対策は、富栄養化現象の原因となる藍藻類の増殖に適さない水環境を創出することによりその効果を発揮する。このことから、効果確認にあたっては、以下の項目に着目して複数年のモニタリング調査結果を用いた総合的な判断を行うことが重要である。

(1) 富栄養化現象の抑制状況また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

- ・ 気泡式循環施設稼働前後のアオコ発生期間を比較して確認
- ・ 気泡式循環施設稼働前後のダム貯水池におけるカビ臭濃度のピーク値や浄水場における活性炭投入の目安となるカビ臭濃度の超過日数を比較して確認
- ・ 気泡式循環施設稼働前後の景観に対するイメージの違い、苦情件数、水道事業者による活性炭投入量を比較して確認

(2) 富栄養化現象改善の指標値の達成状況

- ・ 気泡式循環施設稼働後のアオコレベル、クロロフィル a 濃度、ダム貯水池におけるカビ臭濃度等の指標値達成日数で確認

(3) 気泡式循環施設の機能確認

- ・ 気泡式循環施設稼働前後のアオコレベル、クロロフィル a 濃度、ダム貯水池におけるカビ臭濃度等の目標達成日数の違いから確認
- ・ 貯水池内の水温やクロロフィル a 濃度の鉛直分布を気泡式循環施設稼働前後で比較し、水温成層形成状況や藍藻類増殖状況の違いから確認
- ・ 対策を実施しなかった場合の貯水池内の水温鉛直分布やクロロフィル a 濃度を水質シミュレーションで予測計算し、気泡式循環施設を稼働した場合の水質諸値（実測値）と比較して確認

(4) 異なる水質変化現象の発生状況の確認

気泡式循環施設の稼働により藍藻類の発生は抑制されたが、貯水池内の濁度が上昇するなど発生する水質変化現象自体が変化する場合がある。また、発生する藍藻類の属種が変化す

ること例えばアオコからカビ臭のように富栄養化現象の内訳が変化する場合もある。このため、気泡式循環施設の稼働後は異なる水質変化現象が発生していないか注視することが重要である。

- ・気泡式循環施設の稼働前後の植物プランクトン調査結果の比較により、別の水質問題を引き起こす藍藻類が発生していないかを確認

（例： *Microcystis* 属から *Anabaena* 属へと優占種が変化していないかを確認する）

- ・気泡式循環施設の稼働前後の貯水池表層あるいは放流河川の濁度を比較し、濁水問題が発生していないかを確認

対策効果発現状況の確認は、観測値を用いて行うことが基本であるが、水質シミュレーションを用いると稼働前後の濁度を予測計算し検証することが可能であり、濁水問題の発生有無を確認する手法として有効である

- ・流域関係者から異なる水質変化現象に関する情報提供等を受けていないかを確認

3-4-2. 運用ルール改善

気泡式循環施設の運用ルールは、維持管理プロセスにおいても水質改善効果を確実に発揮するために、対策効果発現状況の確認結果を踏まえ、水質シミュレーション等を用いて改善することを基本とする。

【解説】

「3-3-5. 運用ルールの設定及びモニタリング調査(実証運用時調査)計画立案」において設定した運用ルールに基づき気泡式循環施設をおおむね3年運用した結果を、「3-4-1. 対策効果発現状況の確認」で評価し、その結果に応じて運用ルールの改善を行う。

運用ルールの改善には以下の2通りの方向性があり、対策効果の発現状況に応じて必要な検討を行うものとする。

(1) 対策効果の発現状況が当初想定を下回っている場合

「3-4-1. 対策効果発現状況の確認」において当初想定した対策効果が発現していないと評価された場合は、運用ルールの改善で対応可能かを検討する。これは、気泡式循環施設の諸元設定や運用ルール決定の際に、当該ダム貯水池で発生している現象を的確に把握しきれていなかったことや、現象を水質シミュレーションにおいてモデル化していなかったことにより「3-3-5. 運用ルールの設定及びモニタリング調査(実証運用時調査)計画立案」において設定した運用ルールに従った運用を行っても想定した水質改善効果が発現しなかったり、当初想定していなかった影響が顕在化したことが原因と考えられる。

したがって、この段階では、以上の水質シミュレーションの特性を踏まえたうえで、以下に示す検討方法の例を参考にPDCAサイクルの考え方に基づいて運用ルールの改善について検討を行うことが重要である。

- ・「3-4-1. 対策効果発現状況の確認」の評価結果から、気泡式循環施設の稼働期間や稼働開始のタイミング、それらを定める指標値等の運用条件に問題がないかを確認する。
- ・水質シミュレーションモデルを用いて運用条件を変更した場合の予測計算を行い、効果発現状況に改善が見られるかを検討する。
- ・予測計算期間は、運用条件変更後の予測計算値の精度を高めるため、気泡式循環施設稼働後のモニタリング期間について行うことが望ましい。
- ・予測計算にあたっては、「3-3-3. 対策選定及び諸元設定」を行った際に使用した水質シミュレーションモデルの再現性についても再確認する。
- ・水質シミュレーションによる検討の結果、効果発現状況に改善が見られる場合には、運用ルールを適宜修正し、再び運用とモニタリング調査により状況を監視する。
- ・効果発現状況に改善が見られない場合には、気泡式循環施設の吐出深度の変更や増設、

新たな水質改善対策の実施が必要と考えられることから、図 3.1 に示す水質改善対策の体系化の概念図に基づいて必要な段階まで立ち返って検討を行う。

(2) 対策効果の発現状況が当初どおりで運用効率化の可能性がある場合

「3-4-1. 対策効果発現状況の確認」において当初想定した対策効果が発現していると評価された場合は、運用ルールに効率化できる可能性がないか検討を行う。これは、「3-3-5. 運用ルールの設定及びモニタリング調査(実証運用時調査)計画立案」において設定した運用ルールは、対策効果が確実に発現するよう安全側の設定をする場合が多く、実際に運用した場合に運用期間の短縮や簡素化等の効率化が期待できる場合もあるためである。

したがって、この段階では、以上の運用ルール設定時の前提を踏まえた上で、以下に示す検討方法の例を参考に運用ルールの改善について検討を行うことが重要である。

- ・「3-4-1. 対策効果発現状況の確認」の評価結果から、気泡式循環施設の稼働期間の短縮や簡素化(濁度上昇時に稼働停止する運用を廃止する等)等の効率化を行った場合でも水質改善効果が維持できるかを確認する。
- ・効率化の可能性がある場合は、水質シミュレーションモデルを用いて運用条件を変更した場合の予測計算を行い、効果発現状況に変化がないか(効果発現状況を維持できているか)を確認する。
- ・その結果を踏まえ、既往の運用ルールを適宜修正し、維持管理プロセスにおいて適用する運用ルールを策定する。

なお、運用ルールの改善を行う際は、その影響や効果を知見として蓄積し、その後の運用に活用することが重要であることから、運用ルールを改善した時期やその理由等についても記録し保管しておくことが重要である。

以上に示したように、気泡式循環施設の運用については、当施設による水質改善効果に不確実性が含まれることを勘案し、必要に応じて順応的管理(アダプティブマネジメント)の考え方を取り入れて、運用ルールを適宜見直しながら最適化を図ることが重要である。

3-4-3. モニタリング調査(管理運用時調査)計画立案

維持管理プロセスにある気泡式循環施設については、対策の有効性を確認するためのモニタリング調査(管理運用時調査)計画を立案することを基本とする。

【解説】

「3-4-1. 対策効果発現状況の確認」において気泡式循環施設の効果が適切に発現していることが確認された場合には、「3-4-2. 運用ルール改善」結果をもとに、その後の本運用段階においても気泡式循環施設が期待する効果を発現していることを確認するため、モニタリング調査を継続して実施する。

この段階で行うモニタリング調査計画の立案では、「3-3-5. 運用ルールの設定及びモニタリング調査(実証運用時調査)計画立案」で示した4つのポイントを確認するために必要な項目や頻度等を設定することが基本となるが、既に実証運用段階で対策効果の発現状況が確認されていることから、基本的には調査項目や調査頻度等の効率化を検討する。

なお、このモニタリング調査は、調査要領における水質保全設備管理運用調査のうち管理運用時調査に位置づけられる。

3-5. 効果確認(維持管理プロセス)

維持管理プロセスにある気泡式循環施設の効果発現状況は、モニタリング調査結果等を用いて水質改善対策の有効性の観点から評価を行うことを基本とする。

【解説】

気泡式循環施設を運用してその効果を継続的に発現していくためには、定期的に対策効果発現状況を確認する必要がある。その際には、図 3.14 に示す効果確認に関するPDCAサイクルを参考に見直しを行うことが望ましい。

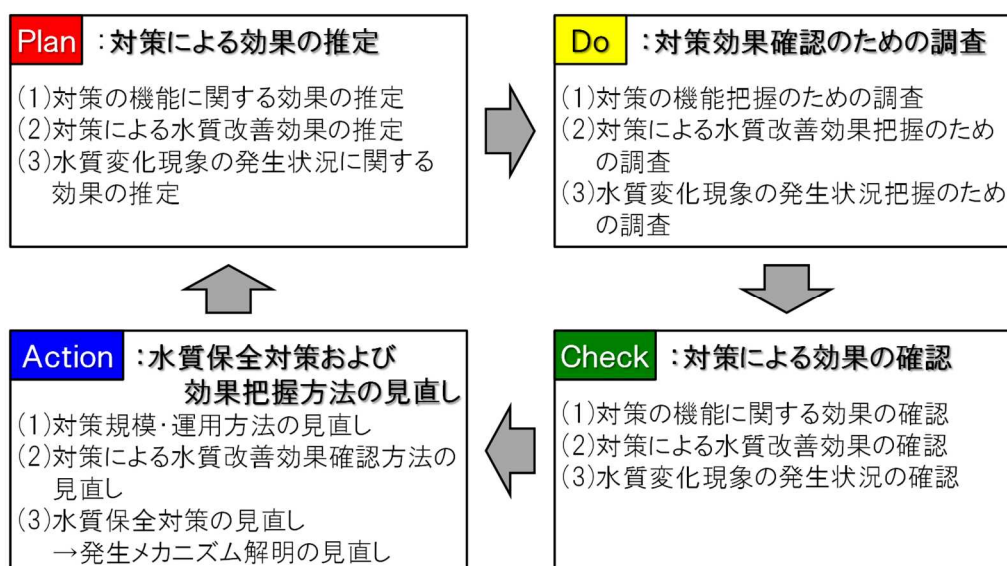


図 3.14 効果確認に関するPDCAサイクルの概念図

なお、気泡式循環施設による対策の有効性が低下する理由としては、気候変動等による気象、水文、流入水質等の与条件の変化、流域対策の進捗による境界条件の変化(例えば、治山事業や砂防ダム設置等の土砂流出対策による流入負荷量の縮減、下水道等の整備や下水処理方式の高度化による平水時の流入水質の改善等)等により、対策施設の規模が適切でなくなった、現状の水質変化現象に対する適切な対策ではなくなった、発生要因に従前とは異なる要素が付加されてきた等が考えられる。

維持管理プロセスにおける対策効果発現状況の確認は、対策検討・実施プロセスにおける対策効果発現状況の確認と同様に以下に示す4つの項目について行うほか、流域対策の進捗がダム貯水池における富栄養化現象の発生状況や湖内対策の効果に影響を及ぼしている場合には、流域対策による境界条件の変化についても併せて確認する。

- (1) 富栄養化現象の抑制状況また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

- (2) 富栄養化現象改善の指標値の達成状況

(3) 気泡式循環施設の機能確認

(4) 異なる水質変化現象の発生状況の確認

3-6. 運用・調査・対策施設の効率化の検討

3-6-1. 運用の効率化

対策効果発現状況の確認の結果、気泡式循環施設による対策が有効であった場合には運用ルール等の効率化について検討を行うことを基本とする。

【解説】

気泡式循環施設の運用が本運用段階となり、その効果についてもダム等の管理に係るフォローアップ制度（以下「フォローアップ制度」という。）に準じて適切に評価される段階になると、それまでに蓄積された調査データ等から効果を維持しつつ運用を効率化できる可能性がある。

また、蓄積された調査データ等を用いて水質改善対策の運用の妥当性を検証することにより、運用ルールの簡素化やＩＣＴ技術を活用した気泡式循環施設の自動運転等が可能となり、これによりダム管理者の負担軽減やコスト縮減が期待できる場合もある。

運用の効率化検討は、それまでに蓄積された調査データや気泡式循環施設の運用実績等を踏まえて、運用期間の短縮や気泡式循環施設の稼働基数を間引きする運転を行っても同程度の水質改善効果が得られるかという視点から検証し、必要に応じて運用ルールの更新や自動運転の可能性等について検討する。

3-6-2. モニタリング調査の効率化

気泡式循環施設の有効性を確認するために必要な諸元となるよう、モニタリング調査の効率化について検討を行うことを基本とする。

【解説】

「3-6-1. 運用の効率化」に併せて、モニタリング調査項目や調査頻度等の効率化の可能性についても検討を行う。これは、対策効果の発現状況を確認するために必要となるモニタリング調査データの蓄積が進んだことで、モニタリング調査を効率化できる場合があるためである。

モニタリング調査の効率化では、「3-4-3. モニタリング調査(管理運用時調査)計画立案」と同様に水質改善目標の達成状況、水質変化現象の発生状況、水質改善対策による効果の発現状況を把握するために必要な項目や頻度等を設定することが基本となる。

この維持管理運用プロセスでは、既に対策効果の発現状況が確認されていることから、維持管理コスト縮減の観点も踏まえて、調査地点や調査頻度等を効率化しても気泡式循環施設による対策の有効性が確認可能な調査データが取得できるかという視点から、新技術を活用した観測機器の導入等も視野に入れ、現在のモニタリング調査の効率化について検討する。

ただし、流域対策等の進捗による流入河川水質の変化や対策施設の実施による貯水池内環境の変化が生じている場合もあることから、モニタリング調査の効率化は慎重に行う必要がある。

なお、このモニタリング調査は、調査要領における水質保全設備管理運用調査のうち「管理運用時調査」に位置づけられ、各ダムで策定する水質調査計画の見直し時期(おおむね5年に1回の頻度)に合わせて効率化を検討する。モニタリング調査の透明性を確保する観点から、フォローアップ制度に基づき地方整備局等(地方整備局、北海道開発局、内閣府沖縄総合事務局及び独立行政法人水資源機構)に設置されているフォローアップ委員会を活用することも有効である。

3-6-3. 対策施設の効率化

気泡式循環施設の更新時には、新技術の活用も視野に入れた施設の効率化について検討を行うことを基本とする。

【解説】

気泡式循環施設は、空気圧縮機が耐用年数を迎えると更新する必要がある。また、散気管も経年的な劣化に応じて定期的に交換する必要がある。

これら施設の更新等を行う際に従前と同様の規模や規格で入れ替えると、流域対策の進捗に伴い流入負荷量が低減している場合には、施設規模が過大となる場合もある。また、水質障害発生前のデータが少なかったため、当初の施設規模が不確実性のある水質シミュレーション結果に基づいて設定された場合には、更新時までに蓄積されたデータを用いた解析を行った結果から、稼働基数を間引きする運転を適用できる場合や基数を縮減できる場合がある。さらに、技術の進歩によって空気吐出を効率的に行うことのできる空気圧縮機や伸縮に強い散気管を採用することで更新費用や維持管理費用を縮減できる可能性もある。

したがって、気泡式循環施設の更新にあたっては、これら外的要因の変化・データの蓄積等に伴う施設規模の適正化や技術の進歩による新技術の導入等に着目した検討を行い、当該ダム貯水池に適した施設に変更していくことが重要である。

施設更新時の具体的な検討については、「3-7. 施設更新時の検討手法」に詳述する。

3-7. 施設更新時の検討手法

3-7-1. 基本的な考え方と手順

気泡式循環施設を更新する際には、既存施設の機能確認及び効果確認、貯水池特性及び流域特性の変化等の確認、新技術の動向確認を行った上で、当該ダム貯水池に適した対策となるよう検討するものとする。

【解説】

気泡式循環施設は、送気管の劣化や空気圧縮機が耐用年数を迎える等の理由から、施設の大規模な更新が必要となる場合がある。

アオコ・カビ臭等の藍藻類由来の富栄養化現象の対策として流域対策をはじめとする根幹的対策を行う一方で、即効性のある緊急的・暫定的な対策として気泡式循環施設をはじめとする湖内対策が実施されることが一般的である。しかし、この根幹的対策には長期間を要することが多いことから、緊急的・暫定的な対策として導入された施設が恒久的対策として役割を担っているのが実態である。このため、気泡式循環施設についても施設更新時には暫定的な対策としてではなく、恒久的対策としてどのように対策機能を維持していくかという観点で検討することが重要になりつつある。

気泡式循環施設を更新する際に従前と同様の規模で入れ替えると、流域の負荷特性の変化や流域対策の進捗に伴い流入負荷量が低減している場合や堆砂に伴って循環混合対象水量が減少した場合には、施設規模が過大となることもある。

一方、貯水位変動幅の増大や貯水池水温の上昇トレンドに変化がみられるダム貯水池では、対策規模が不足しつつある可能性がある。また、既存の気泡式循環施設が導入されてから相当程度経過したダム貯水池では、当時の気泡式循環施設の設計思想では適正な施設規模であったが、現在の設計思想に基づくと施設規模が不足している可能性もある。

さらに、技術革新により開発された運転効率の高い空気圧縮機や耐用年数の長い送気管を施設更新時に適用したり、観測技術の向上に伴い新たな水質自動監視装置を導入してそれと連動した気泡式循環施設の運用方法に変更することにより、施設更新費や維持管理費を縮減できる可能性もある。

したがって、気泡式循環施設に係る各種機器の更新を行う際には、既存施設と同じ諸元や仕様のものを安易に採用するのではなく、与条件の変化や技術革新の動向に注意を払い、必要な検討を行うことが重要である。

気泡式循環施設の更新は、現時点での効果確認では効果が発現していると評価されるが、施設に係る各種機器等が耐用年数を迎えるあるいは施設の老朽化が著しく、ここ数年以内に各種機器等の入れ替えをする必要がある段階において適用するものを想定し、図 3.15 に示す検討フローに従って行うことを基本とする。したがって、ここで扱う気泡式循環施設更新

時の検討とは、3-4. や 3-5. に示した効果確認において効果が不十分と判断された場合には適用しない。

なお、一般的には空気圧縮機に関しては10～15年で機器更新する場合が多く、その他の機器や設備に関しては故障や破損等が生じた時に更新する場合が多い(メーカーヒアリング結果より)。

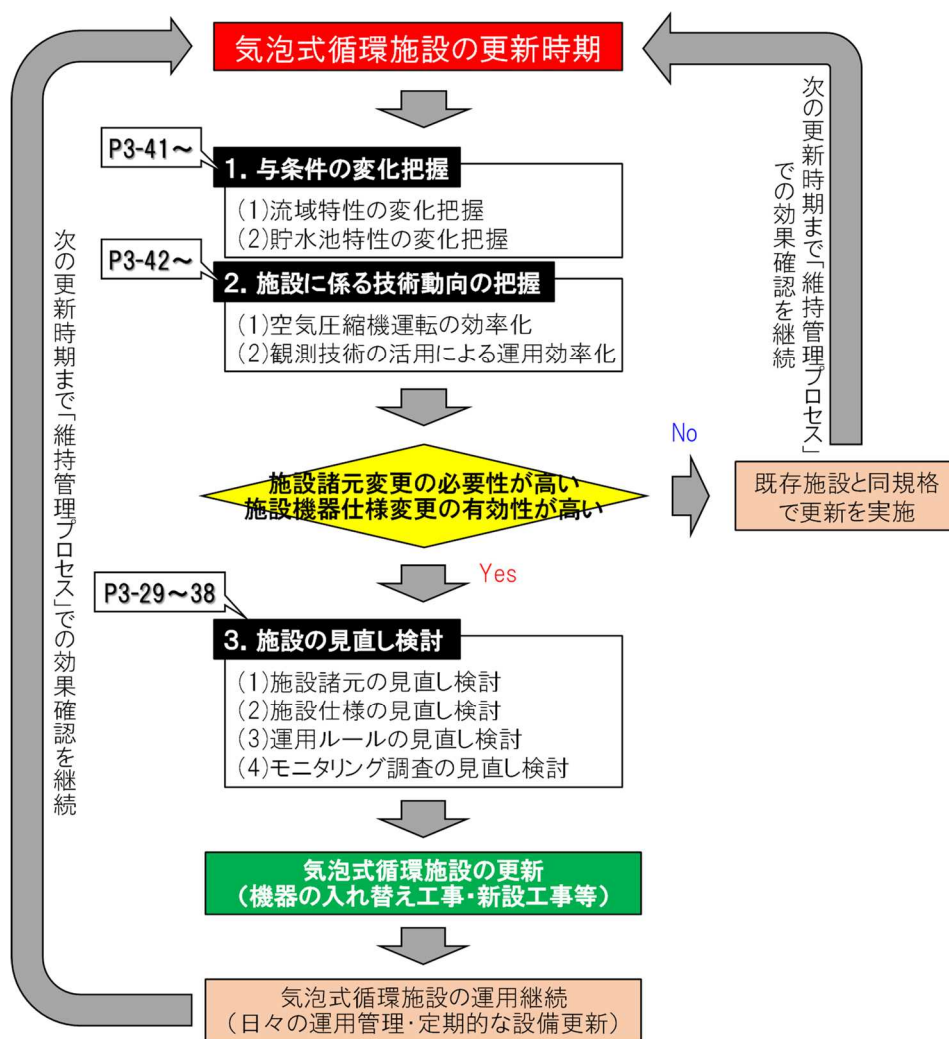


図 3.15 気泡式循環施設の更新に係る検討フロー

気泡式循環施設の更新については、以上に示した事後保全的な考え方だけでなく、耐用年数を迎えるまでに時間的猶予はあるが、施設に係る各種機器等の機能劣化や故障の確率を低減するために計画的に施設更新を実施する、つまりアセットマネジメントの観点に基づく計画的な施設更新の導入も検討していくことが重要である。

3-7-2. 与条件の変化把握

気泡式循環施設の更新を行う際には、当該ダム貯水池の流域特性や貯水池特性等の与条件変化を把握し、その結果に基づいて既存施設と同規格での更新が適当か否かを判断するものとする。

【解説】

「3-4. 効果確認(対策検討・実施プロセス)」や「3-5. 効果確認(維持管理プロセス)」において気泡式循環施設の効果確認を行い、想定した水質改善効果が確認されている場合、気泡式循環施設の施設諸元を見直す必要はないものと判断される。しかし、長期間に渡って施設を運用していると、その間に流域の人口減少や土地利用形態の変化に伴い流域からの排出負荷量が減少傾向を示し、今後もその傾向が継続することが想定されるケースや夏季の貯水位変動幅の変化や堆砂の進行に伴う有効貯水容量の変化により、気泡式循環施設を用いて循環混合すべき範囲や水量が減少していくケースも出てくる。

こういった場合、直ちに施設諸元を変更する必要はないが、定期的な施設更新を行う際には、これら大きな特性の変化を考慮して、適切な施設規模で更新を行うことが望ましい。

気泡式循環施設の更新を行う際には、流域フレーム調査(流域から排出される汚濁負荷ポテンシャルを試算するための調査)の履歴を用いた排出負荷量の推移の確認、貯水位変動の経年変化や貯水池堆砂の進行状況の確認、今後の気候変動による影響も念頭に置いたダム貯水池内で発生する植物プランクトンの組成変化の確認等を行い、施設更新時に空気吐出量の変更や吐出深度の変更の必要性を検討し、必要に応じて施設の見直し検討を行う。

具体的には、施設設置時の諸元決定根拠を既往検討報告書で確認し、そこで設定されている与条件を現時点の実測値あるいは施設更新時点の予測値に置き換え、諸元の見直しが適当であるかを確認する。

3-7-3. 施設に係る技術動向の把握

気泡式循環施設の更新を行う際には、施設周辺機器の技術革新の動向について情報を収集して当該ダムで適用可能な機器等を把握し、その結果に基づいて既存施設と同規格での更新が適当か否かを判断するものとする。

【解説】

気泡式循環施設を構成する機器等の中には、耐用年数を迎えると定期的に交換しなければならないものや、経年的な劣化により適宜交換を必要とするものがある。

空気圧縮機は電気機械設備であることから、機器のメンテナンスを定期的に行いつつ、機器の耐用年数を迎える毎に機器を入れ替える必要がある。

気泡式循環施設の定期的な点検を行う際によく見られる不具合としては、送気管の劣化に伴うエア漏れや夏季に空気圧縮機を高負荷で稼働することで生じる高温度異常が多い。送気管は流木が多いダム貯水池では外部からの衝撃等でホースに穴が損傷したり、施設のON/OFFの切り替えが多い場合は水圧によるホースの伸縮によってホース内部にヒビが生じる（図 3.16）場合がある。空気圧縮機の不具合については、設置する地域の気候やコンプレッサ室内の換気機能等が不具合の発生度合いに影響する場合がある。このため、機器更新時にはこれら点検時に確認される不具合の傾向も参考にして、適切な機器や材料を選定することが重要である。

また、気泡式循環施設の運用開始／終了の判断は、ダム貯水池の表層水温や水温勾配を指標にすることが多いが、水質自動監視装置の計測頻度や精度が向上し、そのデータを活用してより精密に稼働期間を設定することができれば、消費電力を削減しコスト削減に資することができる可能性もある。

したがって、気泡式循環施設の更新を行う際には、施設及びその周辺機器等のこれまでの故障履歴を整理するとともに、技術革新の動向について情報を収集し、当該ダム貯水池において適用することで機器や設備の延命化が図ることができたり、経済性の向上を図ることができる場合には、その導入にあたっての検討を行うことが望ましい。

なお、施設更新時には、気泡式循環施設以外の対策施設の開発・普及状況も注視し、当該ダムの対策として適切な施設に変更することも重要である。



図 3.16 水圧による送水管の内部からの損傷事例

【3章の参考文献】

- 1) ダム貯水池水質改善の手引き：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 30 年 3 月
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf2/damtyosuichisuisitukaizentebikiH30.pdf
- 2) ダム貯水池水質調査要領：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 27 年 3 月
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/suishitsu/index.html
- 3) 小川文章，對馬育夫：底層環境に着目した停滞性水域の水環境管理技術に関する研究（簡易的な藻類定性定量方法の開発），平成 30 年度 研究開発プログラム報告書（13. 地域の水利用と水生生態系の保全のための水質管理技術の開発），国立研究開発法人土木研究所，17-21，2019
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2018/pdf/pro-13.pdf>
- 4) 中川恵・高村典子：フィコシアニンセンサーによる野外でのアオコの定量，陸水学会誌 72，pp145-152，2011
https://www.jstage.jst.go.jp/article/rikusui/72/2/72_145/_article/-char/ja/
- 5) Asaeda and Imberger：Structure of Bubble Plumes in Linearly Stratified Environment,

- J. Fluid Mech, 1993, vol. 249. pp35-57
- 6) 秋山優、有賀祐勝、坂本充、横浜康継：藻類の生態、内田老鶴圃、pp87、1986
 - 7) 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、pp91、1973
 - 8) 岩佐義朗：湖沼工学、山海堂、pp222、1990
 - 9) 日本陸水学会：陸水の事典、講談社、pp440、2006 年
 - 10) 市村俊英：湖沼植物プランクトン群落の物質生産における透明度の生態的意義について、植物学雑誌、1956
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jplantres1887/69/815/69_815_219/_article/-char/ja/
 - 11) 土木学会：環境工学公式・モデル・数値集、pp. 368、2004 年

4. 本マニュアル適用にあたっての留意事項

気泡式循環施設の稼働によりその他の水質変化現象が発生するなどの影響が生じる場合もあることから、複数の水質変化現象への対応が求められる場合には、水質改善の優先度やバランスを勘案して気泡式循環施設の導入を決定するものとする。

【解説】

水質改善対策として気泡循環施設を選定する際には、発生している藍藻類由来の富栄養化現象への効果とその他の水質変化現象への影響とがトレードオフの関係となる場合がある。

このため、水質改善対策として気泡式循環施設を選定する際には、稼働に伴う副次的効果や影響も考慮することが重要である。また、気泡式循環施設を含む水質改善対策施設を連携して運用することにより水質改善効果をさらに高めることが可能な場合もある。

以下に、個別ダムでの検討の参考となるよう、気泡式循環施設の運用に伴って生じる可能性のある水質変化現象や他の水質改善対策施設との連携により得られる効果について記載する。

(1) 冷温水現象の発生

気泡式循環施設は、一般的には水温成層が形成され始める晩春～初夏から稼働を開始し、アオコ等が終息する晩夏から秋季まで稼働させることが多い。このような運用を行うと、湖水の受熱量が大きくなり、熱収支が変化する。その結果、秋季には流入水に比して貯水池内水温が高くなる場合がある。そうすると、取水標高に制限があるダム貯水池では、流入水温に比べて放流水温が高くなり、温水放流現象が発生することが懸念される(図 4.1)。

また、気泡式循環施設の稼働開始時期が水温成層が形成され始める時期よりも前の場合には、湖水循環により貯水池の表層水温が稼働前より低下し、流入水温よりも低くなる場合がある。この場合、例えば水温が最も高くなる表層から湖水を放流したとしても、流入河川水温よりも低い温度の湖水が下流河川に放流されることとなり、冷水放流現象が発生する可能性がある(図 4.2)。このような現象は、気泡式循環施設の空気吐出深度が深いほど低水温の水塊を表層へ移送することになるため、より顕著に表れやすい。

下流河川に冷温水の放流により影響をうける対象(農業利用、生物等)が存在するダム貯水池において気泡式循環施設を稼働する場合には、上記を踏まえた検討を行い、必要に応じて対応策を講じる必要がある。ただし、以上を理由にした温水放流現象が発生し具体的な被害が生じた例はこれまでに確認されていない。また、冷水放流に関しては、表層水温の低い春季から気泡式循環施設を稼働するダム貯水池において一時的に発生するケースが多く、長期的に冷水放流となるケースは極めて稀であると考えられる(図 4.3)。

なお、ダム貯水池における放流水温の設定は、流入河川水温相当とすることを基本とする場合が多いが、地域によっては流入河川水温よりも温かい湖水を放流することが望まれる場

合もあることから、気泡式循環施設の稼働に伴って生じる冷温水現象への対応については、以上の基本原則を念頭に置きつつ、利水者との合意形成や環境への配慮を施すことが重要である。

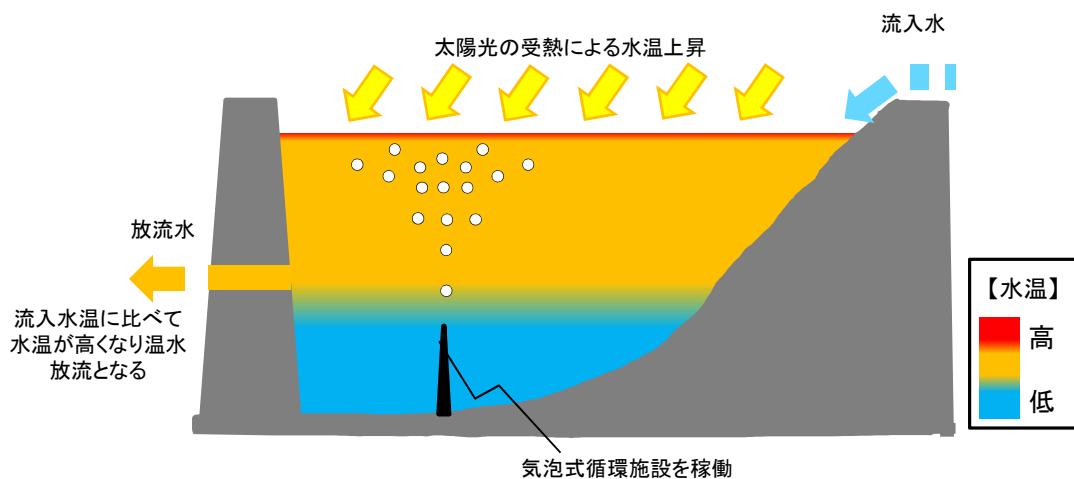


図 4.1 気泡式循環施設の稼働による温水放流現象の発生 概念図

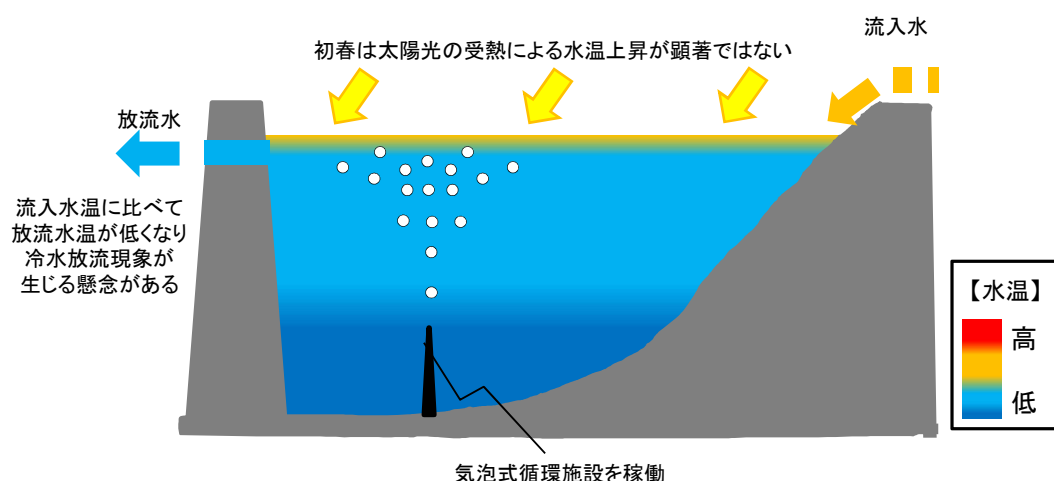


図 4.2 気泡式循環施設の稼働による冷水放流現象の発生 概念図

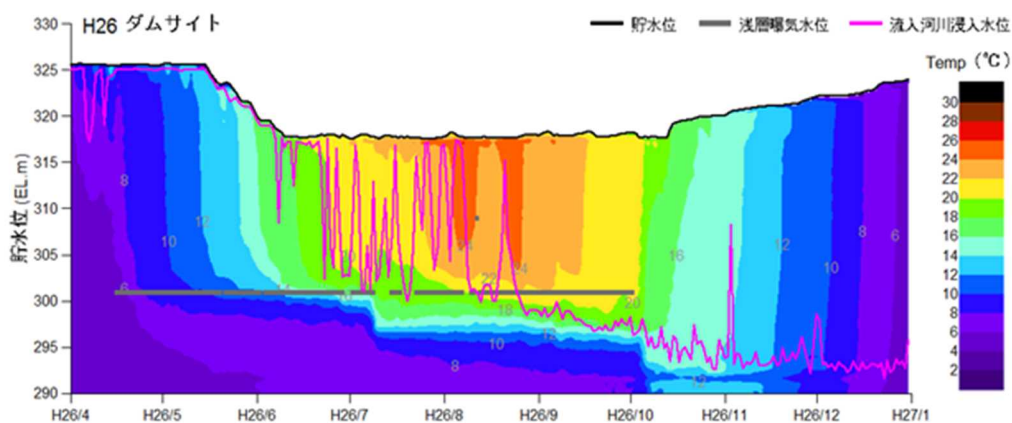


図 4.3 気泡式循環施設を春季に稼働することによる表層水温の低下事例

(2) 出水後の濁水長期化現象の促進

夏季に出水が発生すると、一次的に表層付近の水温躍層が破壊されるが、出水後に晴天が続くと急激に表層付近の水温躍層が形成され、藍藻類の増殖に適合した環境が創出される。このため、富栄養化現象への対応のみを考えると、気泡式循環施設は出水時も稼働することが望ましい。しかし、その反面出水時にも気泡式循環施設を稼働し続けると、流入する濁質分の沈降が阻害されるため、出水後に貯水池の濁りがなかなか落ち着かなくなり、貯水池及び下流河川において濁水長期化現象が顕在化する場合がある(図 4.4)。このように出水時から出水後の気泡式循環施設の運用については、富栄養化現象と濁水長期化現象に対してトレードオフの関係があることが知られている。

出水後に濁水が長期化しやすいダム貯水池において気泡式循環施設を稼働する場合には、以上に示した濁水長期化の発生メカニズムを踏まえ、当該ダムでの濁水長期化現象の発生可能性を検討し、必要に応じて運用方法の工夫を行う等して対応策を講じることが重要である。

出水後の気泡式循環施設の稼働再開を判断する目安としては、従前から当該ダムにおいて濁水長期化現象に伴うクレームの発生等が確認されている場合には、出水に伴う水温鉛直分布の変化程度や濁度の貫入深度、出水後の表層付近の清水層形成の時期等を把握し、濁度が低下した深度から徐々に空気吐出標高を下げていく等の運用方法も考えられる。

一方、出水時に流入する濁質分の沈降が速やかに進む傾向にあり濁水長期化現象に伴う実際の被害等も生じていない場合には、出水後の水温上昇に伴う富栄養化現象の発生を抑制することを優先し、早期の運転再開を選択するあるいは出水中にも稼働を継続することを選択することが望ましい。

以上に示した富栄養化現象と濁水長期化現象がトレードオフの関係にあるダム貯水池において気泡式循環施設の運用方法を決める際には、既往の調査結果に基づく検討に加えて水質シミュレーションの活用が有効であるが、出水時の貯水池内流動の再現など複雑な水理・水質現象の再現が必要となることから、水質シミュレーションの実施に際しては鉛直二次元モデルを適用することが望ましい。

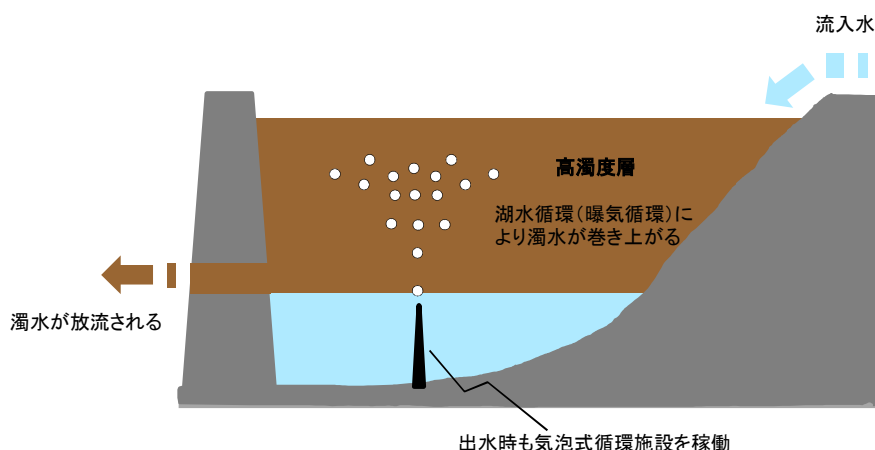


図 4.4 気泡式循環施設の稼働による濁水長期化の促進 概念図

(3) 底層嫌気化の促進

気泡式循環施設の稼働により、空気吐出深度付近に強固な水温躍層が形成されると、水温躍層より下層の湖水は出水等による攪乱を受けない限りは長期間滞留されることとなる。湖底付近では植物プランクトンの呼吸や有機物の分解によりDO（溶存酸素）が消費されているが、水温躍層より下層の湖水が滞留しやすくなると、表層からの酸素供給が滞るためDO消費が卓越し、底層の貧酸素化（嫌気化）が顕著となる場合がある（図 4.5）。このとき、底層では重金属類や栄養塩等が溶出し高濃度となる場合があり、その状態で循環期を迎えると、貯水池内の重金属類や栄養塩の濃度が急激に上昇して利水障害を発生させることもある。

このことから、気泡式循環施設の運用を開始した当初は、こういった貯水池底層の水質変化にも注意する必要がある。

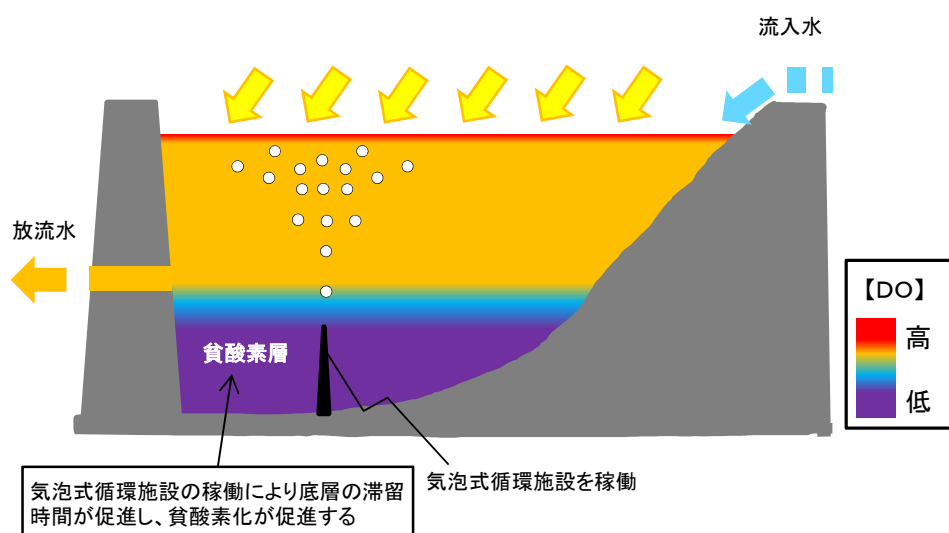


図 4.5 気泡式循環施設の稼働による底層嫌気化の促進 概念図

(4) 湖水均一化による清澄水の選択的取水への影響

気泡式循環施設によって湖水循環が促進されることにより、かえって清澄な湖水の取水が妨げられ、利水への影響（例：上水道取水におけるカビ臭への影響）が回避できなくなってしまう場合もある（図 4.6）。

例えば、カビ臭を生成する藍藻類は、気泡式循環施設が稼働していない場合には、貯水池表層付近に多く存在することから、カビ臭濃度も表層付近が最も高くなるが、気泡式循環施設によって十分に藍藻類の増殖抑制効果が発現しないと、鉛直方向にカビ臭を生成する藍藻類が均等に分布することになり、結果として鉛直方向のカビ臭濃度の変化が小さくなり、どの深度から取水してもカビ臭物質が含まれることになる場合がある。

このように気泡式循環施設による増殖抑制効果が十分に発現せず利水に影響を及ぼす危険性がある場合には、一時的に気泡式循環施設の稼働を停止し、アオコ・カビ臭の原因とな

る藍藻類を表層付近に集めることによって、その下の層にカビ臭物質を多く含まない清澄な湖水を温存し、清澄な湖水のある深度から優先的に取水する等の一時的な措置をとること等も検討する必要がある(図 4.6)。

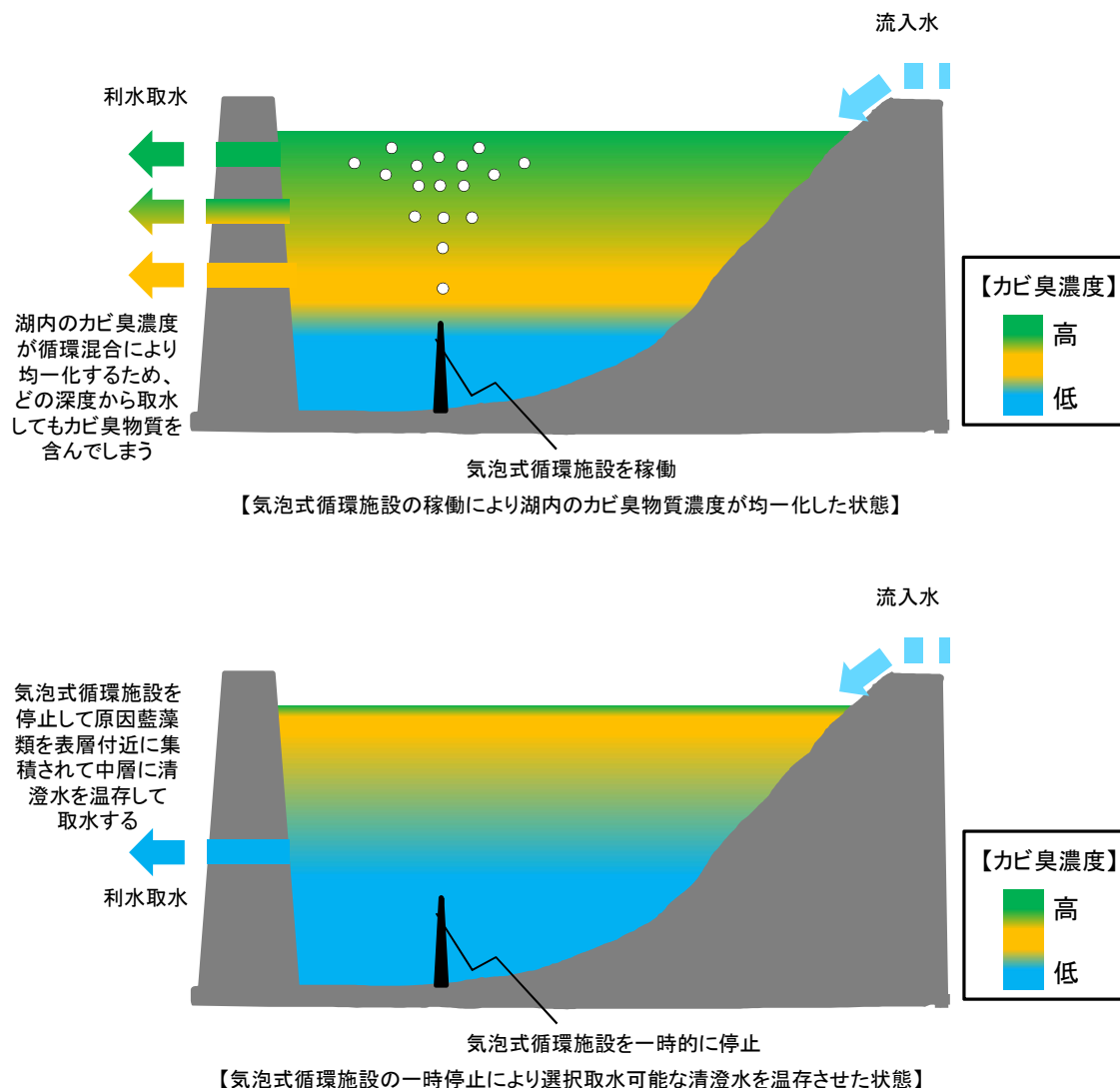


図 4.6 気泡式循環施設の稼働に伴う湖水均一化の影響と対応策 概念図

(5) 気泡式循環施設と選択取水設備の連携運用による水質改善効果の向上

気泡式循環施設を運用する際は、選択取水設備(あるいはコンジットゲート等の放流設備)の運用と連動させることで水質改善効果を向上させることができる場合もある。一般的にこの手法は「流動制御操作」と呼ばれるものであり、これにより出水時に流入する栄養塩を湖内に滞留させずに下流河川に早期に放流させることで、出水後の藍藻類の増殖を栄養塩枯渇により抑制する方法であり、図 4.7 に例示する三春ダム等で実際に運用されている。

一般的にダム貯水池に流入する栄養塩負荷量は、出水時に供給される割合が大きく、出水後に増殖に適した環境が継続すると富栄養化現象の発生程度に大きく影響することから、気

泡式循環施設の導入に伴い放流設備の運用見直しの可能性を検討し、流動制御操作の適用を検討することも考えられる。なお、放流設備が他事業体の管理するものである場合には、管理者との調整により水質改善効果の向上に資する運用とすることを検討することが有用なこともある。

ただし、平水時の放流標高も水温躍層付近に低下させると、表層付近の滞留が促進されて、むしろ表層付近の藍藻類量が増大する場合もある（特に従来は表層取水であったものを変更した場合には、ダムサイト付近の表層放流によって得られていたウォッシュアウト効果が失われるため変化が顕著になる場合もある）。このことから、当該ダム貯水池の特性を踏まえて慎重に判断する必要がある。

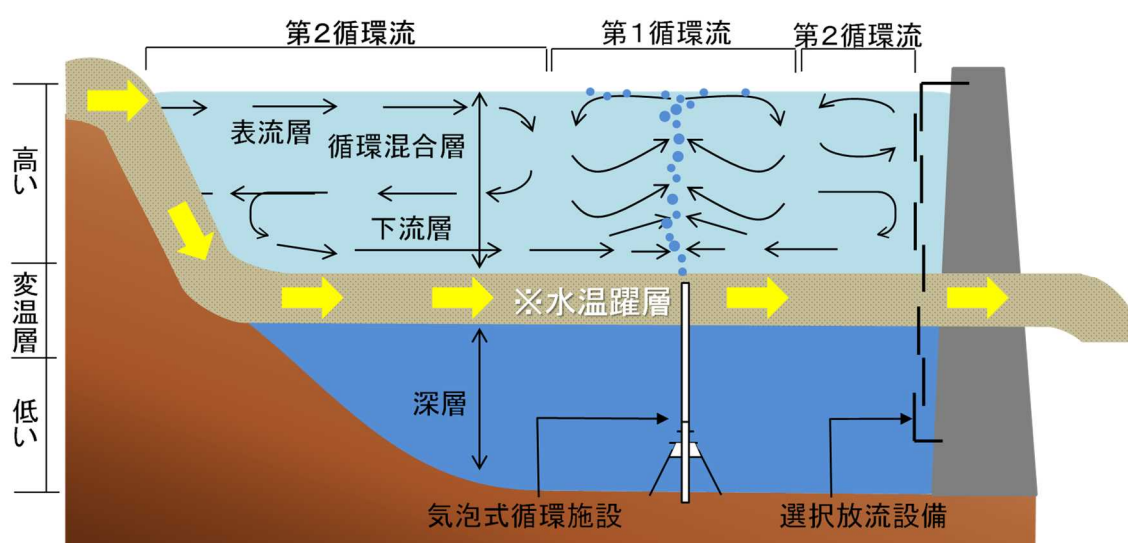


図 4.7 流動制御操作の事例（三春ダム WEB サイト²⁾を参考に図化）

【4 章の参考文献】

- 1) ダム貯水池水質改善の手引き：国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 30 年 3 月
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf2/damtyosuichisuisitukaizentebikiH30.pdf
- 2) 三春ダムの仕事 - 水質保全：三春ダムホームページ
<http://www.thr.mlit.go.jp/miharu/introduction/work/maintenance.html>

5. 資料編

5-1. 藍藻類の生理生態に関する知見

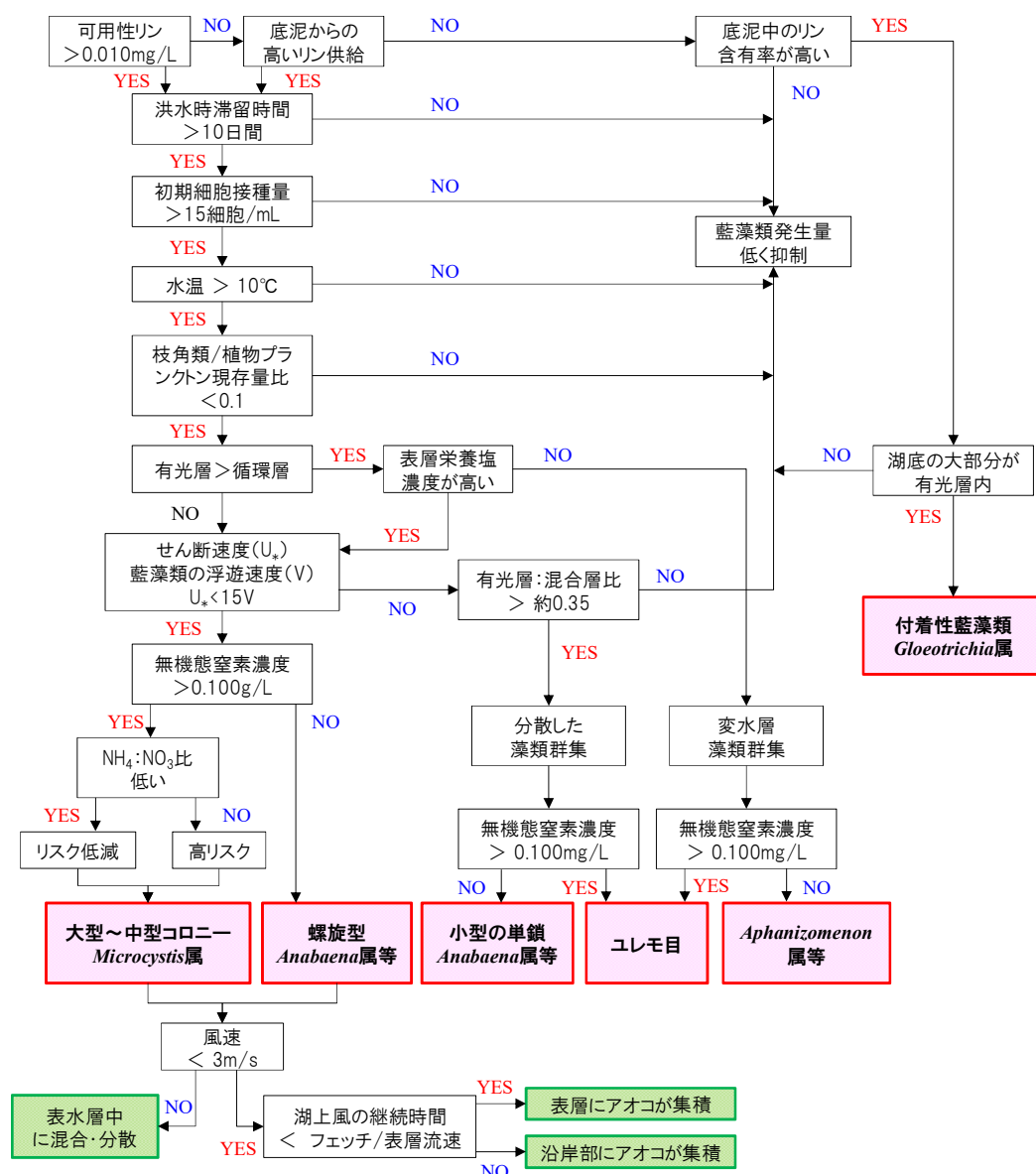
5-1-1. 環境要因と出現藻類種との関係に関する知見

藍藻類の寡占的発生には、リン・窒素に代表される栄養塩の存在が必要不可欠であるが、その他にも貯水池内の特定の物理化学的な環境条件も関連していることが知られているがこれらの関係性は複雑である。Oliver と Ganf は¹⁾、アオコを形成する藍藻類の出現と環境要因との関係に関する論文を総括し、フローチャートに取りまとめた(図 5.1)。以下に参考文献 1) に示された内容から特徴的な事項を挙げる。

- ・アオコ形成藍藻類がその他の藻類よりも高温を好むという仮説を裏付ける証拠はない。ただし、*Microcystis* 属に関しては、8~12℃未満で炭水化物の代謝が低下し、浮力調整に影響を及ぼすことは確かである。
- ・藍藻類とその他の藻類とでリンの動態(摂取~保存機構)に系統的な違いはないようである。ただし、一部の藍藻類は大量のリンを保持できるが、*Microcystis* 属と *Gloeotrichia* 属に関しては、リンの保持が可能となるような行動的機能を有している点に他の藍藻類と違いがあるようである。
- ・藍藻類の増殖には主に可用性リンが利用される。このため、リンの減少に対する藍藻類の一般的な反応は、バイオマスの低下である。ただし、その応答の仕方は、リンの内部負荷と永続的な外部負荷の大きさに依存する。初期のリンの内部負荷がある値以上だと、リンが枯渇することへの影響はごく僅かであり、反応が現れるのに何年ものかかる場合がある。一方、成長期のリン濃度が 0.01mg/L 以下となるリン制限となると、バイオマスは大幅な減少を起こす。
- ・藍藻類が利用できる無機態窒素の供給源の違いは、優占種化に影響を与える可能性がある。窒素固定能を持たない藍藻類は、水中の硝酸態窒素等が欠乏すると、窒素固定能を有する藍藻類に優占種を取って代わられる。この窒素固定能は、異質細胞を持つ藍藻類特有の性能であり、無機態窒素濃度が 0.06mg/L 以下になると明確な違いを表すとの報告もある。
- ・藍藻類がその他の藻類よりも低濃度の無機態窒素を利用できるという説があるが、これを支持するデータは見当たらない。より詳細な研究が必要である。
- ・T-N/T-P 比が藍藻類の発生種に大きく影響することはない。ただし、T-N/T-P 比が低く無機態窒素が制限された状態では、窒素固定能を有する *Anabaena* 属等が優勢になる可能性がある。一方、T-N/T-P 比が高い状態では、*Gloeotrichia* 属が優勢になる可能性があるが、この場合はリン負荷量が増殖の上限を決める。
- ・藍藻類の個体数が十分に小さい場合、水面摩擦(湖面付近の風と湖面との間に生じる摩擦)によって藍藻類の個体数を減らすことができるが、効果的な水面摩擦が生じる前に

藍藻類が集積して群体サイズが大きくなると、その効果は減少する。

なお、本文献で提案されているフローチャートは、環境要因と藍藻類発生の相互作用を図化したものであり、藍藻類の発生を予測するための決定的なツールではないと注意書きされている。



【図内用語解説】

- 可用性リン : 藻類がそのまま摂取し増殖に利用できる形態のリン 主にリン酸態リン(P₀₄-P)を指す
- 初期細胞接種量 : 底泥から回帰する植物プランクトンの密度
- 枝角類/植物プランクトン現存量比 : 水中での枝角類(ミジンコ等)と植物プランクトンの存在量の比
- コロニー : *Microcystis* 属 1 群体が形成する細胞の集まり
- 螺旋型/単鎖 : *Anabaena* 属の形態的特徴の違いを表す 螺旋型は 1 糸状体が螺旋を形成したタイプであり、単鎖は 1 糸状体が真っ直ぐになったタイプ

図 5.1 藍藻類の発生に影響し出現藻類種を決定する特徴的な環境特性をまとめたフローチャート
(参考文献 1)に掲載されている図を翻訳したもの)

5-1-2. 藍藻類の群体サイズと浮沈回数との関係に関する知見

浮力調節能力は、他の植物プランクトンとの競争において大きな利点となるため、藍藻類はその利点を生かすため1日の中で浮沈を繰り返すことが知られている。Murらによると²⁾、*Microcystis* 属のコロニー直径が $20\ \mu\text{m}$ 未満の場合は殆ど移動せず、直径が $160\ \mu\text{m}$ 未満のコロニーは1日あたり1回未満の移動しかせず、直径 $1,600\ \mu\text{m}$ までのコロニーは深さ $10\ \text{m}$ まで移動し、1日に3回表面に戻る事ができるとされている(図 5.2)。

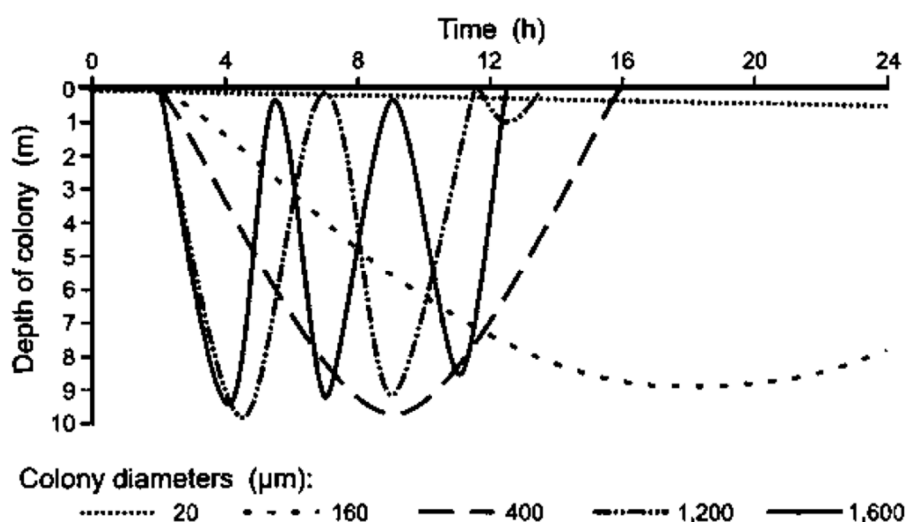


図 5.2 浮力調節による *Microcystis aeruginosa* の垂直方向の動きに対する群体サイズの影響
(参考文献 2)に掲載されている図より引用)

5-1-3. 藍藻類の種の違いと温度依存性の関係に関する知見

藻類綱が違えば増殖に適した温度が異なることは一般的によく知られているが、同じ藍藻類の中の種の違いにより温度依存性が異なることはあまり知られていない。今井らは、フィールド実験と室内実験により、2種の *Microcystis* 属 (*M. aeruginosa* と *M. wesenbergii*) が遷移する際の水温の影響について調べた³⁾。その結果、得られた知見は以下の通りであった(図 5.3 及び図 5.4)。

- ・ *M. aeruginosa* は6月と8月から10月上旬に多く確認され、*M. wesenbergii* は7月と10月下旬から11月の間に多く確認された。
- ・ *M. aeruginosa* が多く確認された時の水温 ($24.7\sim 33.9^{\circ}\text{C}$) は、*M. wesenbergii* が多く確認された時の水温 ($19.6\sim 28.6^{\circ}\text{C}$) よりも高かった。
- ・ 2種の *Microcystis* 属を様々な温度条件で培養した室内実験では、高温下 (30°C 及び 35°C) での増殖速度は、*M. aeruginosa* のほうが *M. wesenbergii* よりも優位に高かったが、低温下 (20°C 及び 25°C) での増殖速度は、両種で違いが認められなかった。
- ・ 以上の結果から、夏季の水温変化は *Microcystis* 属が種の遷移を行いながら連続的に優

占種化するための重要な環境要因である可能性が示唆された。

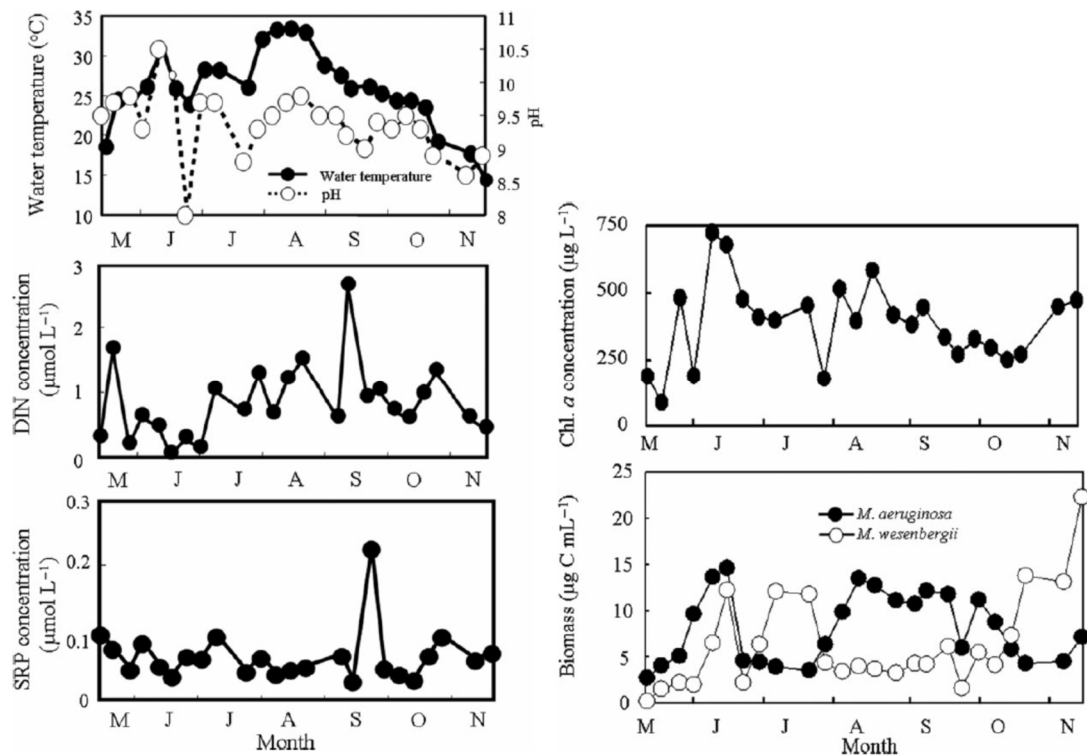


図 5.3 実験時の *M. aeruginosa* と *M. wesenbergii* の出現状況と水質変化

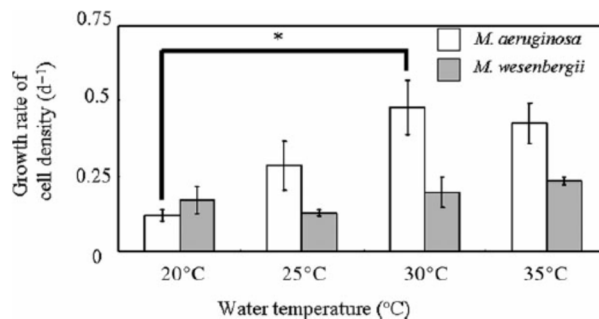


図 5.4 室内実験における *M. aeruginosa* と *M. wesenbergii* の増殖速度の違い

5-1-4. 藻類種と好適水温の関係に関する知見

三春ダムでは、管理開始から定期水質調査において植物プランクトン調査を継続して実施してきた。調査時の表層水温と出現藻類種との関係を整理すると、藻類種毎に好適な水温が明確に違うことが明らかになった (図 5.5)。

- ・珪藻類は幅広い水温帯での発生が確認されているが、藍藻類は 22°C～27°Cの間で種によりそれぞれ明確なピークを持った発生状況が確認された。
- ・特に *Microcystis* 属と *Aphanizomenon* 属は 25°C～26°Cと比較的高い水温帯にピークを持つものに対して、*Dolichospermum* 属は 22°Cとやや低い水温帯にピークを持っていた。

- ・ *Phormidium* 属は、*Microcystis* 属や *Aphanizomenon* 属に近い水温帯にピークを持っているが、これは確認された *Phormidium* 属が *Microcystis* 属の寒天質に付着するタイプ (*P.mucicola*) であったためである。

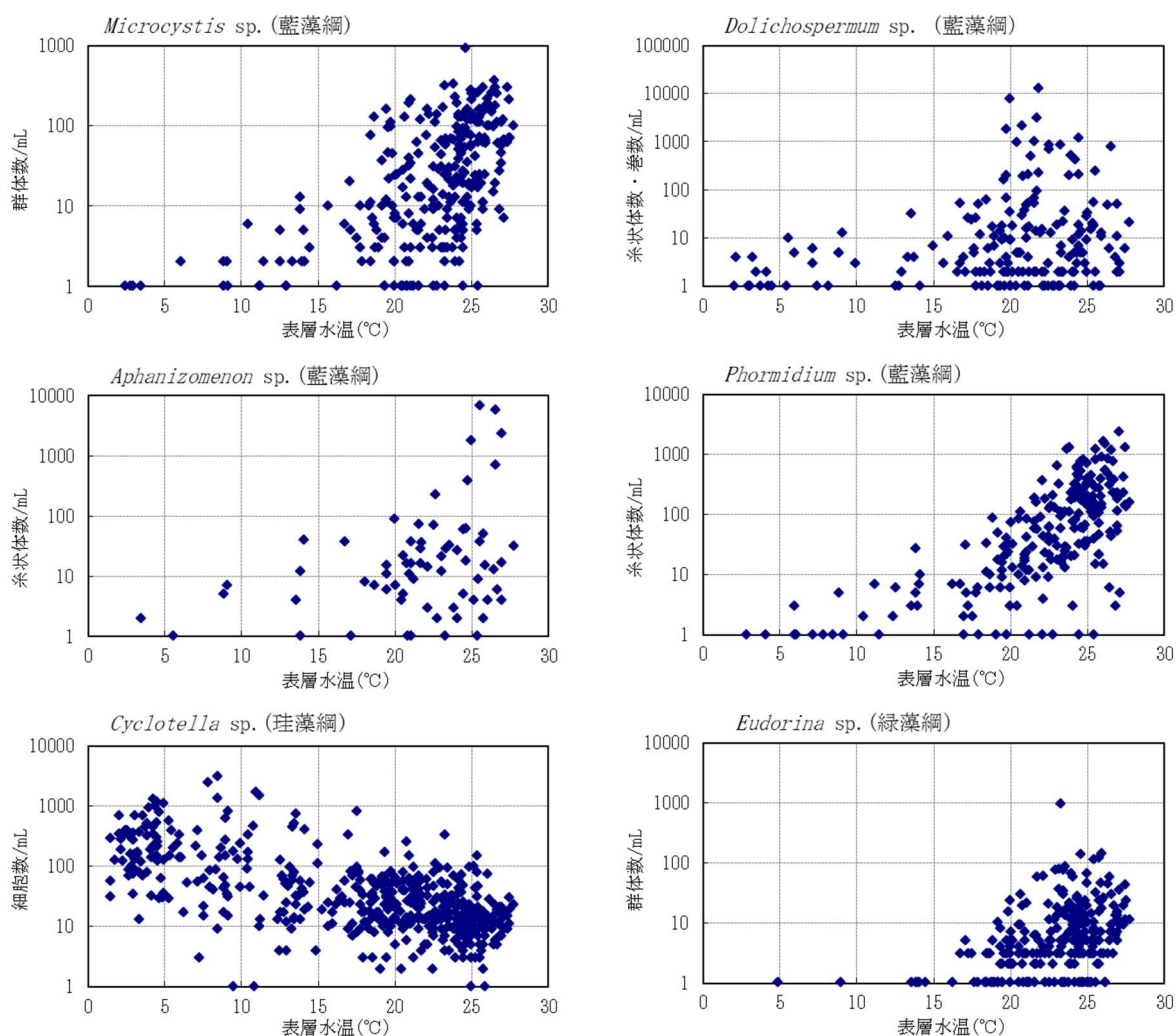


図 5.5 三春ダムにおける表層水温と藻類存在量との関係（藻類種別整理）

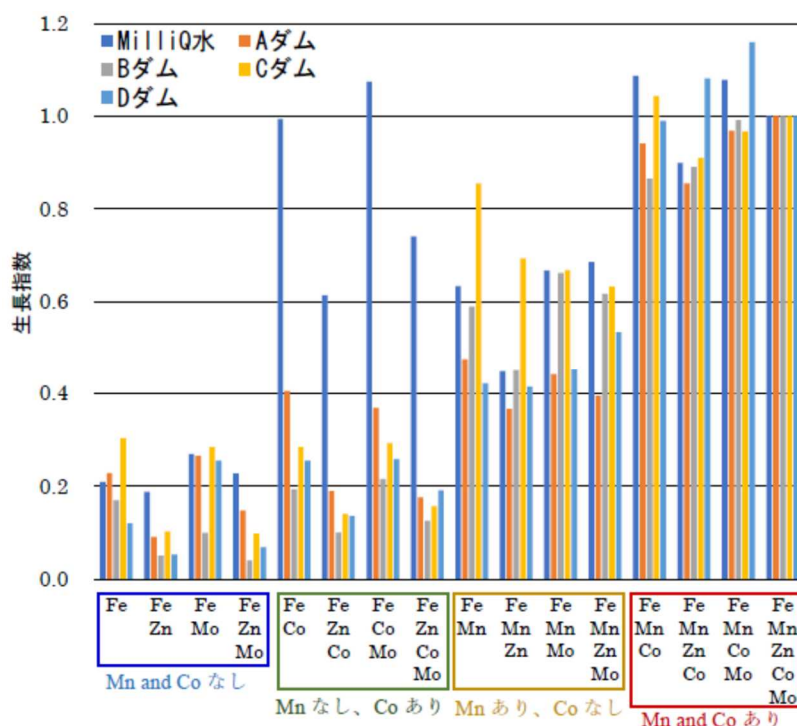
5-1-5. 藍藻類の増殖に影響する微量金属の存在に関する知見

近年、アオコ発生の原因となる藍藻類の生長に関して、鉄やマンガン等の微量金属の存在が重要であることが報告されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また、*Microcystis aeruginosa* を用いた研究においても、鉄やマンガン、コバルトが含まれる培地で生長が促進された事例が報告されている。気泡式循環により、藍藻類の生長に必要な 2 価の溶存態鉄が 3 価の鉄に酸化されて溶解度が下がるため、藍藻類は生長に必要な鉄を取り込むことができず、生長が抑制される一因となる可能性が考えられる。

例えば、小川らはダム貯水池の湖水をもとに 5 種類の微量金属 (Fe, Mn, Zn, Mo, Co) を添加し

た 32 種類の培地を用いて *Microcystis aeruginosa* の生長試験(室内実験)を行い、微量金属が *Microcystis aeruginosa* の生長に与える影響を調べた。その結果、以下の結果が得られたと報告している(図 5.6)。

- Fe,Mn,Co は、*Microcystis aeruginosa* の生長に対して制限物質となることが示唆された。
- Zn は、*Microcystis aeruginosa* の生長を阻害する効果があることが示唆された。



※図中 MilliQ 水：水道水を超純水製造装置(Merck 製)により生成した超純水

図 5.6 小川らによる微量金属を添加した生長試験の結果(参考文献 4)より引用)

5-1-6. 藍藻類の浮沈速度と体積に関する知見

植物プランクトンは、水の流れや自らの偽空胞を用いて水中で浮沈を繰り返すが、その速度は単位当たりの藻類体積と関係があることが知られている。Reynolds は自身の著書⁷⁾の中で、植物プランクトンの種類による浮沈速度の違いや浮沈速度と体積に関して以下のように述べている(図 5.7)。

- 珪藻類の沈降速度は、 $1\mu\text{m/s}$ ～ 6mm/s の範囲である。
- *Anabaena* 属や *Aphanizomenon* 属等の糸状体の藍藻類の浮遊速度は、 $40\sim 60\mu\text{m/s}$ に達する可能性がある。
- *Gloeotrichia* 属や *Microcystis* 属のようなコロニーを形成する藍藻類の浮遊速度は、 $100\sim 300\mu\text{m/s}$ に達する可能性がある。
- *Ceratium* 属や *Peridinium* 属のような鞭毛による運動性能を持つ渦鞭毛藻類の遊泳速度は、

3~30 $\mu\text{m/s}$ の範囲である。

- *Volvox* 属等の大きなコロニーを形成する緑藻類の浮遊速度は、凡そ 1mm/s である。
- 単位当たりの生体積の小さい藻類は浮沈速度が遅く、大きい藻類は浮沈速度が速い。これは、沈降に関してはストークスの法則(河川や湖沼・貯水池における懸濁物質の沈降速度を求める際の式)⁷⁾が関係し、浮上に関しては細胞内の偽空胞の数が影響しているものと考えられる。
- ただし、この浮沈速度を持っても、湖水の潜り込みのような強い流れには逆えず、こういった流れに対抗するためには、鞭毛による遊泳が必要である。

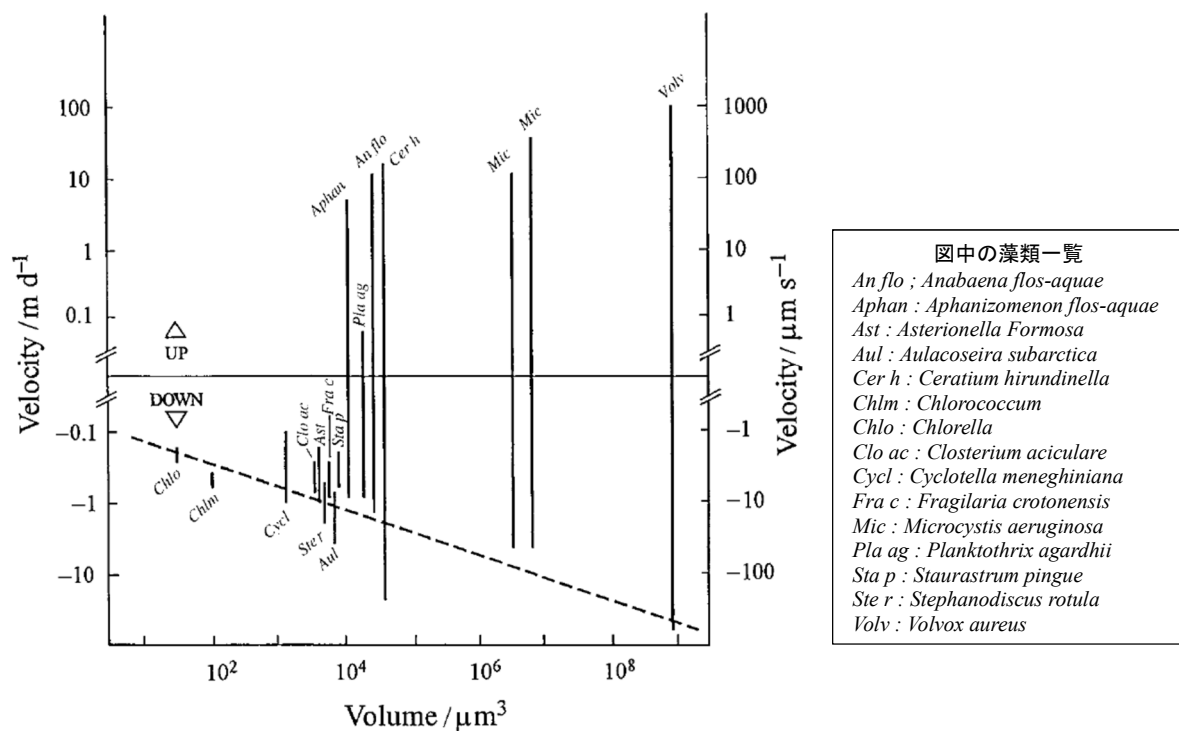


図 5.7 単位当たり体積と淡水性植物プランクトンの浮沈速度の関係

5-1-7. 光強度と増殖速度の関係に関する知見

植物プランクトンの増殖速度は、種により異なることが知られているが、その要因の一つとして光要求性の違いが挙げられる。Reynolds は自身の著書⁸⁾の中で、20℃に管理された培地において光強度を変えて、光強度の違いによる増殖速度の変化を色々な植物プランクトンについて整理した結果を示している (図 5.8)。

これによると、平均光量子束密度が非常に小さい場合を除き、光量子束密度と増殖速度は線形的な関係ではないという結果が得られた。また、珪藻類や緑藻類や一部の藍藻類 (*Anabaena* 属、*Aphanizomenon* 属、*Limnothrix* 属等) は光量子束密度の低下により増殖速度が低下するのに対して、*Microcystis* 属は前記の藻類と比べて潜在的に小さいものの、光量子束

密度の低下に伴う増殖速度の低下が殆どなく、光強度が大幅に低下しても一定の増殖を保つことができるという結果が得られた。

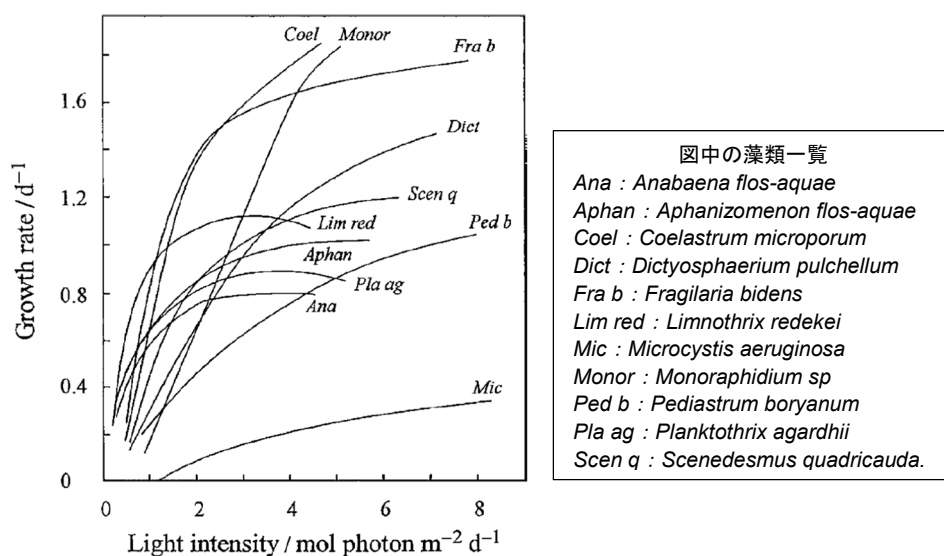


図 5.8 淡水性植物プランクトンの 20°Cにおける増殖速度と光強度との関係

また、Liere と Mur は、藍藻類と他の植物プランクトンとの間の競争について実証実験を行い、以下の結論を得ている⁹⁾。

- ・緑藻類 (*Scenedesmus protuberans*) は光強度が高いと増殖速度が速くなるのに対し、藍藻類 (*Planktothrix agardhii*) は光強度が低いと増殖速度が速くなる (図 5.9 及び図 5.10)。
- ・低光強度の連続培養では、*Planktothrix agardhii* は *Scenedesmus protuberans* を凌駕していた (図 5.9)。
- ・光強度が高い場合、緑藻類のバイオマスが急激に増加し、濁度が上昇し、光の利用可能性が低下した。これにより、藍藻類の増殖速度が上昇し、20 日後には藍藻類が優勢となった (図 5.10)。
- ・藍藻は緑藻類の最大増殖率には達しないが、光量が非常に少ない水域では増殖率が高くなる。そのため、濁度の高い水域では他の生物種と競合する可能性が高い。
- ・これは、非常に貧弱な栄養状態で成長することができる藍藻類が、栄養価の高い富栄養水域でしばしばブルーム(植物プランクトンが大量に発生し、花が咲いたように色づいた状態)を発生させる理由を説明することができる。

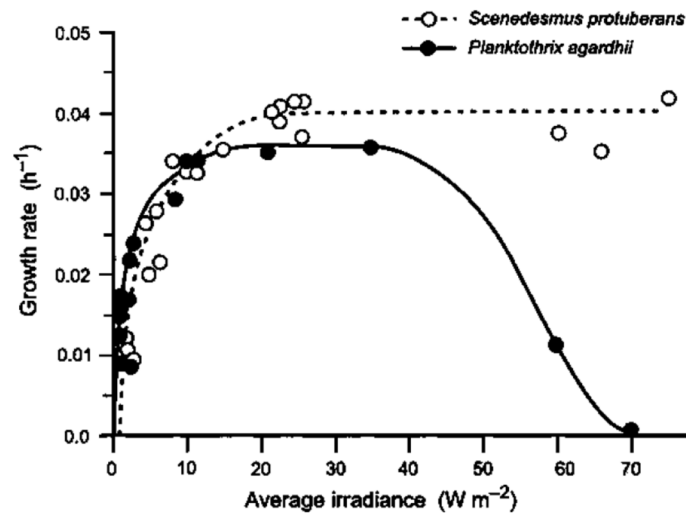


図 5.9 藍藻類と緑藻類の光の競合(連続照明での平均光強度と増殖速度との関数)

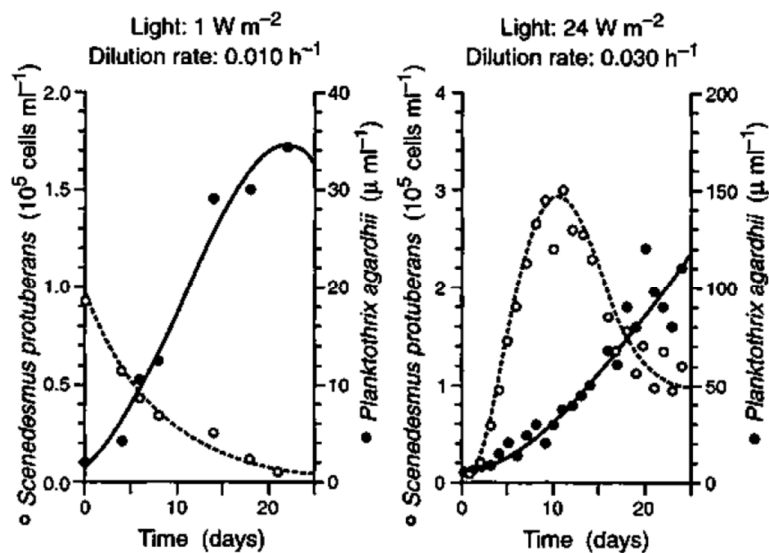


図 5.10 藍藻類と緑藻類の光の競合

(光強度と希釈率を変えて連続培養した場合の増殖状況の違い)

5-1-8. 国立環境研究所における藍藻類に関する研究

国立環境研究所では、藍藻類の研究が長期的に実施されている。その研究成果は、年報や関連刊行物として以下の WEB サイトで公開されており、重要な参考資料になると考えられる。本マニュアルを作成するにあたり収集した研究成果を以下にテーマ別で示す。

<参考 WEB サイト>

国立環境研究所年報：

当該年度の研究成果の概要、各種主要施設の利用状況、研究業績一覧、その他業務に関連した資料等を掲載した研究所の年報

URL：<https://www.nies.go.jp/kanko/nenpo/index.html>

国立環境研究所研究報告：

研究業務の成果物（特定の研究課題に関する成果と研究データ集）及び研究シンポジウム・セミナーの予稿集・報告書等

URL：<https://www.nies.go.jp/kanko/kenkyu/index.html>

地球儀：

国立環境研究所が実施している研究の中から、重要で興味ある成果の得られた研究を選び、分かりやすくリライトした研究情報誌

URL：<https://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

テーマ	アオコ異常発生機構の解明（培養試験による生理・生化学的研究）
研究年報	1) 湖沼の富栄養化による藻類の異常発生機構の生理・生化学的研究:S51 (p54) 2) 湖沼の富栄養化による藻類の異常発生機構の生理・生化学的研究:S52 (p121) 3) 湖沼の富栄養化による藻類の異常発生機構の生理・生化学的研究:S53 (p129) 4) マイクロコズムにおけるラン藻類の培養に関する基礎的研究:S63(p66)
関連刊行物	Microcystis(藍藻類)の増殖特性(研究報告 第25号) 藻類の培養試験法によるAGPの測定(研究報告 第26号) アオコの増殖及び分解に関する研究(研究報告 第52号) アオコの実像ーシアノバクテリア遺伝子研究からわかることー(環境儀 No.73)

テーマ	アオコ異常発生機構の解明（野外での実地観測、季節動態）
研究年報	1) 陸水域の富栄養化に関する総合研究:S54 (P27) 2) 動植物プランクトンの増殖制限要因の解析」S55 (p90) 3) 湖の生態系における物質循環の研究」S56 (P42)
関連刊行物	陸水域の富栄養化に関する総合研究(公害研究所報告) 湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究(研究報告 第23号) 霞ヶ浦臨湖実験施設研究報告集-12-(研究報告 第138号)

テーマ	アオコの毒性に関する調査研究
研究年報	1) 湖沼におけるアオコの発生と毒性に関する緊急調査:S59 p114 2) 毒性物質を生産する藻類の発生と制御に関する研究:S61 p93 3) 毒性物質を生産する藻類の発生と制御に関する研究:S62 p37 4) 富栄養湖における有害藻類の発生機構とその挙動に関する基礎的研究 :S63 p75 5) 水界生態系におけるアオコ由来有毒汚染物質の挙動に関する研究:H 元 p72 6) 有毒アオコが生産する毒物質の標識化とその生体影響作用機構に関する研究 :H2 p76 7) 有毒アオコが生産する毒物質の標識化とその生体影響作用機構に関する研究 :H3 p74 8) 有毒アオコが生産する毒物質の標識化とその生体影響作用機構に関する研究 :H4 p59 9) 遺伝子資源としての環境微生物の保存と機能評価に関する研究:H4 p18 10) 有毒アオコが生産する毒物質の標識化とその生体影響作用機構に関する研究 :H5 p65 11) アオコが生産する毒物質, ミクロシチンの湖沼生態系における挙動に関する研究 :H8 p149 12) 富栄養湖沼における藻類毒の挙動に関する研究:H8 p42 13) 富栄養湖沼における藻類毒の挙動に関する研究:H9 p158 14) 富栄養湖沼における藻類毒の挙動に関する研究:H10 p47
関連 刊行物	アオコの有毒物質を探る(環境儀 52)

テーマ	他生物との関係
研究年報	1) 水界生態系における環境汚染物質の動態に関する研究 : 国立公害研究所年報 S62 p64 2) 動物プランクトン群集と水の華形成藻類の関係:H 元 p66 3) 生物・物理・化学的手法を活用した污水及び汚泥処理に関する研究:H2 p29 4) 生物・物理・化学的手法を活用した污水及び汚泥処理に関する研究:H3 p31 5) 生物・物理・化学的手法を活用した污水及び汚泥処理に関する研究:H4 p26 6) 生物・物理・化学的手法を活用した污水一及び汚泥処理に関する研究:H5 p27 7) 生物・物理・化学的手法を活用した污水一及び汚泥処理に関する研究:H6 p13 8) 生活排水, 汚濁湖沼水等の有用生物を活用した水質改善技術の開発と高度化及びその評価に関する研究 :H7 p149 9) 富栄養化湖沼における藍藻溶解性細菌類の検出手法の開発:H11 p194 10) 核酸プローブを用いたハイブリダイゼーション法による藍藻類付着細菌の解明 :H12 p185
関連 刊行物	アオコの増殖及び分解に関する研究(研究報告 第 52 号) 湖沼のエコシステムー 持続可能な利用と保全をめざして ー(環境儀 No.9)

テーマ	海外の湖沼における調査研究
研究年報	1)日本およびヨーロッパの富栄養化水域に発生する糸状藍藻類の新規毒素の構造と毒性:H8 p141 2)アジア地域の微生物研究ネットワークに関する研究:H8 p141 3)日本及びヨーロッパの富栄養化水域に発生する糸状藍藻類の新規毒素の構造と毒性 :H9 p177 4)国際共同研究(多国間型):H9 p158 5)国際共同研究(二国間型):H9 p154 6)富栄養化湖沼における藍藻溶解性細菌類の多様性に関する研究(奨励研究 A):H9 p48 7)バイオエコシステムを導入した中国貴州省紅楓湖, 百花湖流域における 富栄養化抑制技術の開発に関する研究:H12 p171 8)富栄養化湖沼における藍藻溶解性細菌類の検出手法の開発:H12 p183 9)アジアにおける水資源域の水質評価と有毒アオコ発生モニタリング手法の 開発に関する研究:H15 p231
関連 刊行物	—

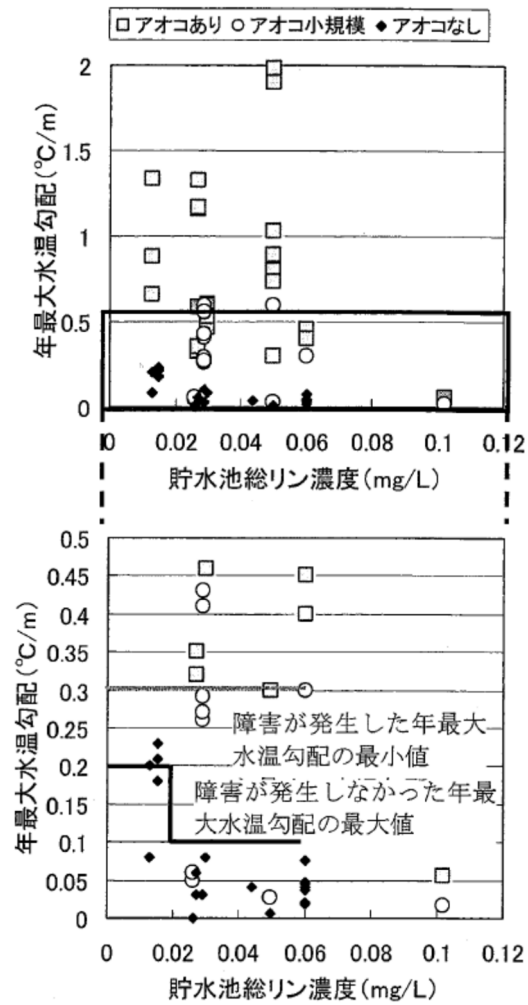
テーマ	新たな展開_生態工学的視点
研究年報	1)藻類群集におよぼす紫外線の影響:H12 p41 2)ため池と その周辺環境を含む地域生態系の水循環と 公益的機能の評価 :H16 p176 3)ため池と その周辺環境を含む地域生態系の水循環と公益的機能の評価:H18 p81 4)湖沼における溶存鉄の存在形態分析 と鉄利用性がアオコ発生に及ぼす影響 :H18 p154 5)「植物プランクトンの枯死に伴うリン化合物溶出モデル」の構築とインパクト予測 :H26 p220
関連 刊行物	ため池の評価と保全への取り組み(研究報告第 183 号)

5-2. 気泡式循環施設による水質改善効果発現状況の違いに関する知見

気泡式循環施設を導入したダム貯水池において、水質改善効果（アオコの縮減、カビ臭問題の解消等）が現れる場合と現れない場合がある。その要因としては、気泡式循環施設の機能不足や運用方法の不適合等が考えられるが、これらを統一的な視点で整理した事例は多くない。

今本らは、アオコ・カビ臭等の水質障害が発生し、その対応に苦慮していた9つのダム貯水池において気泡式循環施設を設置し、その後の水質改善効果の表れ方を追跡調査した¹⁰⁾。その結果、アオコの主な原因藻類である *Microcystis* 属は細胞密度が低下し、アオコ障害が抑制されたが、カビ臭の主な原因藻類である *Oscillatoria* 属や *Phormidium* 属については、カビ臭障害が見られなくなったダム貯水池とそうでない貯水池があった。これらの結果から、出現する藍藻類の種類の違いが気泡式循環施設による水質改善効果の発現状況の違いに影響すること、水質レベルの違いにより気泡式循環施設により形成する循環混合状態に違いがあること等の知見が得られたと報告している。詳細は、以下の通りである(図 5.11)。

- ・総リン濃度が 0.06mg/L 以下の中栄養～富栄養湖では、気泡式循環施設により *Microcystis* 属によるアオコ障害を抑制する効果があることがわかった。
- ・ *Anabaena* 属についても所定の循環能力が確保されれば、抑制効果があるものと推察された。
- ・一方、*Oscillatoria* 属や *Phormidium* 属については、抑制効果が見られるケースと見られないケースがあった。
- ・総リン濃度が 0.1mg/L 以上の過栄養湖では、気泡式循環施設により *Microcystis* 属の細胞数は低下するものの、アオコ抑制には至らないことが示唆された。
- ・貯水池総リン濃度が 0.02mg/L 未満の場合は、年最大水温勾配が 0.2℃/m 未満の状態を維持できれば、アオコ障害抑制の可能性が高いことが示された。
- ・貯水池総リン濃度が 0.02～0.06mg/L の場合は、年最大水温勾配が 0.1℃/m 未満の状態を維持できれば、アオコ障害抑制の可能性が高いことが示された。



※アオコ小規模：貯水池に占めるアオコ発生面積が1%程度の規模で発生した場合
 アオコあり：上記以上のアオコ発生の場合

図 5.11 年最大水温勾配と貯水池総リン濃度及びアオコ発生状況との関係

5-3. 発生要因の推定に関する有益な事例

5-3-1. 灰塚ダムにおける発生メカニズムの推定で示された新たな知見

灰塚ダムでは、当該ダムにおけるアオコ発生メカニズムの推定に際して、当該ダムが位置する地域のダム貯水池の特性を整理し、湛水面積（S）と総貯水容量（V）の関係からアオコの発生しやすい条件を示している（表 5.1）。

本検討によると、貯水池形状を表す指標として「 $S^2 \times V^{-1}$ 」を採用した。この値は貯水池の湛水面積と平均水深の比を表したものであり、この値が大きければ相対的に平均水深が浅く、潜在的に底泥から回帰するアオコが多く存在すると考えた。表 5.1 の結果から、 $S^2 \times V^{-1}$ の値が $1 \times 10^{-1} (m^{-1})$ を超えるダムではアオコが発生する可能性が高いと考えられた。

表 5.1 灰塚ダム周辺地域の貯水池形状指標 ($S^2 \cdot V^{-1}$) とアオコ発生/非発生の関係

種別	ダム名	湛水面積 S(km ²)	総貯水容量 V(千m ³)	$S^2 \cdot V^{-1}$	平均水深(m) V/S
アオコ 発生	苫田ダム	3.30	84,100	1.29E-01	25.5
	八田原ダム	2.61	60,000	1.14E-01	23.0
	灰塚ダム	3.54	52,100	2.41E-01	14.7
	土師ダム	2.80	47,300	1.66E-01	16.9
	弥栄ダム	3.60	112,000	1.16E-01	31.1
	島地川ダム	0.80	20,600	3.11E-02	25.8
	志津見ダム	2.30	50,600	1.05E-01	22.0
アオコ 非発生	温井ダム	1.60	82,000	3.12E-02	51.3
	菅沢ダム	1.10	19,800	6.11E-02	18.0
	殿ダム	0.64	12,400	3.30E-02	19.4
	尾原ダム	2.30	60,800	8.70E-02	26.4

5-3-2. 田瀬ダムの事例

田瀬ダムでは、*Anabaena* 属によるアオコとカビ臭現象が発生し、過去にはダム下流の水道取水に影響を及ぼしたこともあった。田瀬ダムにおけるアオコ・カビ臭の発生メカニズムを推定するため、現地調査と文献整理を行った結果、以下のように結論付けられた。

(1) *Anabaena* 属のアキネートの発芽条件

Anabaena 属アキネートの発芽は、水温上昇と光による刺激によって開始されることが報告されている。*Anabaena* 属の発芽適応可能な温度条件と光条件を既往文献から収集・整理（表 5.2）した結果、温度条件はおおむね 20℃以上としているものが多く、光条件については値の取り方が幅広かった。また、*Anabaena* 属のアキネートは、発芽条件が満たされた直後に発芽するわけではなく、一定の誘導期が必要であることが知られている。*Anabaena* 属

のアキネートの発芽までの誘導期は、良好な光条件ほど短く、光条件が悪化するほど長期化し、全く光が届かない環境では発芽しない。既往文献から光エネルギー(光量子密度)とアキネート発芽誘導時間の関係を整理した(図 5.12)。夏季の晴天時の光量子密度は凡そ $2,000\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であること、光合成可能な最低相対照度が1%であることから、実際に湖底に透過する光量子密度を $20\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度とすると、アキネート発芽誘導時間は凡そ7日程度と推察された。

田瀬ダムにおいて蓄積された調査検討結果から、*Anabaena* 属の発生源に適した底泥環境は、水深が光透過深度である10m以浅で且つ有機物を多く含むシルト質主体の底泥を有する範囲であることが確認されていた。また、光透過深度の水温が 20°C を超過した状態がおおむね1週間継続することで *Anabaena* 属が発芽して水中に回帰し、表層付近に強固な水温躍層が形成されていると他の藻類よりも優位に増殖するものと推察された。

以上のシナリオを整理した結果を図 5.13 に示す。

表 5.2 藍藻類の発芽適応可能な温度条件及び光条件の報告値

条件	種名	発芽適応範囲	文献
温度条件	<i>Anabaena circinalis</i>	$20\text{--}25^{\circ}\text{C}$	Fay, 1988; Baker and Bellifemine, 2000
	<i>Nodularia spumigena</i>	$20\text{--}25^{\circ}\text{C}$	Huber, 1985
	<i>Anabaena ucrainica</i>	$14\text{--}23^{\circ}\text{C}$	Tsujimoto and Okubo, 2003
	<i>Anabaena flos-aquae</i>	$5\text{--}10^{\circ}\text{C}$	Kim et al., 2005
光条件	<i>Anabaena</i> sp.	$6\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Gorzó, 1986
	<i>Anabaena circinalis</i>	$15\text{--}50\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Van Dok and Hart, 1997
	<i>Anabaena flos-aquae</i>	$30\text{--}150\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Kovács et al, 2012
	<i>Cylindrospermopsis</i>	$30\text{--}150\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	"

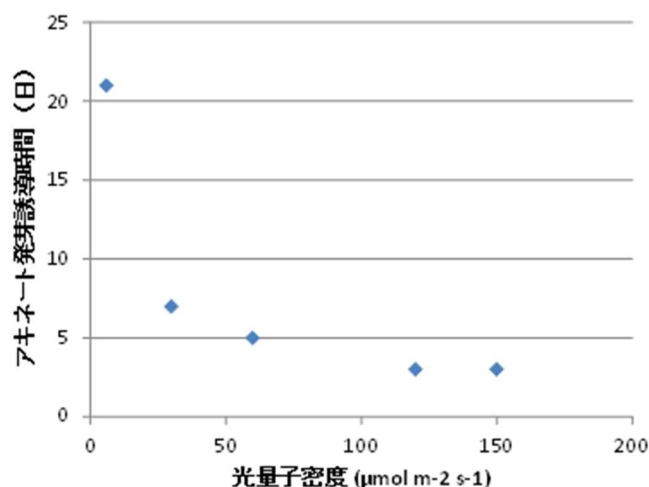


図 5.12 光量子密度と *Anabaena* 属アキネートの発芽時間の関係

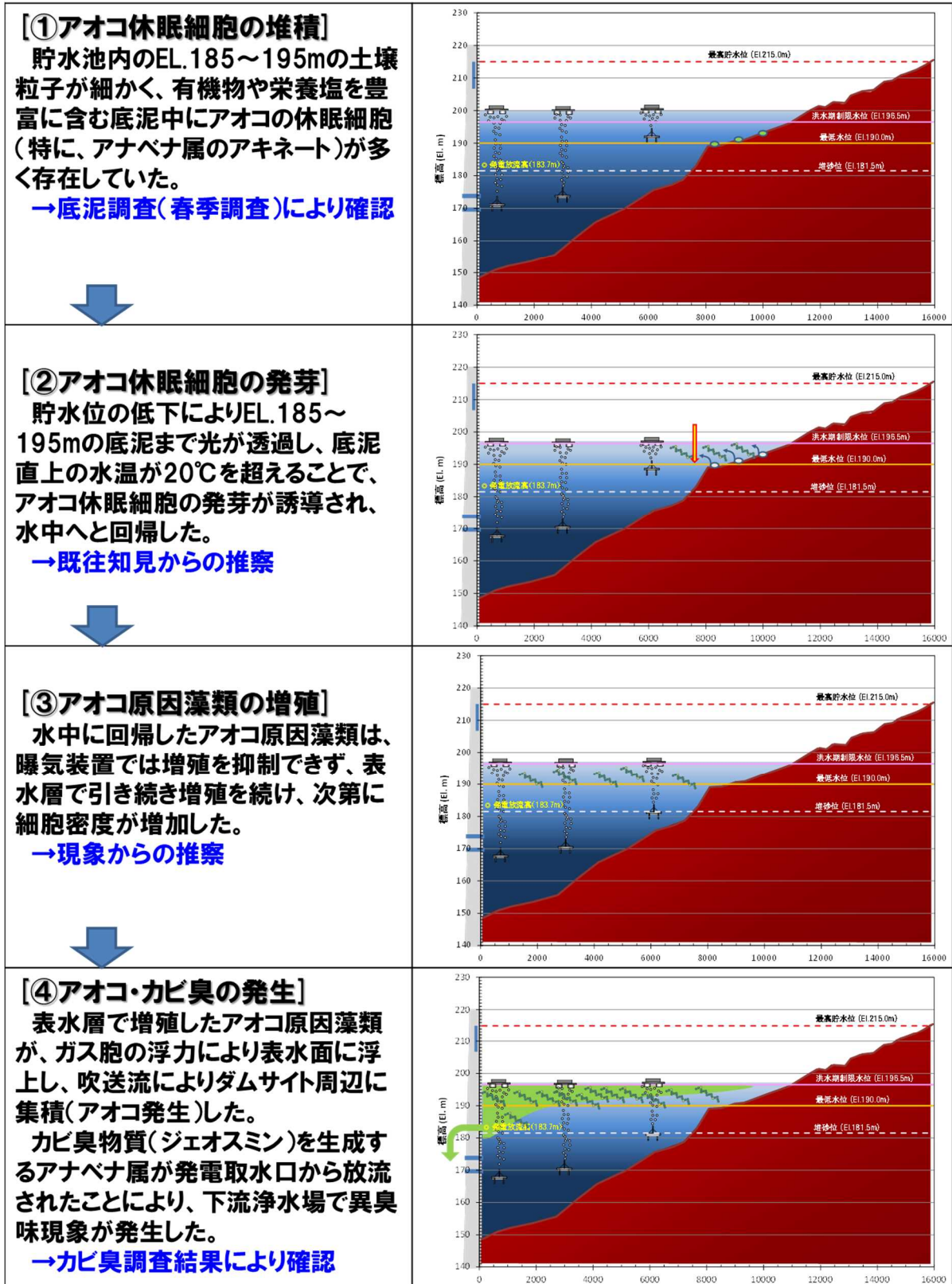


図 5.13 田瀬ダムにおけるアオコ・カビ臭現象発生シナリオの概念図

(2) *Anabaena* 属の増殖適合期間

Anabaena 属アキネートの発芽条件(水深 10m 水温が 20℃以上で 7 日間継続)を満たして発芽した後、貯水池内の水環境が増殖に適合した条件を継続すると、寡占的な増殖を繰り返し、アオコ・カビ臭現象が顕在化する。Tダムでの増殖適合条件を確認するため、一般的に言われる増殖適合条件である「表層水温 20 度以上、水温勾配 0.5℃/m 以上」となった日数を算出し(図 5.14)、その日数とアオコ・カビ臭発生状況とを対比した(表 5.3)。

その結果、田瀬ダムでは定期調査における植物プランクトン調査において藍藻類が第一あるいは第二優占種となった平成 20 年、22 年、23 年、26 年、28 年(特に平成 26 年、28 年はアオコ・カビ臭現象が発生している)は、増殖適合延べ日数(増殖適合条件をクリアした最初の日～最後の日から適合しなかった日を除いた日数)が 30 日を超過していた。逆に増殖適合延べ日数が 30 日を超過しなかった年は顕著なアオコ・カビ臭現象が発生していなかった。

このことから、田瀬ダムではアオコ・カビ臭原因藻類の発芽後、30 日以上の増殖適合期間が確保されるとアオコ・カビ臭が顕在化するものと推察され、水質保全対策は増殖適合期間をこの日数以下に抑えることができる対策を選定することが必要であると考えられた。

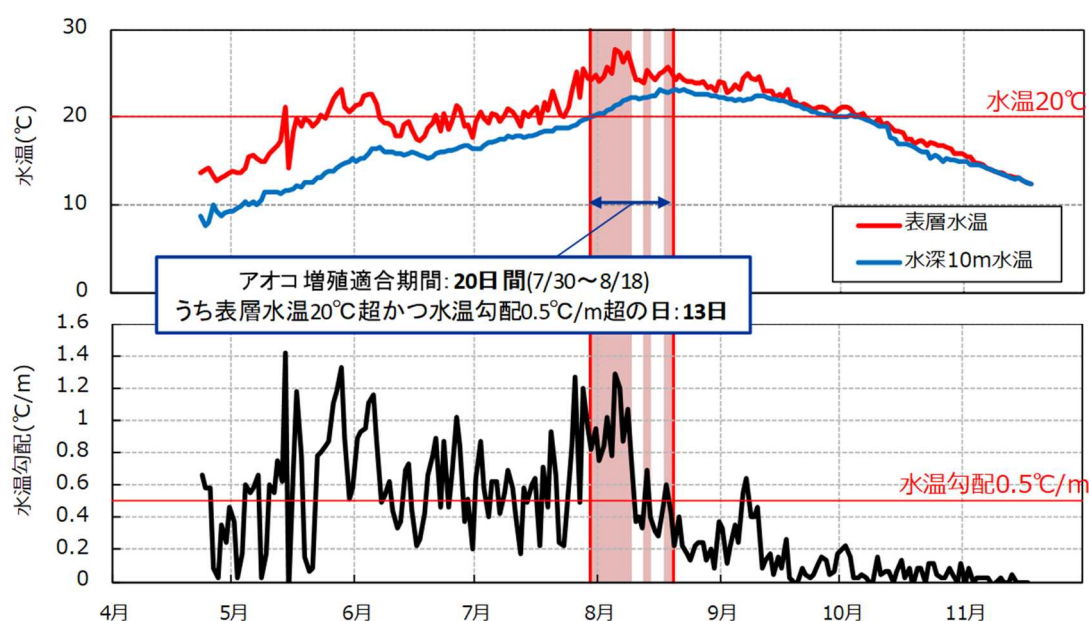


図 5.14 田瀬ダムにおける増殖適合日数の算出例

表 5.3 田瀬ダムにおける平成 20 年～令和元年間の増殖適合日数

とアオコ・カビ臭発生状況との関係

	アオコの増殖に適した期間	アオコの増殖に適した延日数	定期調査でアオコ・カビ臭原因藻類が確認された月						
			6月	7月	8月	9月	10月	11月	
H20	64日	46日	-	●	-	-	-	-	
H21	7日	7日	-	-	-	-	-	-	
H22	52日	47日	-	○	-	-	-	-	
H23	61日	22日以上*			●	△	△		
H24	44日	36日			△	△			
H25	10日	6日			△	△	△		
H26	44日	30日			△	○	△		
H27	17日	17日							
H28	38日	33日				○			
H29	16日	11日							
H30	28日	16日				△			
R1	20日	13日							

- : アオコ・カビ臭原因藻類が第一優占種であった月
 ○ : アオコ・カビ臭原因藻類が第二優占種であった月
 △ : 優占種ではないがアオコ・カビ臭原因藻類が確認された月
 — : 不明 空欄 : アオコ・カビ臭原因藻類不在
 ※ : 平成 23 年は 7/15～8/9 まで水質自動監視装置故障のため水温勾配が算出できなかった。

5-4. 目標設定に係る有益な事例

5-4-1. 三春ダムの事例

三春ダムでは、管理開始当初より *Microcystis* 属や *Anabaena* 属によるアオコ現象が発生し景観障害として認識されていた。この問題への対策として気泡式循環施設をはじめとした複数の水質改善対策を実施し、表 5.4 左に示す水質管理目標値に基づき管理を行っていた。その結果、水質管理目標値は毎年クリアできているものの、アオコの発生は毎年確認されており、目標と実態の乖離が課題となっていた。

三春ダムは、流入栄養塩濃度が高く、完全にアオコ現象を解消することが難しいことから、住民等へのアンケート調査からダム貯水池の湖面景観として許容できるアオコレベルを把握する(図 5.15、図 5.16)とともに、水質シミュレーションを用いて現状の流入水質レベルで水質改善対策を実施した場合に達成可能な水質レベルを試算し(表 5.5)、両者を勘案して湖面景観に対するニーズと水質改善対策により実現可能な水質レベルを踏まえた水質改善目標値へと見直しを行った。

その結果、三春ダムではこれまで使われてきたクロロフィル a 年平均值 25 $\mu\text{g/L}$ 以下に加えて年最大値 30 $\mu\text{g/L}$ を追加することで、夏季のアオコ発生状況为目标値として数値化するとともに、目視でのアオコ発生状況を定量化するためにアオコレベル 3 以下を新たに設定した(表 5.4)。

表 5.4 三春ダムの水質改善目標値の例（左：見直し前／右：見直し後）

項目	水質管理目標	項目	水質管理目標
COD	年平均值 5mg/L 以下	COD	年平均值 5mg/L 以下
クロロフィル a	年平均值 25 $\mu\text{g/L}$ 以下	クロロフィル a	年平均值 25 $\mu\text{g/L}$ 以下 年最大値 30 $\mu\text{g/L}$ 以下
アオコ発生	景観障害の抑制	アオコ発生	アオコレベル 3 以下
異臭味	発生しないこと	異臭味	発生しないこと

〈全調査合計 回答数：212 票〉

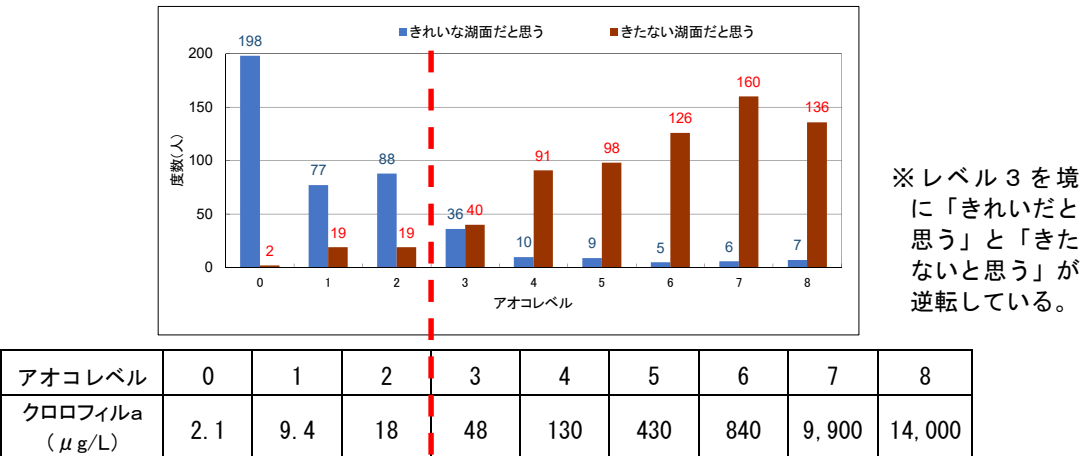


図 5.15 三春ダムにおけるアンケート結果とクロロフィル a の関係

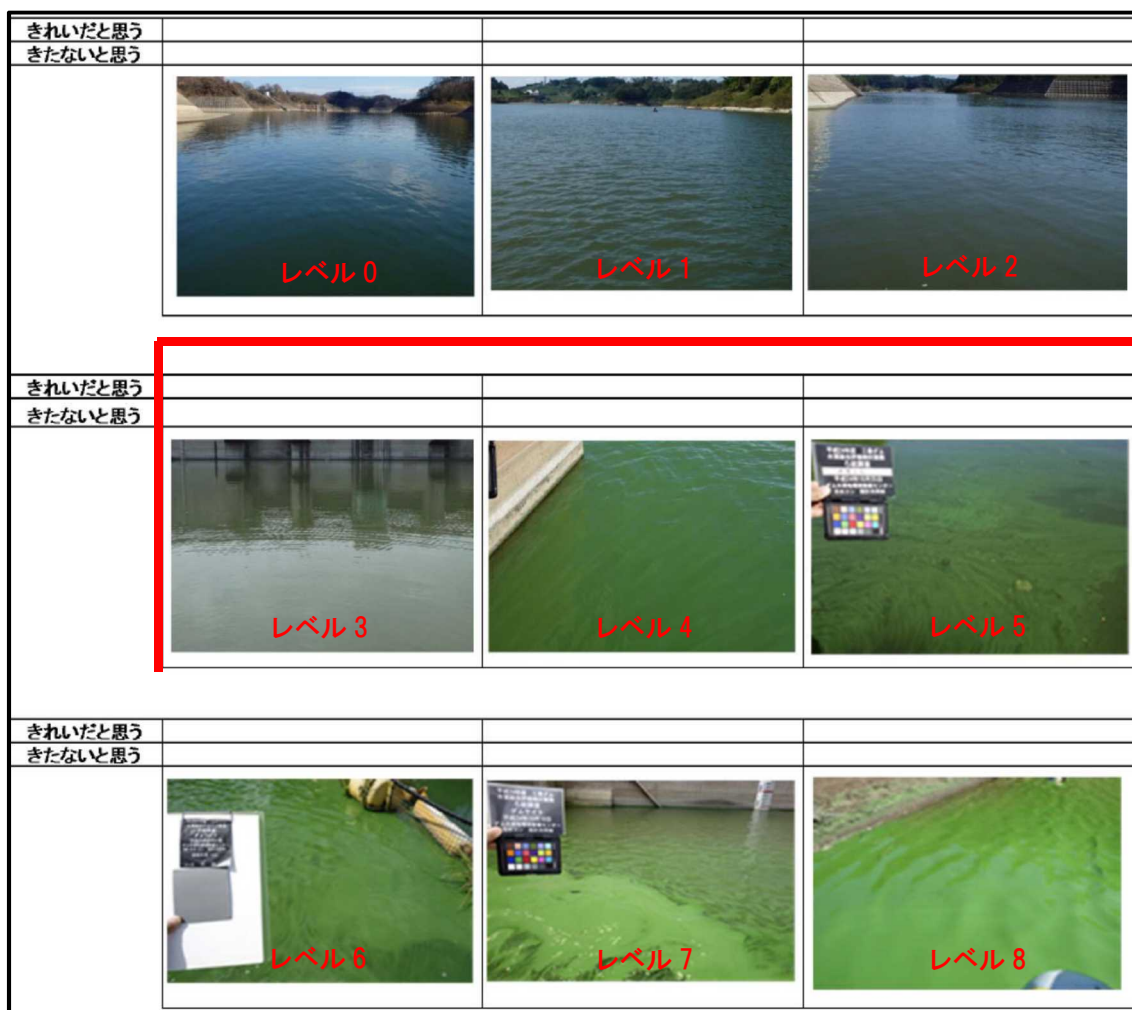


図 5.16 三春ダムで実施したアンケート調査において用いたアオコレベルの写真

表 5.5 三春ダムにおける実現可能な水質改善レベルの予測計算結果一覧

年	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	25($\mu\text{g/L}$) 超過年数	30($\mu\text{g/L}$) 超過年数	35($\mu\text{g/L}$) 超過年数
実測年最大値 ($\mu\text{g/L}$)	56.2	32.7	18.4	37.3	45.9	25.8	48.6	65.4	43.0	19.2	8	7	6
シミュレーション により予測した 年最大値($\mu\text{g/L}$)	28.1	16.4	9.2	18.7	23.0	12.9	24.3	32.7	21.5	9.6	2	1	0

5-4-2. 田瀬ダムの事例

田瀬ダムでは、*Microcystis* 属によるアオコ現象や *Anabaena* 属によるカビ臭現象が発生し景観障害や利水障害が顕在化していた。Tダムにおけるアオコ及びカビ臭現象を抑制するためには、表層クロロフィル a 濃度を $20 \mu\text{g/L}$ 未満に抑制する必要があることが既往の水質調査結果から明らかとなったことから、これを水質管理目標として設定した。

また、この表層クロロフィル a 濃度を達成するためには、気泡式循環施設の運用によってアオコ現象やカビ臭現象の原因となる藍藻類の休眠細胞の発芽後に貯水池内の水環境を「表層水温 20°C 以上且つ水温勾配 0.5°C/m 以上」で表されるアオコ増殖適合の期間を 30 日未満に短縮することが必要であることが既往調査結果から明らかとなったことから、これを水質管理目標を達成するための気泡式循環施設の管理運用目標として設定した(表 5.6)。

表 5.6 田瀬ダムにおける水質保全対策目標・水質管理目標・管理運用目標

水質保全対策目標	田瀬ダム貯水池内での水質変化現象（アオコ・カビ臭）の発生を抑制し、ダム下流河川へのカビ臭障害の影響を抑制する
水質管理目標	貯水池内の水質管理により、田瀬ダム貯水池内 4 地点の表層クロロフィル a 濃度を $20 \mu\text{g/L}$ 未満に抑制する
管理運用目標	気泡式循環施設の適切な運用により、アオコ増殖適合期間(表層水温 20°C 以上且つ水温勾配 0.5°C/m 以上)を 30 日未満に縮減する

5-5. 発生要因の推定～対策選定に係る有益な事例

5-5-1. 野村ダムの対策選定を念頭に置いた発生要因の推定事例

野村ダムでは、*Microcystis* 属によるアオコ現象が発生し景観障害が顕在化していたため、その対応策の検討を行うに際して、アオコ発生メカニズムの推定を行った。その結果、以下の通り整理された(表 5.7)。

- ・野村ダム貯水池は、藻類増殖に必要な栄養塩類や生長促進物質(微量金属、キレート物質等)が十分にあり、藻類増殖ポテンシャルの高い貯水池である。
- ・夏季は日射が強く、生産層(真光層)の水温も 25℃以上となり、藍藻類以外の藻類の増殖には適さない水環境となる。
- ・藻類異常増殖時には、水面付近の溶存態の窒素及びリンは枯渇するが、ガス胞を有する *Microcystis* 属(*Microcystis aeruginosa*)は生産層内を上下移動して窒素及びリンを吸収できる。
- ・アオコの増殖を減速させる要因となるアオコを捕食する大型の魚介類や競合する水生植物が生息していない。

表 5.7 野村ダムにおけるアオコ発生メカニズムの整理表

要因				要因とメカニズム	Nダム貯水池との関連性
加速 要因	栄養塩類	溶存態窒素	アンモニア態窒素(NH ₄ -N) 硝酸態窒素(NO ₃ -N)	光合成の窒素源としてアンモニア態窒素、硝酸態窒素を吸収する。	生活雑排水、農業排水や畜産処理水の流入もあり、キレート物質は十分に供給されている。
		溶存態リン	オルトリン酸態リン(PO ₄ -P)	光合成のリン源としてオルトリン酸態リンを吸収する。	流入河川(H川)のリン濃度が微増加傾向にある。窒素濃度も高く、横ばい状態で推移している。
	生長促進物質	キレート物質	溶存態有機物 タンバ宇出津の分解物 等	栄養塩類だけではアオコ等の異常増殖は起らない。 鉄、マンガン等の微量金属とこれを収集しやすくするキレート物質の存在で異常増殖を引き起こす。	マイクロキスティスの増殖に必要なこれらの物質は、湖水中に十分に存在する。湖底の堆積物中にも十分な量が存在する。
		微量金属	鉄、マンガン等		異常増殖時、水面付近のこれら物質が枯渇しても、マイクロキスティスはガス胞を利用した鉛直運動によって下の層から吸収していると考えられる。
	水温			15℃以上で増殖を始める。 最適水温25～35℃	夏季(6月～10月)は水面付近の水温は25℃以上となり、アオコの増殖に最適な水温環境となる。
	日射			強光阻害を受けない。	生産層(有光層)の水温も25℃以上である。
減速 要因	捕食生物	魚類	濾食性魚類 ハクレン、コクレン等	アオコを好んで摂食する。	大型濾食性魚類は生息していない。
		動物性 プランクトン	大型枝角類 ダフニア等	アオコを好んで摂食する。	大型枝角類の生息に適していない。 産卵場などの水生植物群落がない。
	競合生物	栄養塩類	緑藻類等	湖水中の栄養塩類や炭酸ガスの吸収においてアオコと競合する。	アオコ異常発生時は生産層の水温が高く、生長に適していない。
			沈水植物 コカナダモ、クロモ等		沈水植物群落が繁茂できる湖辺がほとんどない。
		アレロパシー 物質	沈水植物 ホサギノフサモ等	沈水植物が放出する生理物質がアオコの増殖を抑制する。	

注1) 平成16年度は、湖内対策を中心に検討する。

注2) 流域対策などは平成17年度以降に検討する。

以上を踏まえて、野村ダムにおける水質改善対策の基本を流入汚濁負荷量の削減としつつ、対策効果の発現に相当の時間を要することを勘案し、優先的に実施する当面对策として湖内対策を進めることとした(表 5.8)。

表 5.8 野村ダムにおける総合的な水質改善対策メニュー

環境要因				要因とメカニズム		流域対策メニュー	湖内対策メニュー
加速 要因	栄養塩類	溶存態窒素	アンモニア態窒素 (NH ₄ -N) 硝酸態窒素 (NO ₃ -N)	光合成の窒素源としてアンモニア態窒素、硝酸態窒素を吸収する。		☆流入汚濁負荷量の削減 ◆S市公共下水道の整備 ◆農村下水道の整備 ◆合併処理浄化槽の普及 ◆事業所排水の適正処理 ◆農業排水対策の推進 ◆畜産排水の適正処理 ◆水路浄化施設の設置 ◆山林の適正管理	◆深層曝気(既往対策の継続) 鉄、マンガン、栄養塩類等の湖底溶出量の抑制 ◆フェンス(既設)＋選択取水設備 ◆アオコのコロニーの除去 底泥浚渫
		溶存態リン	オルトリン酸態リン (PO ₄ -P)	光合成のリン源としてオルトリン酸態リンを吸収する。			
	生長促進物質	キレート物質	溶存態有機物 タンパク質出洋の分解物等	栄養塩類だけではアオコ等の異常増殖は起こらない。 鉄、マンガン等の微量金属とこれを収集しやすくするキレート物質の存在で異常増殖を引き起こす。			
		微量金属	鉄、マンガン等				
	水温	15℃以上で増殖を始める。 最適水温25～35℃			—		◆浅層循環 水面の水温低下によるアオコの異常増殖の抑制
日射	強光阻害を受けない。			—	◆浅層循環 鉛直循環流による日射利用制限 アオコ日周鉛直運動の攪乱阻害		
減速 要因	人為的な制御			回収、殺藻、活性低下など	—	◆アオコ回収船など ◆加圧施設(噴水、その他) ◆紫外線照射	
	捕食生物	魚類	濾食性魚類 ハクレン、コクレン等	アオコを好んで摂食する。	—	◆濾食性魚類の放流	
		動物性 プランクトン	大型枝角類 ダフニア等	アオコを好んで摂食する。	—	◆摂食浄化装置の設置 ◇沈水植物帯の創出	
	競合生物	栄養塩類	緑藻類等	湖水中の栄養塩類や炭酸ガスの吸収においてアオコと競合する。	—	◆浅層循環 生産層の水温低下による出現種のコントロール	
			沈水植物 コカナダモ、クロモ等		—	◆沈水植物帯の創出 湖中設置型 湖岸設置型	
アレロパシー物質	沈水植物 ホサギノフサモ等	沈水植物が放出する生理物質がアオコの増殖を抑制する。	—				

湖内対策に関しては、一次抽出により4案(気泡式循環施設／フェンス＋選択取水設備／深層曝気施設／加圧施設)を選定したうえで、水質シミュレーションを用いた比較検討を行い、その結果から①気泡式循環施設の新設(5基)、②選択取水設備の運用変更対策として決定するとともにフェンスの撤去を併せて実施し、①については効果確認を行いながら段階的に整備する方針とした(図 5.17)。

なお、野村ダムでは、①の対策に関して当初は4基の施設導入を行い、その後に3ヶ年の効果確認を実施し、効果確認結果から当初計画の5基設置が適当と判断して施設の追加導入を行っている(図 5.18)。

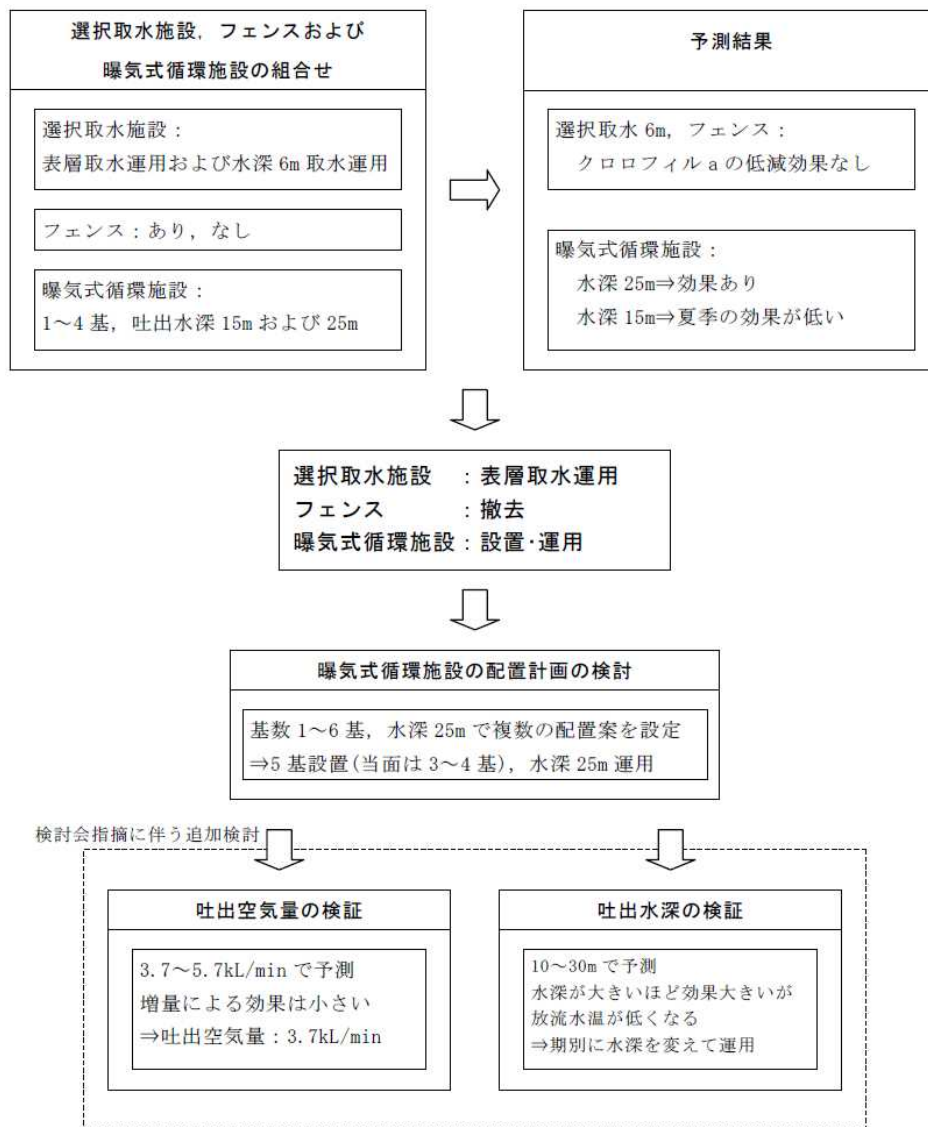


図 5.17 野村ダムにおける水質改善対策検討の流れ

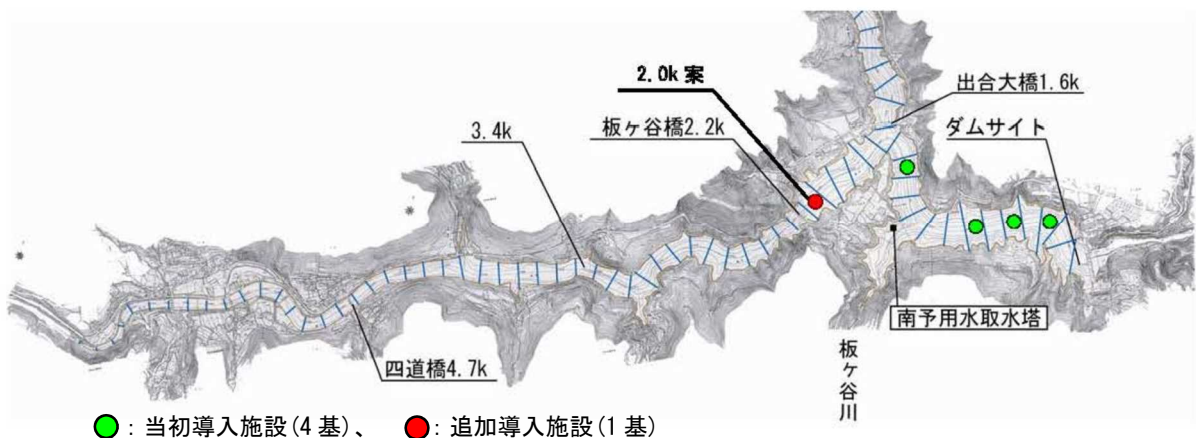


図 5.18 野村ダムにおける気泡式循環施設の段階的導入状況

5-5-2. 釜房ダムにおけるカビ臭発生タイプの分類事例

釜房ダムでは、管理開始当初より *Phormidium* 属によるカビ臭現象が発生し上水道取水に影響を及ぼしており、その対策として空気揚水筒方式の気泡式循環施設が6基導入された。その結果、導入後12年間はカビ臭問題が収束していたが、13年経過後より再びカビ臭現象が発生した。これを受けて、貯水池内の循環混合効果を高めカビ臭発生を抑制することを目的に散気方式の気泡式循環施設を4基追加するとともに空気揚水筒方式の気泡式循環施設を散気方式に改造して、計10基の施設運用を行うこととした。

以上の対策により、以前のような高濃度のカビ臭物質は検出されなくなったが、気泡式循環施設が稼働し湖水が循環混合しているにもかかわらずカビ臭現象が発生するなどの状況が確認された。このため、現地の詳細調査等を実施し、釜房ダムにおけるカビ臭発生メカニズムの解明を行った。

釜房ダムではカビ臭の原因となる *Phormidium* 属が数タイプ存在し、水中で増殖するタイプと浅い水深の湖底を生育域とするタイプが存在すること、気泡式循環施設はこのうち水中で増殖するタイプの発生抑制には機能するが、浅い水深の湖底を生育域とするタイプには機能しないことが明らかとなった。Kダムは、貯水池沿岸や貯水池上流部の堆砂進行により、夏季に水深数mとなる浅場を多く有する貯水池であるため、上記の浅い水深の湖底を生息域とするタイプが多く生育するため、湖水への影響が著しい。

以上に示した *Phormidium* 属のタイプ分けと各タイプによるカビ臭発生メカニズムを整理し、図 5.19～図 5.21 に示すように取りまとめた。

なお、気泡式循環施設の基数増加と形式変更を行った前後(以降、事業実施前／事業実施後という)の水温勾配とカビ臭物質濃度の関係を整理すると、図 5.22 のようになる。この結果をみると、事業実施前には水温勾配が強くカビ臭物質濃度も高い状態であったもの(図中①の範囲)が、事業実施後には水温勾配が弱くカビ臭物質濃度も10ng/L以下となる(図中②の範囲)頻度が多くなっていることがわかる。これは、図 5.19 や図 5.20 に示した水中での *Phormidium* 属の増殖が気泡式循環施設の増強により抑制されたためと考えられる。

一方、事業実施前後を通じて水温勾配が弱いもののカビ臭物質濃度が高い(図中③の範囲)データも存在することが確認された。これは図 5.20 で示すように気泡式循環施設による循環混合が十分なされ *Phormidium* 属が湖水中に供給されるものの更なる増殖が抑制されている場合や、図 5.21 に示すように浅い水域の湖底で繁茂した *Phormidium* 属を起源とするカビ臭現象によるものである可能性が考えられるが、その原因については未だ解明されていないところもあり、今後の検討課題となっている。

このように、ダム貯水池で発生するカビ臭現象については、複数の発生メカニズムが存在することもあることから、慎重な調査検討が必要な場合もある。

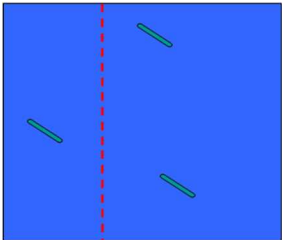
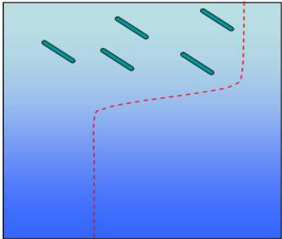
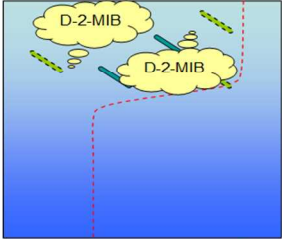
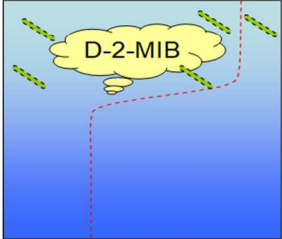
	想定されるメカニズム	釜房ダムの実測結果	他ダム等の類似	既報の知見	推察
	水温が低く、全層循環しているため、水中でカビ臭原因藻類は増殖できない。 ⇒細胞密度が低く、2-MIBも検出されない。	過去の検討において、当ダムにおけるフォルミディウム属は、成層強度※が10^{-4}未満では増殖しないことが報告されている ※成層強度 成層形成の強さを表す指標。ここでは、表層0.5mの水温と水深10m水温の密度差を水深差で除した値から求めている。	国内のダム貯水池において、フォルミディウム属は年間を通じて観察されるが、大量発生によるカビ臭障害の報告は、表層水温が$15\sim 30^{\circ}\text{C}$の範囲に集中している(工藤ら、2004年、水文・水資源学会誌)。	藍藻類は他の藻類に比べて高い水温と光エネルギーを要求するため、その増殖は初夏から夏季に集中する。	
	表層水温の上昇による、浅く安定した表水層の発達に伴いカビ臭原因藻類が増殖する。 ⇒細胞密度の増加に伴い、細胞内に保持されたP-2-MIBが増加する。	- H24年4月上旬より浅く安定した表水層が形成されると、<i>P. catenata</i>の増殖が観察された。 - その後も成層強度が10^{-3}で推移すると、5月中旬より<i>P. limnetica</i>の増殖が観察された。	浅瀬石川ダムにおいて、平成24年夏季～秋季にかけて、浅く安定した表水層が数ヶ月継続した結果、<i>P. limnetica</i>の大量発生によるP-2-MIB濃度の上昇が確認されている。	分離株を用いた室内実験において、増殖期間中のカビ臭原因藻類は生成した2-MIBの大部分を細胞内に保持することが報告されている。	
	水温低下や栄養塩欠乏等の環境ストレスの増加、または曝気循環施設の運用による流動制御によって藻体が死滅する。 ⇒2-MIBが藻体の死滅に伴って細胞内から溶出し、D-2-MIBが増加する。	H24年6月上旬の夏期強曝気稼働及び湖水交換に合わせて成層強度が低下すると、<i>P. limnetica</i>⇒<i>P. catenata</i>の順に衰退し、それと同時にP-2MIBが消失し、D-2-MIBのみが残存する現象が観察された。	カビ臭原因藻類の衰退に伴うP-2-MIBの減少、及びD-2-MIBへの推移は、浅瀬石川ダム、白川ダム等でも観測されている。	藻類の死滅に伴う細胞外への二次代謝産物の放出は、一般的な現象として知られている。	- 当ダムでは、間欠式空気揚水塔の導入後、一時的にカビ臭現象が解消した。 - この理由として、増殖に高い成層強度(10^{-3}レベル)を要求する<i>P. limnetica</i>が抑制されることが考えられる。
	藻体の死滅により、水塊中から原因藻類が消失する。 ⇒D-2-MIBのみが残余し、その濃度は時間経過に従い減少する。	H24年6月中旬から7月上旬のドローダウンに伴って、D-2-MIBが次第に減少し、カビ臭イベントが収束する現象が観察された。		湖水中のD-2-MIB濃度の低減は、湖水交換による希釈、大気中への揮発、及び微生物による生分解によって支配されていることが指摘されている。	

図 5.19 釜房ダムにおけるカビ臭発生メカニズム(1) 水中生産型 (原因 *Phormidium* 属 : *Pseudanabaena limnetica*, *Pseudanabaena catenata*)

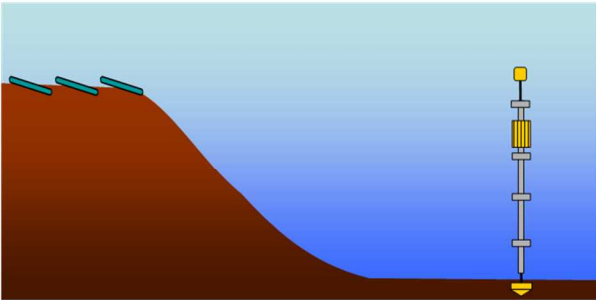
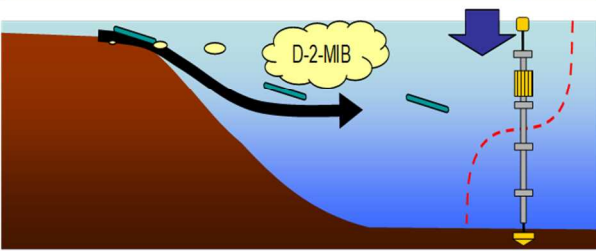
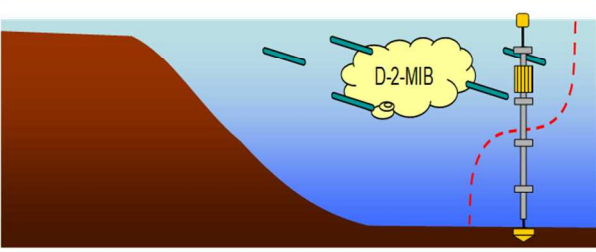
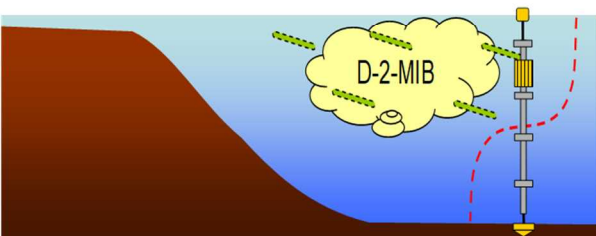
	想定されるメカニズム	釜房ダムの実測結果	他ダムの類似例	既報の知見	推察
	- 安定した貯水位が継続 - EL.136m~143m付近の浅場底泥上でカビ臭原因藻類が増殖 ⇒細胞内にP-2-MIBが蓄積 ⇒死滅した藻体から順次間隙水中へD-2-MIBが放出	H24年7月中～下旬に貯水位EL.144.5m付近で安定すると、浅場底泥において<i>P. catenata</i>の増殖とP-2-MIBの増加が観察されている。	ダム貯水池の浅場及び貯砂ダム底泥上での<i>P. catenata</i>の増殖は、白川ダムで確認されている。	Komárekの同定書には、<i>P. catenata</i>は主に底泥表層で増殖する底生性藻類として記載されている。	ダム貯水池では、ダム運用により貯水位が大きく変動するため、底生性藻類の増殖は貯水位の増減による光環境の変化と密接に関係しているものと推察される。
	- 貯水位低下、出水、風等による攪乱 <i>P. catenata</i>が底泥から貯水池水塊へ流出 ⇒底泥中の2-MIBが減少 ⇒貯水池水塊の2-MIB濃度の増加	H24年7月下旬～8月上旬に貯水位が低下すると、浅場底泥上の<i>P. catenata</i>とP-2-MIBが大きく減少した。	白川ダムでは、H23年秋季に貯水位の低下に伴う底泥から<i>P. catenata</i>が流出し、湖水中でP-2-MIBが上昇する現象が観測されている。	海外の幾つかの研究例では、攪乱に伴い、浅場底泥から流出したカビ臭原因藻類が湖水中に輸送され、カビ臭現象を引き起こすことが指摘されている。	貯水位低下、出水、風等により浅場底泥に攪乱が与えられると、沿岸部の底生藻類は巻き上げ等により貯水池水塊へ輸送されるものと推察される。
	水中生産型シナリオ同様の好適環境があると、貯水池表層で<i>P. catenata</i>が臨時的増殖 ⇒細胞密度の増加に伴いP-2-MIBが上昇	H24年4月上旬～6月中旬に浅く安定した表水層が形成されると、<i>P. catenata</i>の湖水中での増殖が観察された。	白川ダムでは、H22年夏季の出水直後からフォルミディウム属が観察され、その後に浅く安定した表水層が形成されると、フォルミディウム属の増加と2-MIB濃度の上昇が確認された。	<i>P. catenata</i>は、底泥から剥離し、水中に流出すると、臨時的に増殖することが報告されている。	底泥から流出した<i>P. catenata</i>はダムサイトにおいて安定した浅い表水層が形成されている場合、臨時的に増殖すると推察される。
	好適環境が崩れると、貯水池表層において<i>P. catenata</i>が速やかに死滅 ⇒細胞内に保持されていたP-2-MIBの放出され、D-2-MIBのみが残余する	H24年6月上旬に夏期強曝気稼働及び湖水交換に合わせて成層強度が低下すると、<i>P. catenata</i>が衰退すると同時にP-2-MIBが消失し、D-2-MIBのみが残存する現象が観察された。			過去には貯水位の低下に伴いフォルミディウム属とP-2-MIBの増加が確認されるイベントもあることから、底泥から流出した<i>P. catenata</i>が臨時的に増殖する可能性が肯定される。

図 5.20 釜房ダムにおけるカビ臭発生メカニズム(2) 浅場供給型① (原因 *Phormidium* 属 : *Pseudanabaena catenata*)

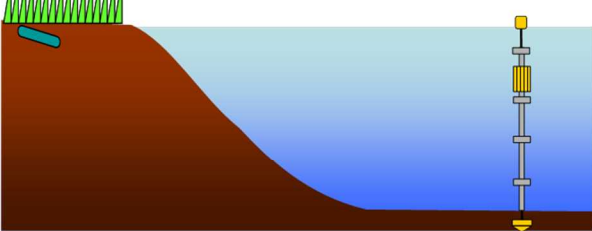
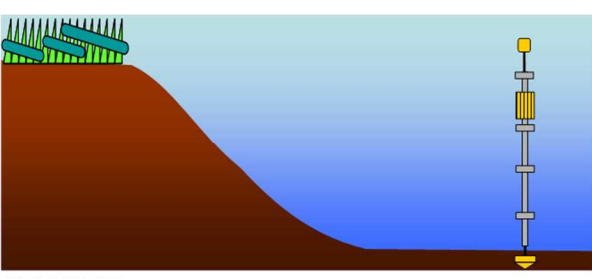
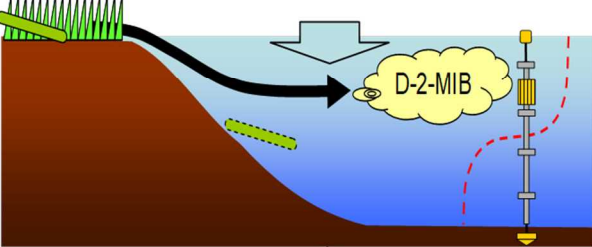
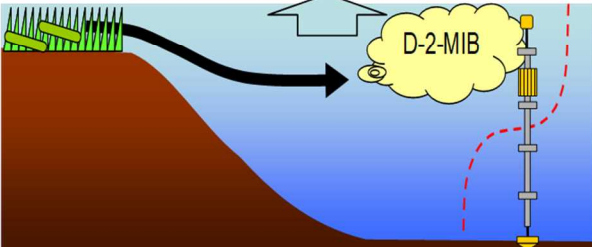
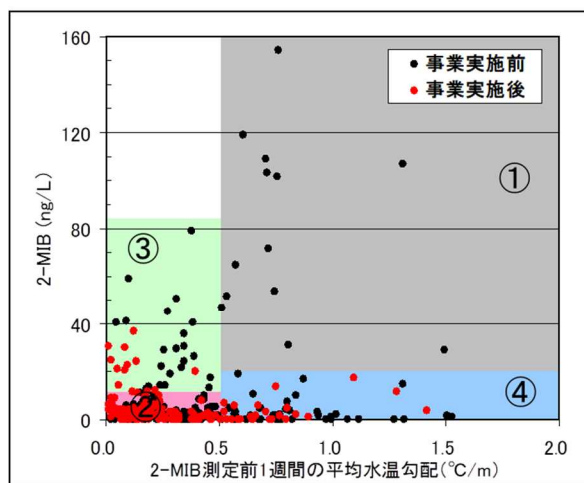
	想定されるメカニズム	釜房ダムの実測結果	他ダムの類似例	既報の知見	推察
	- 夏季の貯水位低下 - 浅場底泥の陸化に伴う草本植物の繁茂 ⇒付着基質の発達	現地踏査より、10日～2週間程度で陸化した浅場が草地化することが確認されている。	海外の研究例では、<i>P. tergestinum</i>を原因種とするカビ臭現象が報告されているが、国内での事例はない。	Komárekの同定書には、<i>P. tergestinum</i>は底生性藻類として記載されている。	これまでの浅場底泥調査で<i>P. tergestinum</i>は草本植物の根本に絡んでフィルム状に生育していたことから、沿岸部の草本植物の繁茂は重要な要因と考えられる。
	- 貯水位上昇により浅場底泥が1～2m程度冠水した状態で安定 - EL.143～144m付近の浅場底泥で<i>P. tergestinum</i>が出現(連鎖体の発芽)と増殖 ⇒細胞密度の増加に従い、底泥のP-2-MIBが増加 ⇒藻体の死滅に伴い、間隙水中にD-2-MIBが順次放出	H24年9月～11月中旬にかけて、EL.142.5m以浅(期間中の水深は、水際～水深1.5mの範囲で変動)の沿岸域で<i>P. tergestinum</i>が観察された。		一般的に藻類は細胞サイズの大きい種ほど光要求性が高い傾向があることが知られている。	<i>P. tergestinum</i>は運動性を有していることから、増殖に適した環境が形成されると、底泥中の連鎖体が発芽し、糸状体が底泥表面へと移動、集積することが推察される。
	- 貯水位の再低下による浅場の再陸化 - 暴露による<i>P. tergestinum</i>の死滅 ⇒細胞外へと放出されたD-2-MIB濃度の供給(糸状体サイズが大きく、P-2-MIBは供給されない)	H24年9月～11月中旬に<i>P. tergestinum</i>の生育していた浅場底泥は、H24年12月上旬～H25年3月上旬に陸化し、3月中旬以降から貯め上げによって再冠水し、カビ臭イベントが発生している。		糸状体の直径が4μm以上のガス胞を持たない藍藻類ユレモ目は、速やかに沈降するため、水中では増殖しないことが知られている。	<i>P. tergestinum</i>は浅場底泥上では観察されるものの、貯水池水塊では観察されていないことから、糸状体の輸送によるP-2-MIBの供給は起きていないものと考えられる。
	貯水位の上昇による再冠水に伴う浅場底泥からのD-2-MIB溶出 ⇒貯水池水塊のD-2-MIB濃度の増加	<i>P. tergestinum</i>を原因とするカビ臭障害の発生は、現時点では確認されていない。			過去の調査では、<i>P. tergestinum</i>は水深0.5～1.0m程度によく繁茂していたことから、僅かな貯水池変動でも陸化によって枯死し、再冠水時に枯死した藻体からD-2-MIBが溶出すると推察される。

図 5.21 釜房ダムにおけるカビ臭発生メカニズム(2) 浅場供給型② (原因 *Phormidium* 属 : *Phormidium tergestinum*)



水温勾配と2-MIB（カビ臭物質）との関係

※グラフデータはH8年～22年の成層期（4月～10月）の実績値

- ①: 水温勾配が強く(概ね0.5°C/m以上)2-MIBも極端に多く発生しているエリア
→事業実施前に数回発生し、事業実施後は未だ無い現象
- ②: 水温勾配が弱く、2-MIBは発生しているが10ng/L以下(水道基準以下)に抑えられているエリア
→事業実施後は概ねこのエリアに集まる(曝気の効果)
- ③: 水温勾配は弱い、2-MIBは10ng/L以上発生しているエリア
→「浅場供給型②」に示すカビ臭発生メカニズムによるものと推察(事業実施前後ともに見られる現象)
- ④: 水温勾配は強いが、2-MIBがあまり多く発生しない(水道基準前後)エリア
→原因が未解明な現象(今後の検討課題)
(事業実施前後ともに見られる現象)

区分	水温勾配	2-MIB	プロット割合	
			事業実施前	事業実施後
エリア①	0.5から2.0	20以上	9.7%	0.0%
エリア②	0.0から0.5	10未満	48.5%	68.4%
エリア③	0.0から0.5	10以上	20.9%	15.8%
エリア④	0.5から2.0	20未満	20.9%	11.4%
合計			100.0%	100.0%

図 5.22 釜房ダムにおける事業実施前後の水温勾配とカビ臭物質濃度との関係

5-6. 気泡式循環施設の諸元設定方法

5-6-1. 透明度の観測値がない場合の必要混合水深の設定方法

当該ダムにおいて透明度の観測値がない場合は、特徴の類似するダム貯水池における透明度とSSまたは濁度の関係から回帰式を求め、当該ダムにおける透明度を推定し、算出することも可能である(図 5.23)。

なお、気泡式循環施設の効果が確認されているダムにおいて、補償深度に対する必要混合水深の比率をみると、おおむね2～3倍程度となっている¹¹⁾。

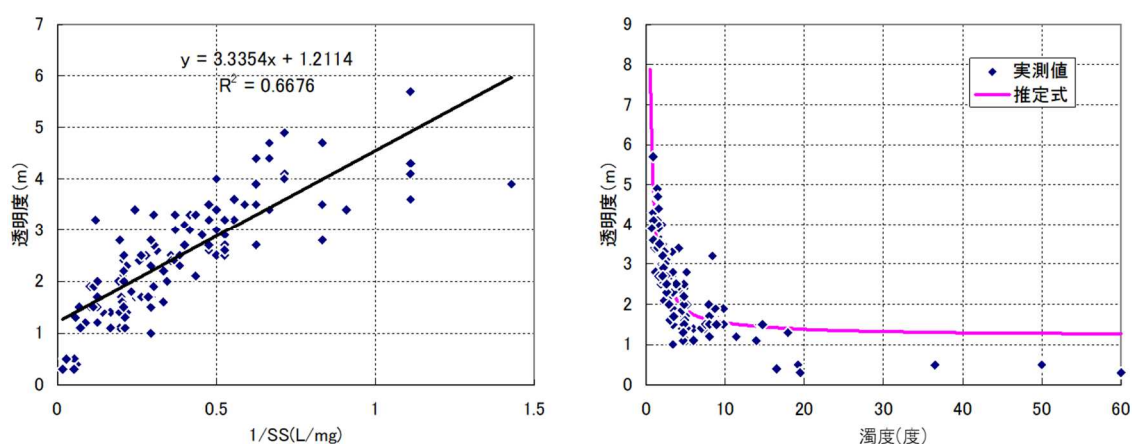


図 5.23 透明度とSS(左図)・濁度(右図)の関係式の事例

5-6-2. 空気吐出深度の設定方法

(1) 水質シミュレーションを用いた設定方法

気泡式循環施設により生じる流動を再現できるサブモデル(Asaeda and Imberge による二重プルームモデル等)を付加した水質シミュレーションモデル(鉛直二次元モデル)により、気泡式循環施設の空気吐出水深を数段階設定し、その結果から目標水質を達成する条件を選定する(図 5.24)。

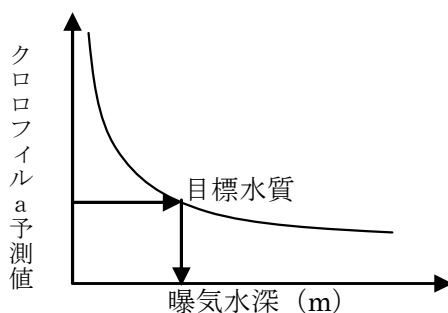
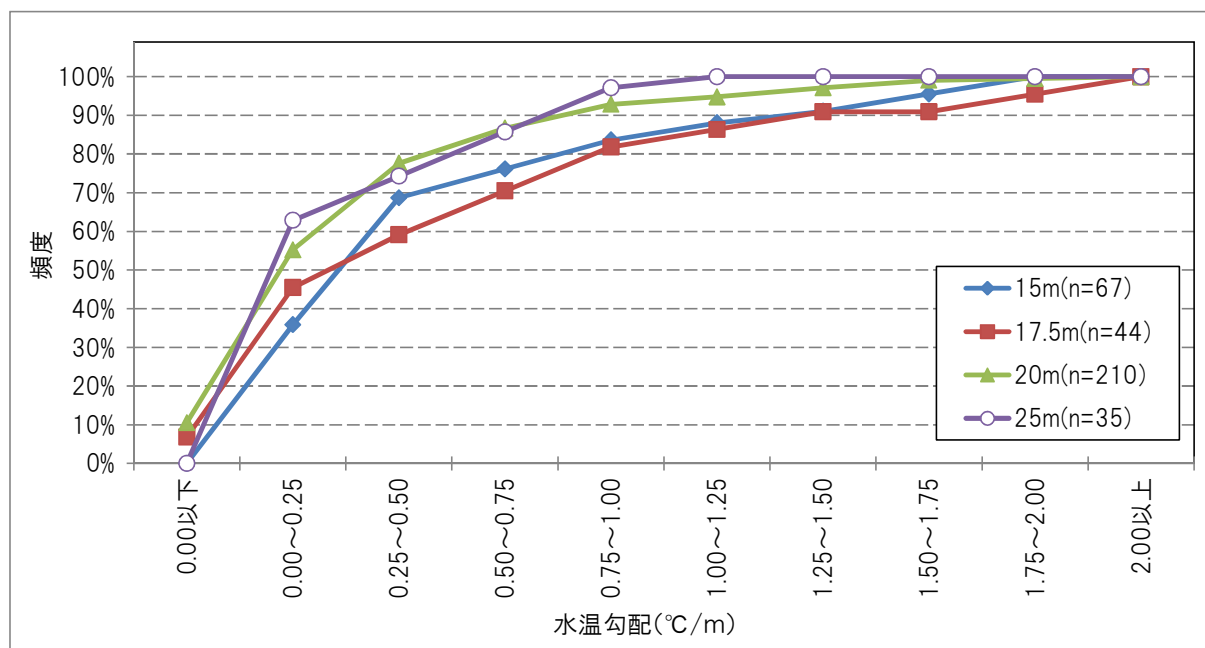


図 5.24 水質シミュレーションによる空気吐出深度の設定例

(2) 経験則に基づく設定方法

気泡式循環施設を設置しているダム貯水池の空気吐出深度と水温勾配との関係を頻度分布で整理した結果、空気吐出深度を深くするほど水温勾配を $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下に維持できる割合が高くなり、その差は僅かではあるが、空気吐出深度を 20m 以上とするとその割合が 7 割以上を確保可能という結果となった(図 5.25)。

以上より、空気吐出深度の最小値の目安としては 20m が参考となる。



※連続運転を実施している気泡式循環施設で、循環期を除く期間(4~9月)を集計(降雨時のデータを除く)

図 5.25 空気吐出深度と水温勾配の頻度分布(全国のダム貯水池における事例より)

(3) Lorenzen モデルによる設定方法

Lorenzen は、富栄養化したダム貯水池における藻類増殖抑制を目的とした湖水の強制循環手法を評価するために、藻類増殖の制御因子のうち栄養塩と光に着目したモデルを提案している。モデルはダム貯水池の様々な現象を栄養塩と光に代表させ、表層部を完全混合層とみなし、図 5.26 に示すように表層部の混合水深と最大藻類量の関係に栄養塩制限ライン(光が十分ある場合、栄養塩が供給される水深が深いほど藻類増殖量は増える)と光制限ライン(水深が深いほど日射量が減少し藻類増殖量は減少する)で表現している。

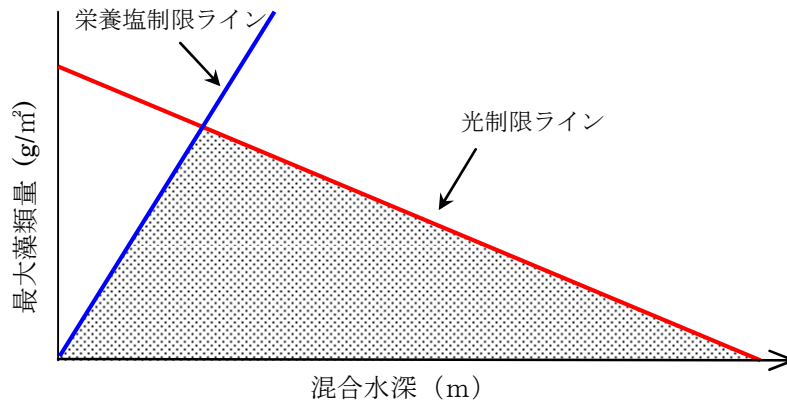


図 5.26 Lorenzen モデルの概念

ここで、水質障害が発生しない藻類量(クロロフィル a の目標値)を設定すれば、図 5.27 に示すように、光制限ラインから目標とする気泡式循環による混合水深が設定できる。

Lorenzen モデルの適用にあたっては、当該ダム貯水池における水温躍層厚(混合水深)とクロロフィル a の関係を求め、最大値を結ぶことで、栄養塩制限ラインと光制限ラインを決定し、光制限ラインとクロロフィル a 目標値の交点を求めることで必要混合水深を決定することとなる。

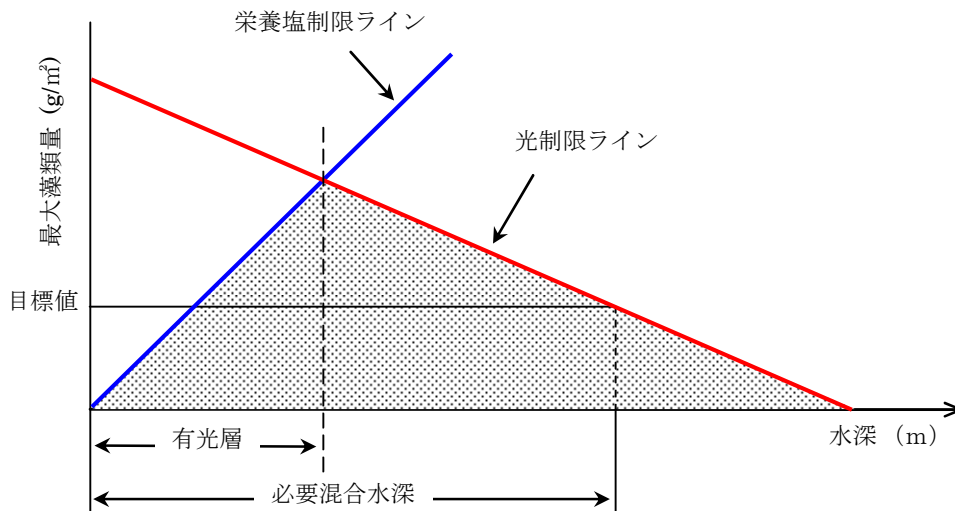


図 5.27 Lorenzen モデルによる必要混合水深の設定方法

5-6-3. 施設規模(空気量・基数)の設定方法

(1) 上昇流量(プルーム)の計算による設定方法

躍層下部の上昇流量の算出式¹²⁾を用いて、気泡式循環施設 1 基当たりの空気量別の必要混合水深 (Z) と躍層低下日数の関係を作成し、必要基数・総空気量を決定する。本方法は、「水温成層形成後に気泡式循環施設を稼働させて水温躍層を低下させるために必要な

規模」の考え方に基づく算出方法である。以下にその概要を示す。

初期躍層水深（気泡式循環前の現況の混合水深）から必要混合水深まで下げるために、必要な循環水量（初期躍層水深と必要混合水深の間の貯水量を必要躍層低下日数以内に循環させる水量）を算出し、それに対応した必要基数・総空気量を求める（図 5.28）。

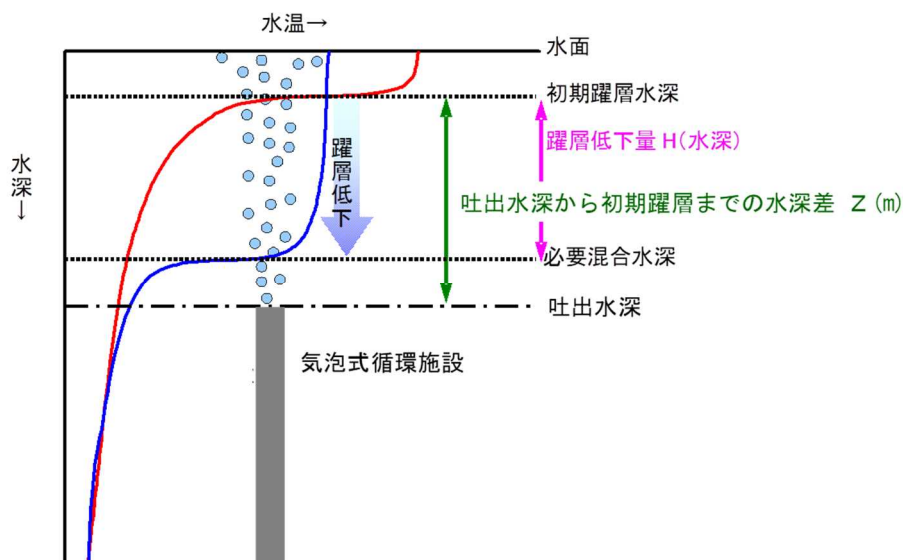


図 5.28 空気量の設定の模式図・各種条件の定義

(2) 水質シミュレーションを用いた設定方法

気泡式循環施設の空気量・基数の組み合わせを数ケース設定し、気泡式循環施設により生じる流動を再現できるサブモデル(Asaeda and Imberge による二重プルームモデル等)を付加した水質シミュレーションモデル(鉛直二次元モデル)を用いて予測計算を行い、その結果から目標水質を達成するケースを選定する。

(3) 経験式に基づく設定方法

土木研究所では、気泡式循環施設の空気量や施設規模を概略的に設定する方法として、貯水池規模と循環流量の規模との比率を考慮した k 値を用いた経験的な式を提案している。

k 値による施設規模の設定は、下式に示すように吐出空気量と気泡式循環施設稼働期間の湛水面積との関係を一定値以上とすることにより設定する方法である¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。

$$k = \sum \sqrt{Q_B} / A$$

ここに k : k 値(250～300 程度)

Q_B : 気泡式循環施設 1 基あたりの空気量[L/min]

A : 湛水面積[km²]

この手法については、当初 k 値は 122 が提唱されていたが、その後の調査研究により 250～300 が適当であることが示されている。

また、今本らは、上記の土木研究所の提案する手法には考慮されていなかった空気吐出水深を組み込んだ k_H 値を用いた経験式を提案している。

k_H 値による施設規模の設定は、下式に示すように上述した k 値による設定方法に循環対象水深を要素として加えたものである。 k_H 値の推奨値は、年最大水温勾配を $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下（朝 6 時頃の水温勾配を用いた値）にするためには 3000、 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下にするためには 6000 とする必要があるとされている¹⁰⁾¹⁴⁾。

$$k_H = \sum \sqrt{Q_B/A} \times H_a$$

ここに、 k_H ： k_H 値 (3,000～6,000 程度)

Q_B ： 気泡式循環施設 1 基あたりの空気量 [L/min]

A ： 湛水面積 [km^2]

H_a ： 気泡式循環施設の空気吐出深度 [m]

(4) 経験則に基づく設定方法

気泡式循環施設設置しているダム貯水池の湛水面積と空気吐量の関係を整理した結果を図 5.29 に示す。また、単位湛水面積当たりの空気量と水質改善効果の関係を整理した結果を図 5.30～図 5.32 に示す。これら結果より、原単位的な考え方として水質改善効果が得られる空気量の目安として、 $1.7\sim 25\text{m}^3/\text{min}/\text{km}^2$ が得られ、平均水温勾配が $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下を維持するための目安としては $17\text{m}^3/\text{min}/\text{km}^2$ 程度の単位当たり空気量が推奨される。

ただし、当該ダムで発生する水質障害の原因藻類が *Microcystis* 属であり、流入河川水質のうち年平均 I-P 濃度が $0.015\text{mg}/\text{L}$ 以下の場合は、空気量を $10\text{m}^3/\text{min}/\text{km}^2$ 程度まで低減しても同程度の効果が期待できる可能性がある。

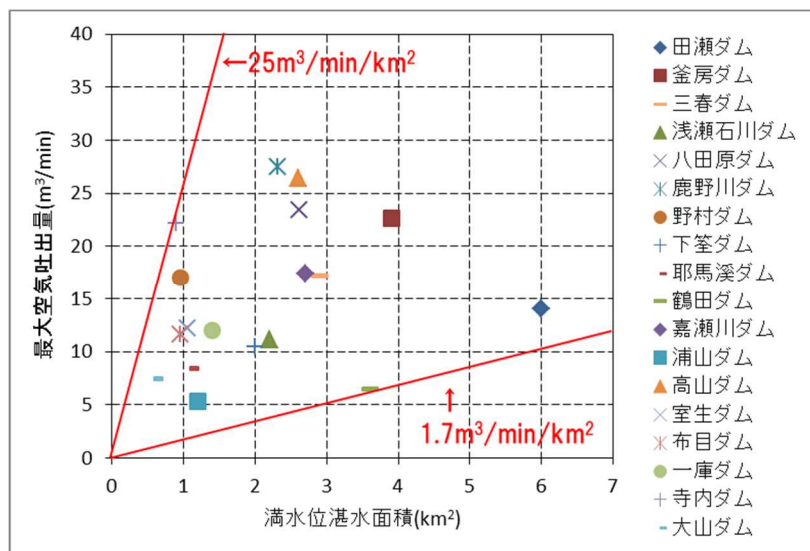


図 5.29 湛水面積と空気量との関係

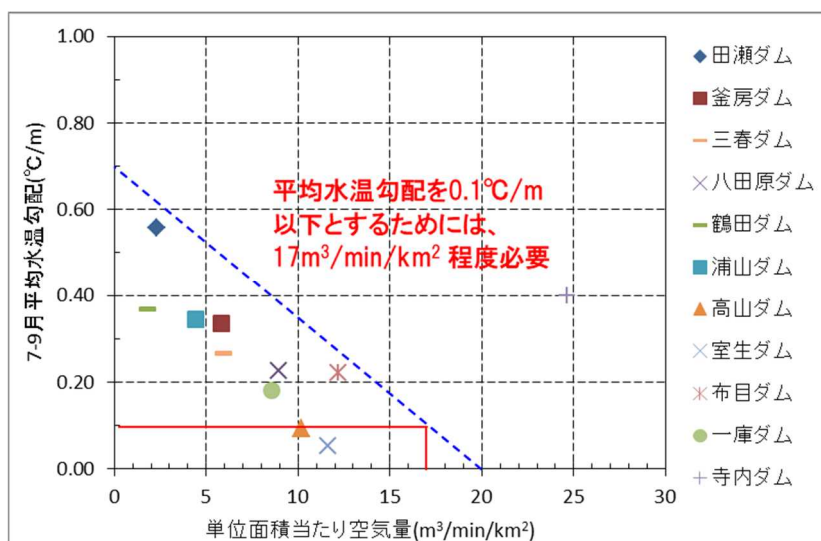
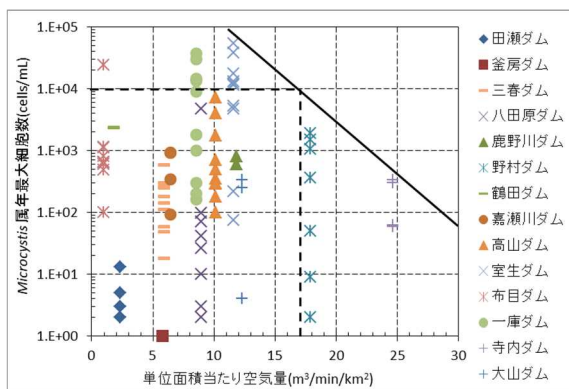
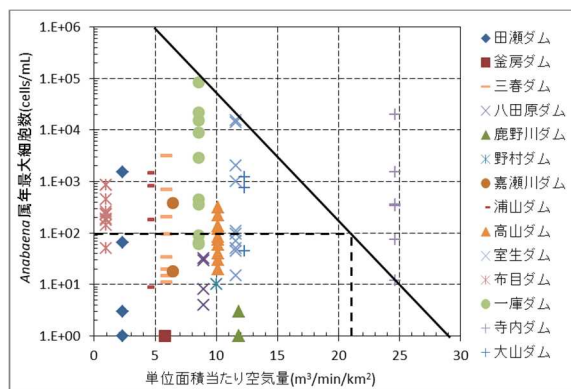


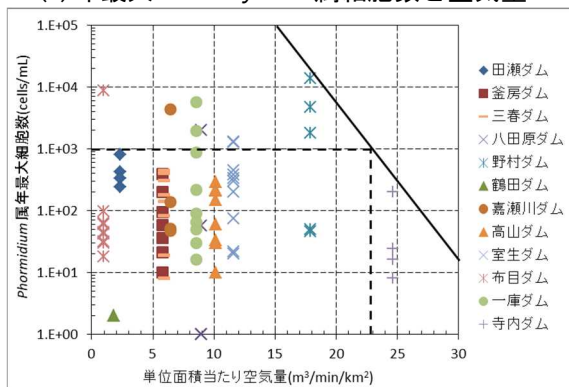
図 5.30 単位面積当たり空気量と7～9月の平均水温勾配



(a) 年最大 *Microcystis* 属細胞数と空気量

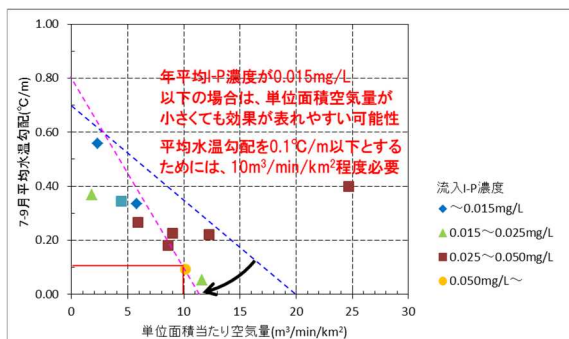


(b) 年最大 *Anabaena* 属細胞数と空気量

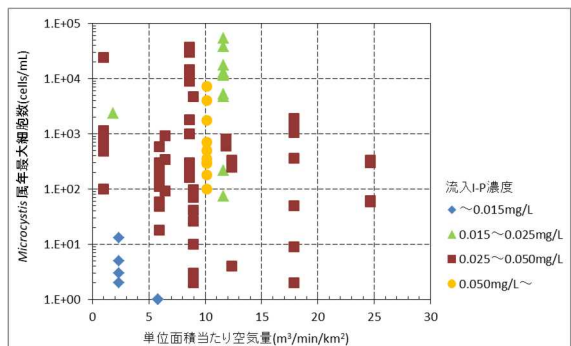


(c) 年最大 *Phormidium* 属細胞数と空気量

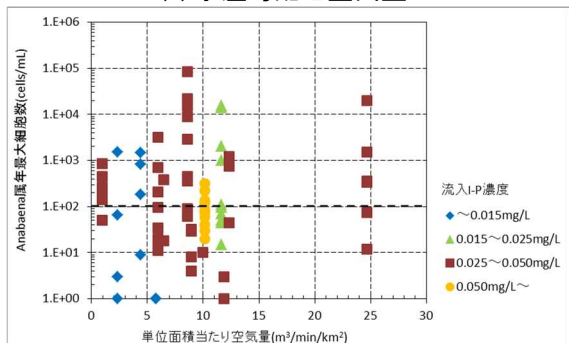
図 5.31 単位面積当たり空気量と藍藻類(属別)細胞密度の関係



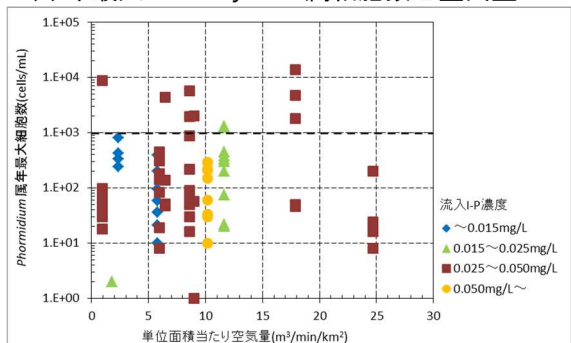
(a) 水温勾配と空気量



(b) 年最大 *Microcystis* 属細胞数と空気量



(c) 年最大 *Anabaena* 属細胞数と空気量



(d) 年最大 *Phormidium* 属細胞数と空気量

図 5.32 単位面積当たり空気量と水温勾配・藻類細胞密度の関係(流入河川の年平均 I-P 濃度別)

5-7. 気泡式循環施設の詳細設計方法

5-7-1. アンカー

アンカーの設置位置は、法面と湖底がある。水深が浅いダム、水位変動が少ないダムは、ワイヤーの長さを短くできる等の理由からアンカーを湖底に設置することが適当と考えられる。また、法面の傾斜が急なダム貯水池も施工性から湖底設置が適当と考えられる。

水深が深いダム、水位変動が大きいダムは、アンカーを湖底設置するとワイヤーのゆるみにより浮体の移動範囲が大きくなったり、ワイヤーと送気管が絡んで故障の原因となる等が考えられることから、アンカーを法面に設置することが適当と考えられる。ただし、設置後湖面上空をワイヤーが通過することになるため、巡視時や湖面利用の際に注意が必要である。

アンカーの位置は、浮体の移動範囲を考慮し、浮体が隣接する場合に相互干渉しないような位置とする必要がある。なお、水位変動に伴う移動範囲を考慮すると、アンカーは3点支持とするのが望ましい。

5-7-2. ワイヤー

ワイヤーの材質は、強度及び耐久性を考慮し、ステンレスを用いることを基本とする。ワイヤー径は、風波による引張力が1点に掛かることを基本として網場の設計技術基準に則り設計することとする。

5-7-3. 空気圧縮機の選定

(1) 空気圧縮機の形式

気泡式循環施設に使用される空気圧縮機には、主に表 5.9 に示す2つのタイプがあるが、連続運転、維持管理状況等を勘案するとスクリー型がより適していることから、スクリー型を採用する事例が多い。

なお、圧縮空気にオイルを含ませないように配慮する場合にはオイルフリー方式の機種を選定する、圧縮空気に水分を含ませないように配慮する場合にはエアードライヤー機能付きの機種を選定する等、近年は条件に応じたオプションも選択できることから、空気圧縮機に求める仕様や空気圧縮機の設置条件等に応じて、臨機に対応することが望ましい。

表 5.9 空気圧縮機の比較

名 称	スクリー型	レシプロ型
特 徴	・2つのスクリーを組み合わせた容積型の連続運転対応型の圧縮機 ・吐出圧、空気量ともに安定している ・中圧(2～7kg/cm²)向き ・構造が簡単 ・本体が小さい ・圧送空気圧に脈動が少ない ・耐久性が高い	・往復動型圧縮機で連続運転対応のものは少なく、ほとんどの製品が間欠運転を前提としている ・このため圧力が変化し、供給空気量が変化する ・高圧(7kg/cm²以上)向き ・スクリー型に比べて効率が良い
問題点	・レシプロ型に比べて効率が少し劣る	・交換部品が多くメンテナンス費が高い ・メンテナンス間隔が短い ・本体が大きい ・運転振動が大きい ・騒音が大きい
備考欄	中圧連続運転に適しており気泡式循環施設向き	

(2) 空気圧縮機の出力算出

空気圧縮機の出力は、20%以上の余裕を見て以下のように算出する。

$$L_{ad} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_s \cdot Q_s}{6,120} \cdot \left[\frac{P_d}{P_s} \right]^{k-1/k} - 1$$

L_{ad} : 理論断熱圧縮動力(kw)

k : 比熱比(気体の低圧比熱と定容積比熱との比であって、空気の場合 1.4)

P_s : 吸い込み空気の絶対圧力(=吸い込みゲージ圧+大気圧) (kg/m²)

Q_s : 吸い込み状態に換算した空気量(吐出し空気量を標準吸い込み状態(20℃、1気圧、湿度 65%及び密度 1.20 kg/m³)の体積に換算したもの)

P_d : 吐出し空気の絶対圧力(=吐出し空気ゲージ圧+大気圧) (kg/m²)

$$L_s = \frac{L_{ad}}{\eta}$$

L_s : 送風機の駆動動力(kw)

η : 全断熱効率(機械効率と断熱圧縮効率との積である。)

$$P = L_s \cdot \alpha$$

P : 動力機の出力

α : 余裕率(1.2以上)

ただし、空気量は送気管等の圧力損出を十分に考慮することとする。

(3) 空気圧縮機の台数

空気圧縮機の台数は、気泡式循環施設の基数と同一にする方法と、気泡式循環施設数基分を1台でまかなう方法とが考えられる。

散気管の設置水深、送気距離等による圧力バランス(水圧、エネルギー損失)を考慮して決定することとし、選択した空気圧縮機の種類によってはエアータンクを設けることも検討する必要がある。

5-7-4. 散気管の設計

空気圧縮機から供給される空気は送気管を通過し、散気管内に導かれ、空気孔から水中に噴出される。送気管内の風速は大きくなると、出口での圧力損失が大きくなる。また、供給空気圧力は、殆どが散気管設置水深に伴う背圧と噴出時の速度エネルギー相当分とで消費される。したがって、散気管の設置水深ならびに散気孔の設計に当たっては、十分圧力バランス(水圧、エネルギー損失)を考慮することとする。

散気孔の径については、単孔方式であれば送気管の径と同程度の 40～50mm となり、多孔方式であれば気泡上昇時の連行量を考慮すると小さい方が望ましいと考えられる。既往の事例では 3mm×約 100 箇所タイプのタイプと 10mm×約 10 箇所タイプのタイプが代表的である。

また、散気管のタイプには単孔式と多孔式があり、各々の特徴は次のとおりである。

- ・単孔式：製作コストが安価、多孔式に比べて気泡の噴出に偏りがない。
- ・多孔式：噴出孔全部から均等に気泡を出すことは不可能であり、偏りを想定して余分に孔を設けておき(計算値の 2 倍程度)、流量調節することが必要となる。

また、躍層低下の効果に対しては、気泡上昇時の連行により差が出る。しかし、吐出口での気泡の大きさが異なっても、ある程度(3～5m)上昇した後は分割及び結合により気泡の大きさが一定してくる。したがって、吐出口から 5m 以上の場所では連行パターンにあまり差がないものと考えられる。

このようなことから、一般に噴出孔直上の投影面積が大きい多孔式が有効であると考えられる。なお、多孔式の場合、散気孔が小さいと摩擦損失が発生するため注意が必要である。

5-7-5. 送気方法と配管ルート

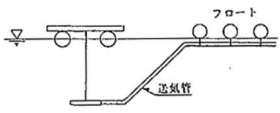
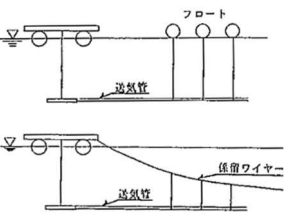
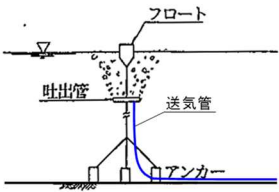
(1) 送気方法

気泡式循環施設の代表的な送気方式は、表 5.10 に示すように水面、水中、湖底の 3 タイプに分類される。

水面付近に設置する場合は、景観、船の航行上の影響が考えられる。また、水位変動に伴い送気管が移動することとなるため、支持方式による浮体の移動範囲を十分考慮しておく必要がある。湖底埋設・湖底敷設方式では水深の深いダムにおいては背圧が大きくなり、空気圧縮機的能力との関係も考慮する必要がある。また、重量バランスがとり難いこともある。

以上のことから送気方式は気泡式循環施設のみを考慮すると水面付近の設置が良いと考えられるが、ダム貯水池の特性に応じて決定することとする。

表 5.10 代表的な送気方法

	水面付近		湖底埋設 湖底敷設
	水面付近	水中	
構造図			
景観 (フロートの数)	多い(数 m 間隔)	多い(数 m 間隔)	なし (湖底設置のため)
船の航行 への影響	あり	少ない	なし
送気管 の長さ	比較的短い		長い
維持管理	設置後の送気管のメンテナンスは用意である 出水時に流木による損傷を受ける可能性がある		敷設後の堆砂進行により送気管が損傷を受ける可能性がある 敷設後の送気管のメンテナンスが困難である
備考欄	—		水深の大きいダムの場合、立ち上がり部分が長くなり、それに伴う工夫が必要となる場合がある

(2) 配管ルート

配管ルートは、施設配置及び送気方式により異なるが、空気圧縮機から装置までが近い場合には法面に沿って鉛直方向に配管するのが適当である。この場合、水位変動等に伴う送気管の移動により法面の侵食が考えられることから、法面保護を施すことが望ましいが、少なくとも陸上部を固定しておくことが必要と考えられる。さらに、水中についても夏季の貯水位から設置水深と同程度まで固定しておくことが望ましいものと考えられる。

また、コンプレッサーと装置が離れている場合は、装置付近の湖岸までは陸上配管が管理上望ましいと考えられ、平常時最高貯水位より高い位置での配管が妥当と考えられる。

5-7-6. 送気管の設計

気泡式循環施設の送気管は、圧力損失を十分考慮して径を決定するものとする。また、空気量の把握と調整が可能なように流速計、バルブ等を取り付けることとする。送気管は、耐熱ホースを用いるものとし、保護管をつけることとする。

(1) 送気管の径

送気管の径については、コンプレッサーの能力及び送気距離、風速等の損失を十分に考慮して決定することとする。送気圧は各種の圧力損失により、次式で表される。

$$P_T = h + H_c + H_p + H_m + H_a + \alpha$$

P_T : 送気圧 (mmAq)

h : 水深 (mmAq)

H_c : 空気ろ過器通過抵抗 (mmAq)

H_p : 送気管の圧力損失 (mmAq)

H_m : 風量測定装置通過抵抗 (mmAq)

H_a : 散気装置等の通過抵抗 (mmAq)

α : 余裕 (散気装置の詰まりによる損失及び配管による損失を考慮し、500mmAq程度とするのが良い。) (mmAq)

送気管の圧力損失は、配管の長さ、管径、流速及び損失係数から以下のように定める。

①直管部の圧力損失

直管部の圧力損失は式(1)による。

$$H_p = 4f_l \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} \text{ ----- (1)}$$

H_p : 送気圧 (mmAq)

f_l : 損失係数 (=0.004~0.0059)

ℓ : 配管の長さ (m)

d : 管径 (m)

γ : 空気の比重量 (kg/m³)

$$\left[= 1.293 \times \frac{273}{T} \cdot P \right]$$

- v : 送気流量 (m/秒)
 g : 重力の加速度 (=9.8m/秒²)
 T : 絶対空気温度 (°K) (=t°C+273)
 P : 絶対空気圧力 (kg/cm²) (=1.0332+ゲージ圧)

②異形管部の圧力損失

異形管部の圧力損失は式(2)による。

$$H_z = f_2 \cdot \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} \text{ ----- (2)}$$

H_z : 異形管部の圧力損失 (mmAq)

f_2 : 損失係数 (表 5.11)

表 5.11 異形管部の圧力損失係数 (f_2)

90 度曲管					T 字管	管入口	管出口	片落ち管	制気弁	
γ/R									スルース弁	バタフライ弁
1/3	1/2	1/1.5	1/1.2	1/1						
0.21	0.36	0.70	1.37	2.44	1.23	0.62	1.23	0.06	0.02	0.26

注：rは管の半径で、Rは管の曲がり半径である。また、任意の角度αの曲管は、 f_2 の値として、(90度曲管の f_2)・α/90を用いばよい。

③散気装置等の圧力損失

散気装置等の通過抵抗による圧力損失は表 5.12 による。

表 5.12 散気装置等の圧力損失

装置の種類	散気板	散気管	風量測定装置	空気ろ過器
圧力損失(mmAq)	400	400	200	15

注：散気板及び散気管は、ホルダオリフィス付きの場合で、風量測定装置は、オリフィス形の場合である。

また、送気管の断面は次式で表される。

$$A = \frac{Q}{v}$$

A : 送気管の断面積

Q : 送気量 (m³/s)

v : 流速 (m/s)

既往の事例においては、送気管の径は 40～50mm 程度が多く、流速は 10～20m/s 程度で設計されている。

(2) 空気量の把握と調節

気泡式循環施設の所定の効果を得るためには、吐出空気量を安定的に吐出することが重要であり、そのためにバルブ流量計を設置するものとする。

バルブ流量計は、コンプレッサーの運転制御のためのエアータンク吐出部に 1 箇所、散気管側（浮体等）に 1 箇所の計 2 箇所に設置するものとする。

(3) 材質等

送気管の材質は特殊ポリエチレンや特殊ゴム等を用いるものとする。

なお、送気管は貯水位変動や風に伴い、気泡式循環施設が移動するために部分的に磨耗することが考えられ、保護管をつけることとする。

5-8. 運用ルールの設定に係る有益な事例

5-8-1. 三春ダムにおける運用ルールの設定事例

三春ダムでは7基の気泡式循環施設を設置しているが、ダムサイトの水質自動監視装置の計測結果から表層水温の上昇に応じて稼働する基数を段階的に増加させる運用ルールを採用している。

三春ダムでは当初、5基の気泡式循環施設を稼働していたが、その期間に観測された水温データを用いた解析から春季の受熱初期は5基全基を稼働しなくても十分に表層付近の水温躍層を解消できる可能性があることが示されていた。このため、盛夏の能力不足を補うための対策として気泡式循環施設を2基増設するための検討を行うのと併せて、全7基の段階的な運用についての検討を行い、設備増設当初から段階的運用を適用している。

実際に図 5.33 に示す運用ルール案を設定後、モニタリング調査による効果確認を行っているが、循環混合不足やそれに伴う出現藻類の変化（特に藍藻類の出現時期が早まる等）は確認されておらず、適切な運用ルールの設定であることが示されている。



図 5.33 三春ダムにおける気泡式循環施設の運用ルールの設定例

5-8-2. 釜房ダムにおける運用ルールの設定事例

釜房ダムでは、管理開始当初より *Phormidium* 属によるカビ臭現象が発生し上水道取水に影響を及ぼしており、その対策として計 10 基の気泡式循環施設を運用している。

釜房ダムでは当初、成層強度と pH を指標に気泡式循環施設の運用ルールを定めていた。当該ダムにおいて気泡式循環施設の運用が開始された以降の水文・水質データ等を整理した結果、夏季に貯水位が低下することが頻繁にあること、気泡式循環施設の稼働後には蛍光色素の異なる *Phormidium* 属に変化する傾向があること等が確認された。

このため、気泡式循環施設の必要空気吐出量が貯水池容量や湛水面積によって決まることに着目し、これまでの気泡式循環施設の運用実績、とその間の水文・水質データ、*Phormidium* 属の発生状況等を解析した結果から、気泡式循環施設の運用方法をダム貯水池の貯水位、成層強度、pH、発生している *Phormidium* 属の種別等を指標に運用基数を変更する運用ルールを適用することとした(図 5.35)。以下にその詳細を示す。

(1) 春季のカビ臭発生に対応するための運用基数設定

釜房ダムでは、表層水温が 10℃程度と低い春季においても *Phormidium* 属が増殖しカビ臭現象が発生する場合があるが、その原因は表層付近数 m に形成される水温躍層が生育域として機能している可能性があることが現地調査及び検討から明らかとなった(水の密度は低水温の場合ほど変化が著しく、僅かな水温上昇でも密度差が生じて水温躍層を形成しやすい)。また、春季は貯水容量も夏季と比べて多いため、湖水を循環させるためには気泡式循環施設を多く稼働させる必要がある。

このため、春季の水温上昇期には、成層強度が $10^{-4}(\text{s}^{-2})$ 、pH が 8.0 以上を超過した場合に設置されている気泡式循環施設 10 基全てを同時稼働することとしている。

(2) 夏季～秋季の貯水位を踏まえた運用基数設定

釜房ダムは、貯水池沿岸に遠浅な地形を多く有していることから、貯水位変化に伴う貯水容量や湛水面積の増減が著しいという特徴を有している。Kダムでは、一般的なダム貯水池における気泡式循環施設の稼働期間である夏季～秋季だけでなく春季にも稼働することから、貯水容量に応じた稼働基数を設定する必要がある。

図 5.34 は、釜房ダムにおける貯水位と湛水面積の関係及び 5-6-3. (3) で示した K 値と貯水位との関係を示したものである。これによると Kダムでは、洪水期制限水位での湛水面積は常時満水位での湛水面積と比べて 64%小さくなること、常時満水位時は 10 基の気泡式循環施設を稼働した場合の K 値と貯水位が EL. 142m の時に 4 基の気泡式循環施設を稼働した場合の K 値がおおむね一致することがわかる。これは、春季には 10 基の気泡式循環施設を稼働する必要があるのに対して、夏季に貯水位が低下した際には 4 基まで稼働基数を縮減しても同等の効果が得られることを意味しており、効率的な運用が可能となる。

以上及び水質シミュレーションによる比較検討を踏まえ、夏季に気泡式循環施設を稼働する場合には、貯水位が EL. 142m 以上か否かで稼働基数を 4 基とするか 10 基とするかを判断し、これを運用ルールに盛り込むこととしている。

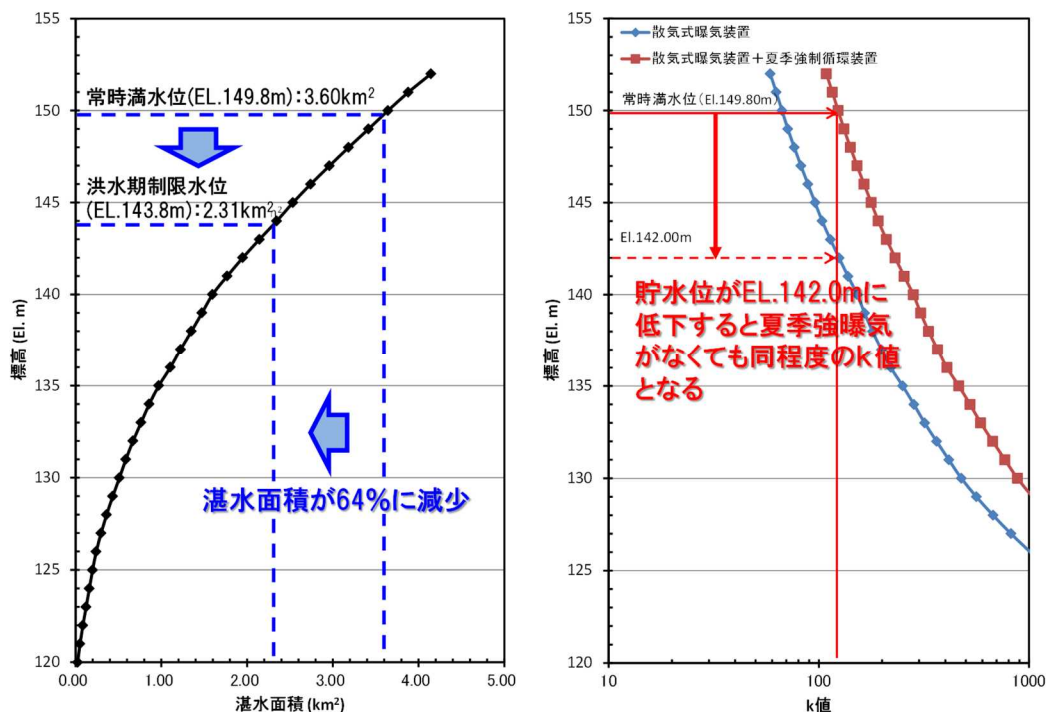


図 5.34 釜房ダムにおける貯水位と湛水面積及びK値との関係

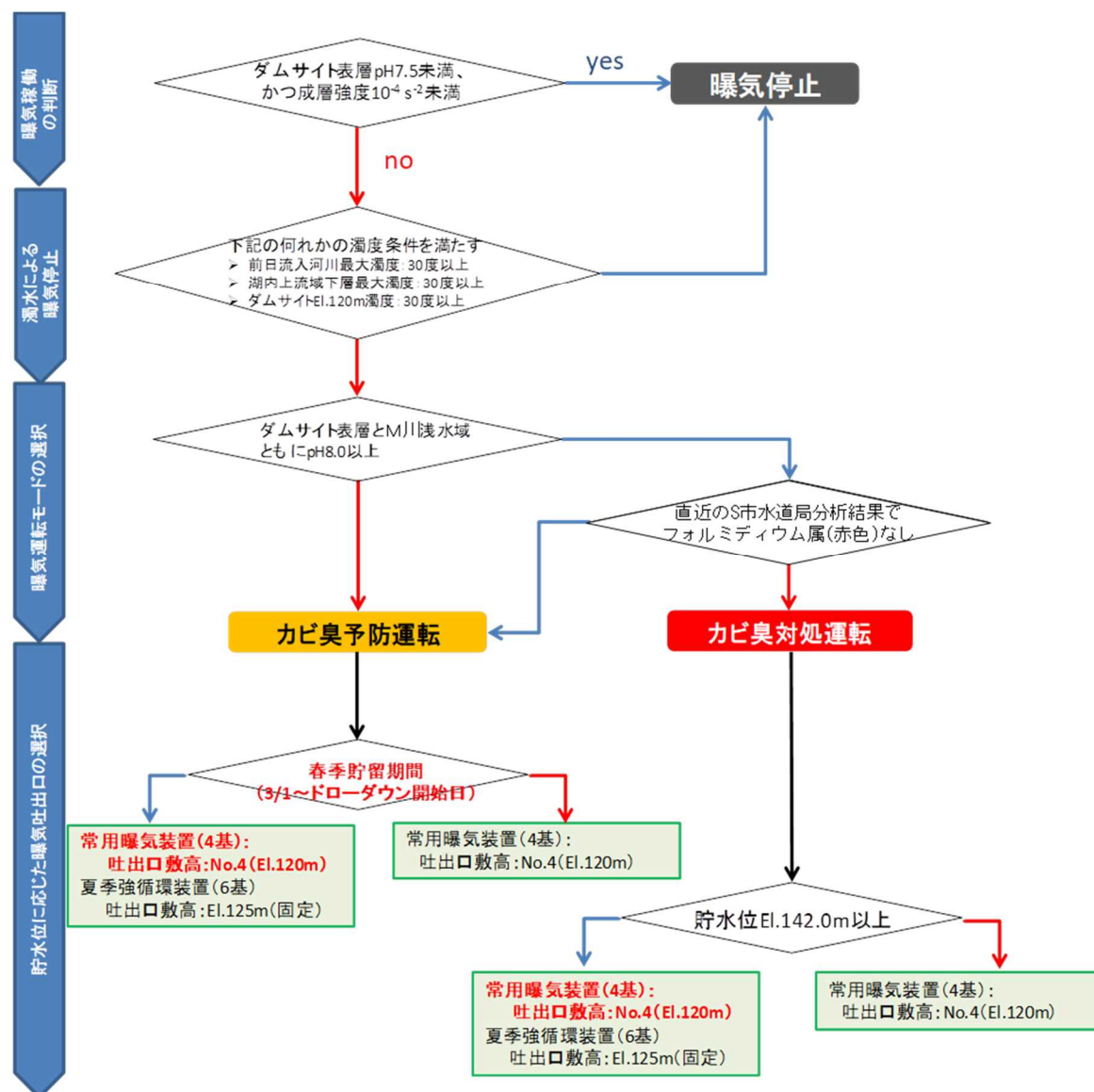
(3) 発生する *Phormidium* 属種別を踏まえた運用停止判断

釜房ダムでは、カビ臭現象の原因となる *Phormidium* 属の消長を定期水質調査で定期的に把握するとともに、利水者である水道事業者で実施する植物プランクトン調査を随時提供してもらうことで時間解像度の高い情報として把握している。

情報提供元である水道事業者では、一般的に行われる藻類の形態的特徴に基づく藻類分類による *Phormidium* 属の同定計数に加えて、蛍光顕微鏡を用いてアンテナ色素の違いに着目した株分類（緑株/茶株、水道事業者では蛍光顕微鏡で直接視認される色あいを用いて「赤色/橙色」という名称で分類）も行われている。これまでの調査検討結果から、*Phormidium* 属の中にはカビ臭を生成する種としない種が混在しているが、以上の株分類を適用することができると明らかとなっている。また、既往の調査検討結果から、Kダムでは気泡式循環施設を稼働してカビ臭を生成する *Phormidium* 属の生息環境が適切に破壊されると、出現する *Phormidium* 属が赤色から橙色に遷移し、遷移した以降は気泡式循環施設を停止しても出現する *Phormidium* 属が再び赤色に戻ることはないことも明らかになっている。

以上の関係性を踏まえ、釜房ダムでは気泡式循環施設の稼働停止判断基準として、水道事

業者から提供される株別の *Phormidium* 属の出現状況を確認し、出現する *Phormidium* 属が橙色になった場合に稼働を停止することとしている(図 5.35)。



5-8-3. 弥栄ダムにおける運用ルールの設定とその見直し事例

弥栄ダムでは、*Microcystis* 属等によるアオコ現象が度々発生し、年によっては湖面全体がアオコ状態となっていた。このため、気泡式循環施設を4基導入して水質改善を図った。ここでは、既往検討結果を踏まえた気泡式循環施設の運用ルールの設定と、その後のモニタリング調査結果を踏まえた運用ルールの見直しについて紹介する。

弥栄ダムの気泡式循環施設は、季節に応じた吐出深度の設定やアオコ発生時の対応、出水に伴う濁度上昇に応じた運用等、きめ細かな運用ルールを設定している(表 5.13 及び表 5.14)。

表 5.13 弥栄ダムにおける気泡式循環施設の運用ルール事例(1)

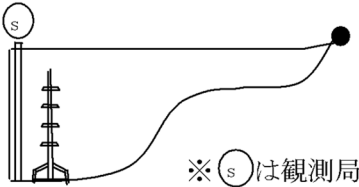
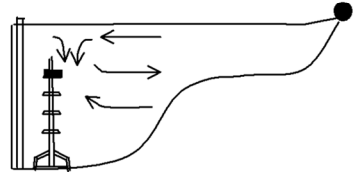
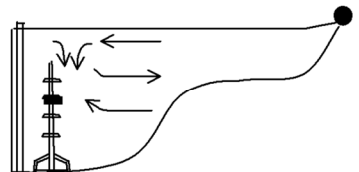
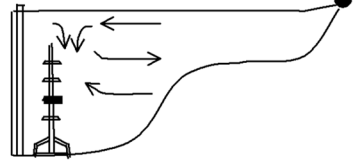
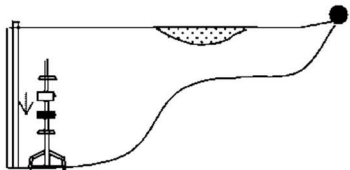
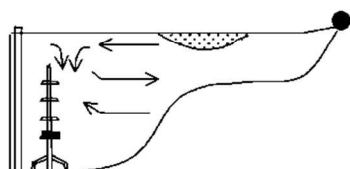
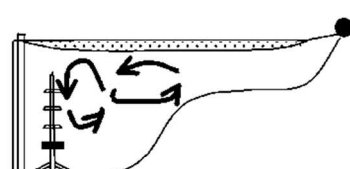
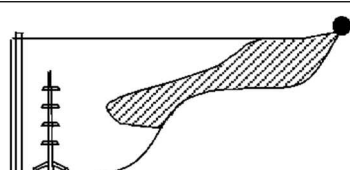
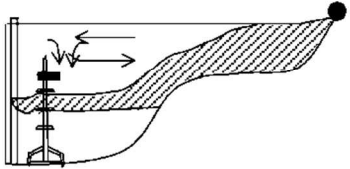
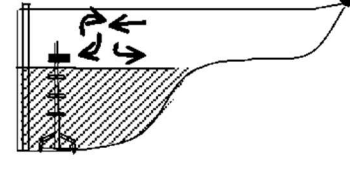
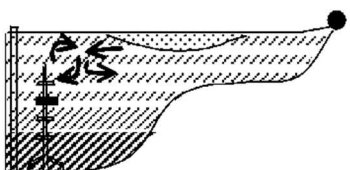
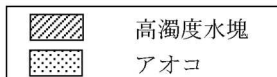
運用モード		水理水質概要	曝気運用	解説	取水
(a) 非稼働期間 (循環期間)			・ 停止 (10/1～3/31) ・ 水の華非発生期間	能性がない期間では稼働を停止する。	選択取水表層
(b) 平常時 (成層期)	4月1日 ～ 4月31日		・ 吐出口No. 1 (水深10m)	・ 曝気運転開始 アオコ発生可能性を示す「表層pH」が8.5を超え始める (盛夏に向け深い水深での吐出をするため貯熱をする)	選択取水表層
	5月1日 ～ 6月14日		・ 吐出口No. 2 (水深15m)	・ アオコの抑制及び冷水に対し配慮した水深にて吐出を行う。	
	6月15日 ～ 9月30日		・ 吐出口No. 3 (水深25m)		

表 5.14 弥栄ダムにおける気泡式循環施設の運用ルール事例(2)

運用モード	水理水質概要	曝気運用	解説	取水	
(c) 水の華対応	水の華微発生時 (9月以前)		・ 吐出口層を一段下げる	・ 水温が23℃以上であり (水温条件ではアオコが 想像となり発生する可 能性あり)、 成層強度 ≥ 0.01 または 表層pH ≥ 8.5 が3日 $\geq$ 続く場合	選択取水 表層
	水の華微発生時 (9月以降)		・ 吐出口No. 4 (EL. 63m)	・ 9月以降にアオコ発生 の可能性がある場合 成層強度 ≥ 0.01 または 表層pH ≥ 8.5 が3日 $\geq$ 続く場合	選択取水 表層
	全面水の華発生時		・ 吐出口No. 4 (EL. 63m)	・ 水温低減効果により、 水の華の増殖及びそれ に起因する泡の発生を 抑える。 表層pH ≥ 9.0 かつ 表層水温25℃以上	選択取水 表層
(d) 濁水対応	出水直後		・ 曝気停止	・ 出水の感知 (日平均流入量25m ³ /s以上)	選択取水 一出水前の 吐出水深
	濁水浸入時		・ 清涼層が有れば その層より曝気 を行う	・ 流入水が濁っている状態 (日平均流入量25m ³ /s以上)	選択取水 一出水前の 吐出水深
	濁水存在時		・ 清涼層が有れば その層より曝気 を行う	・ 出水時流入濁度の沈降 確認(ダムサイト濁度)	選択取水 表層
濁水及び水の華対応		・ 曝気開始 (吐出口No. 1:平均 的に水の華を抑 制出来ると見込 まれる)	・ 水の華危険度確認 成層強度 ≥ 0.04 表層pH ≥ 8.5 ・ 出水時流入濁度が未沈降 吐出口No. 1(水深10m) 以浅の濁度 ≥ 25 度	選択取水 表層	



弥栄ダムでは、以上に示した運用ルールに基づいた気泡式循環施設の運用を行った結果、アオコの発生がみられなくなった。しかし、本運用ルールに基づいた実際の運用では、吐出深度の切り替えが頻繁かつ煩雑になるなど、実務上の課題が生じたことから、運用方法を簡素な形に変更した簡易版を作成し、本ルールに切り替えた(表 5.15)。

表 5.15 弥栄ダムにおける気泡式循環施設の運用ルール見直し事例

			吐出No	E. L (m)
			No. 1	水深10m
			No. 2	水深15m
			No. 3	水深25m
			No. 4	E. L63m

【通常稼働条件】	
稼働期間	4/1-10/31

＜運用ルール＞

※曝気吐出口切り替えは切り替えようとする吐出口ELで濁度25度以上でないことを確認して行う。

※曝気吐出口を切り替え戻しは、水温20℃以下が3日間連続を満たしているか確認して行う。

※表層水温、表層pH、成層強度はダムサイト10:00データを用いる。

時期	表層水温	表層pH 成層強度	曝気運用
4/1-4/30	通常時		4基No. 1
	23℃以上	表層pH8.5以上、または 成層強度0.04S-1以上が連続3日間以上	4基No. 2
5/1-6/14	通常時		4基No. 2
	23℃以上	表層pH8.5以上、または 成層強度0.04S-1以上が連続3日間以上	4基No. 3
6/15-10/31	通常時		4基No. 3
	23℃以上	表層pH8.5以上、または 成層強度0.04S-1以上が連続3日間以上	4基No. 4
	25℃以上	—	4基No. 4
アオコ発生時	25℃以上	表層pH9.3以上	4基No. 4

【出水時停止条件】

以下の条件に該当する場合は曝気運転を停止する。

条件項目	基準値
前日、当日平均流入量	44m ³ /s以上

【出水後曝気再開条件】

条件項目	基準値
濁度	濁度25度以下の吐出口から順次再開する

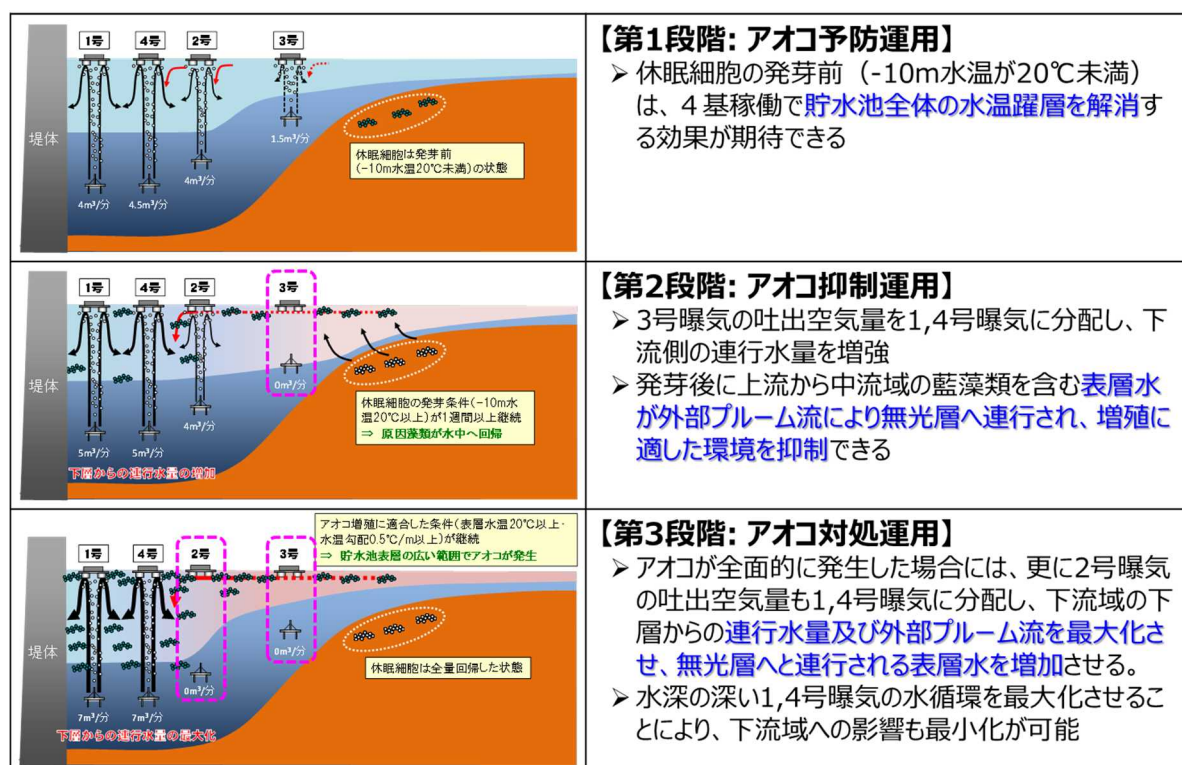
※再開後は、通常運用ルールに従って運用する。

5-9. モニタリング調査計画の立案に係る有益な事例

5-9-1. 田瀬ダムにおける実証運用時調査計画の立案事例

田瀬ダムでは、*Microcystis* 属によるアオコ現象や *Anabaena* 属によるカビ臭現象が発生し景観障害や利水障害が顕在化していた。このため、気泡式循環施設を段階的に導入（当初に3基を導入して効果確認を継続し、10年後に1基追加して計4基で運用）してアオコ及びカビ臭発生抑制対策を進めた。ここでは、気泡式循環施設を4基に増設した際に設定した運用ルール(図 5.36)に基づく効果確認のために計画された実証運用時調査の内容について紹介する。

田瀬ダムにおける実証運用時調査は、図 5.37 に示す通りであり、調査に関しては①水温連続観測、②貯水池縦断鉛直調査、③貯水池流向・流速調査が実施されている。



	1号装置	4号装置	2号装置	3号装置	合計吐出量
第1段階：アオコ予防運用	4 m ³ /min	4.5 m ³ /min	4 m ³ /min	1.5 m ³ /min	14 m ³ /min
第2段階：アオコ抑制運用	5 m ³ /min	5 m ³ /min	4 m ³ /min	0 m ³ /min	14 m ³ /min
第3段階：アオコ対処運用	7 m ³ /min	7 m ³ /min	0 m ³ /min	0 m ³ /min	14 m ³ /min

図 5.36 田瀬ダムにおける気泡式循環施設の運用ルール

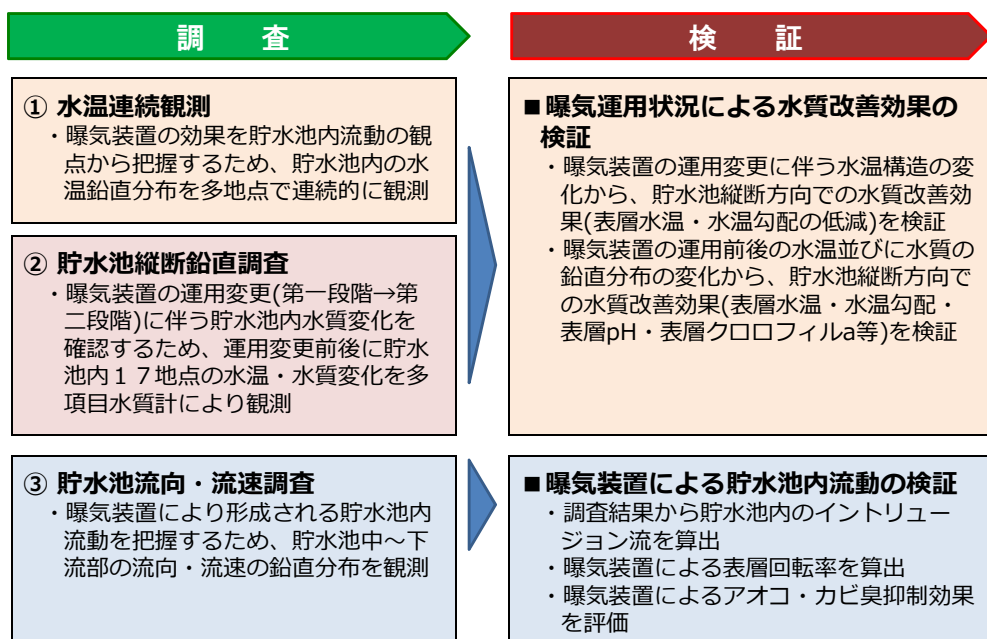


図 5.37 田瀬ダムにおける実証運用時調査と調査を用いた検証の関係

(1) 水温連続観測

貯水池内6地点に自記録式水温計を深度方向に複数個設置し、貯水池内水温鉛直分布の経時変化を連続的に計測する(図 5.38)。これにより、気泡式循環施設の稼働による循環混合の経時的变化や面的分布について把握し、水質改善効果を検証する。



図 5.38 田瀬ダムにおける水温連続観測事例 水温計設置位置と設置方法

(2) 貯水池縦断鉛直調査

気泡式循環施設の運用段階を変更するタイミングで貯水池内 17 地点の水質鉛直分布(水温、pH、濁度、DO、クロロフィル a)を計測し(図 5.39)、運用変更による水質変化を把握することで、水質改善効果を検証する。調査を実施するタイミングは、運用変更前、変更直後(1 日後)、変更 7 日後、変更 14 日後の計 4 回である。

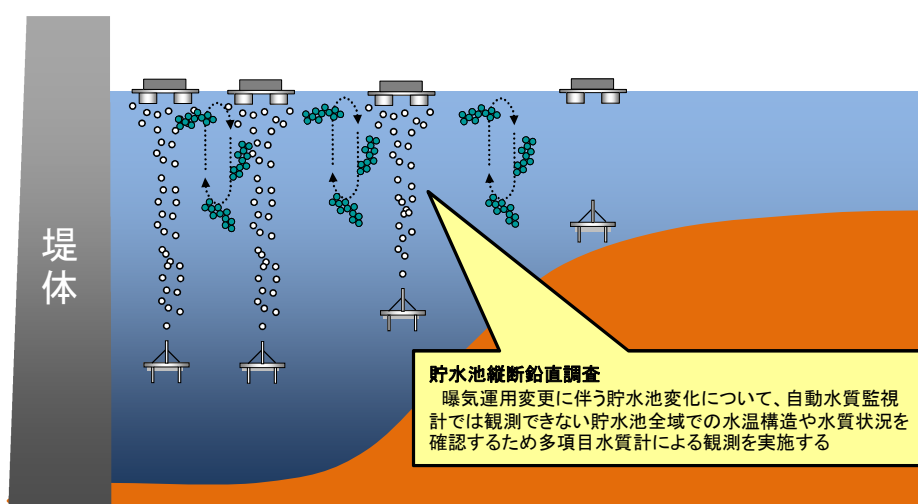
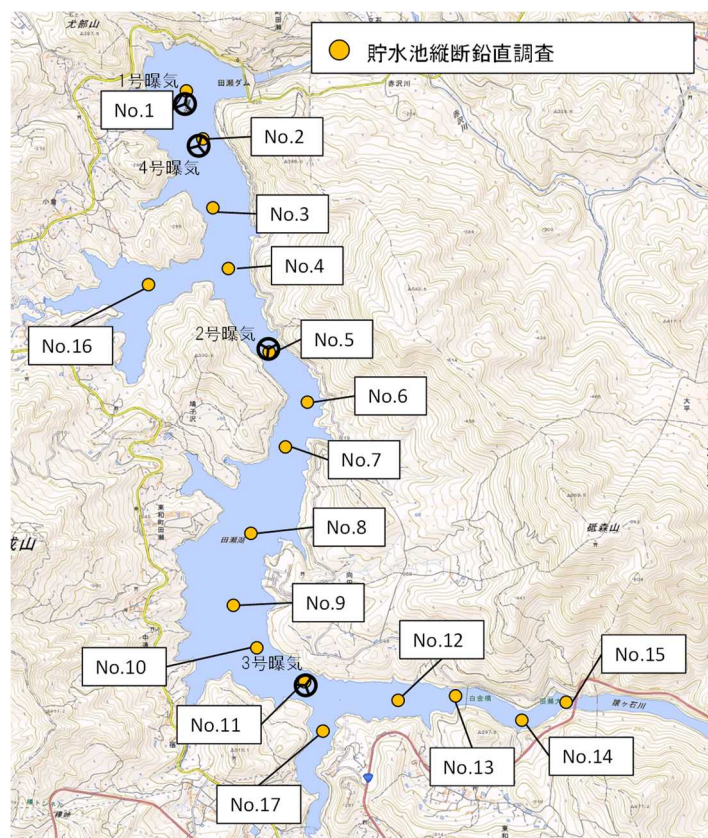


図 5.39 田瀬ダムにおける貯水池縦断鉛直調査事例 調査位置及び概念図

(3) 貯水池流向・流速調査

気泡式循環施設の運用期間中にドップラー式超音波流向流速計(ADCP)により湖内の流向及び流速を計測し(図 5.40)、イントリュージョン(貫入流)の貫入深度や範囲を把握するとともに、水質シミュレーションによる湖内流動の再現状況の確からしさを確認し、運用ルールの妥当性を検証する。

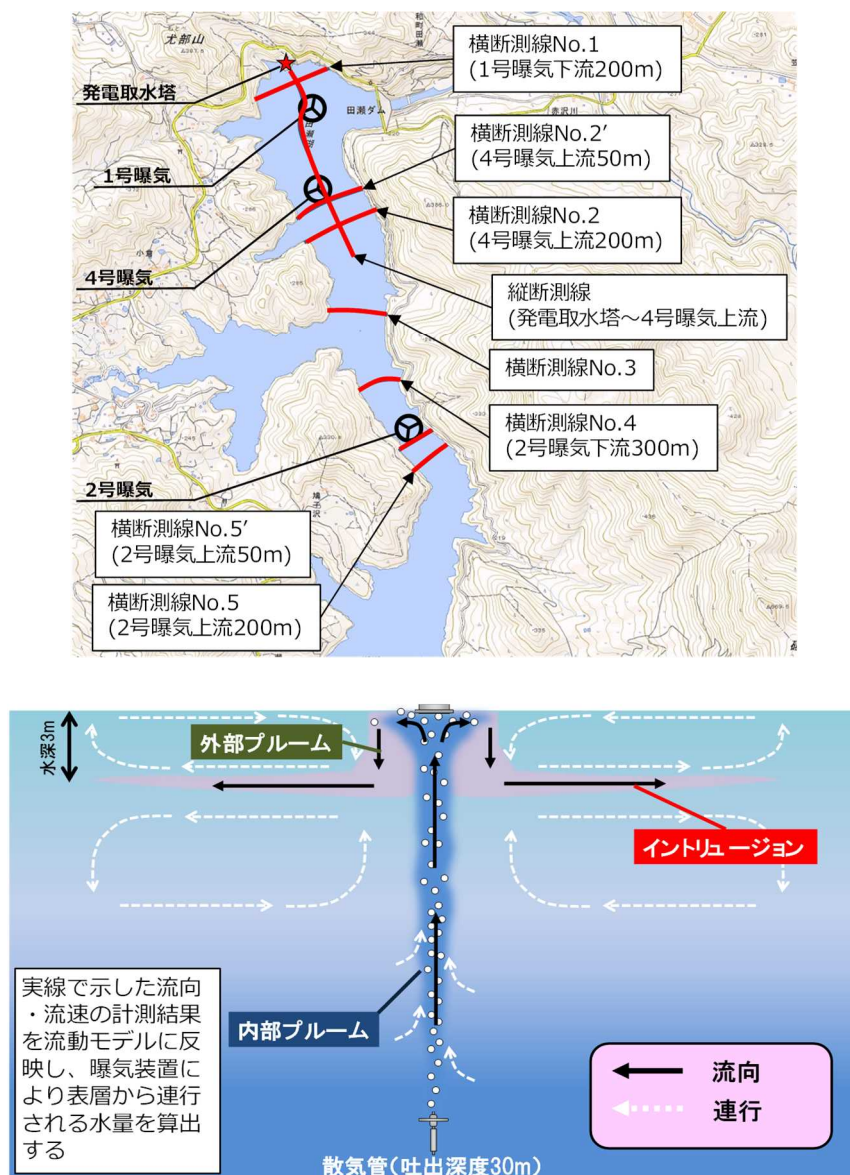


図 5.40 田瀬ダムにおける流向・流速調査 調査位置と調査内容

5-9-2. 鹿野川ダムにおける実証運用時調査計画の立案事例

鹿野川ダムでは、*Microcystis* 属等によるアオコ現象が発生し景観障害や利水障害が顕在化していた。このため、気泡式循環施設を3基導入して水質改善を図った。ここでは、気泡式循環施設の運用による水質改善効果を確認するための実証運用時調査の内容について紹介する。なお、実証運用時調査計画の立案事例として掲載するモニタリング計画は、平成21年度以前に立案された計画である。実際の調査項目等については、より適切に気泡式循環施設の効果が評価可能となるよう年度ごとに見直し等を行っている。

鹿野川ダムにおける実証運用時調査は、①水温多層連続調査、②水質改善効果把握調査の2種類が実施されている。

(1) 水温多層連続調査

気泡式循環施設稼働前後の湖水の流動状態を把握するため、貯水池内の水温を連続的に観測する。鹿野川ダムでは、流況変化(出水時)や気温変化(気温低下)に伴う湖内流動の変化は、昼間に実施される定期水質調査からだけでは把握できないこと、中層部からのDO供給と流動促進が水質改善に大きく及ぼすことが既往検討から明らかになっていることから、表5.16及び図5.41に示す集中的な調査を実施している。

表 5.16 鹿野川ダムにおける水温多層連続調査 概要

観測地点	観測水深	観測方法	観測期間
貯水池内3ヶ所 ・ダムサイト ・中央部 ・上流部	・ダムサイトと中央部 0, 1, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30m, B+1m の11地点 ・ダム上流5水深 計27地点	自記録式水温計を用いて、貯水池内水温鉛直分布の自動観測を行う。	・4月～3月の1年間 ・1時間ピッチの連続観測 ・2ヶ月に1回引き上げ データ処理・メンテナンス
流入河川1地点 ・ ・ ・	・各地点1ヶ所の3地点	自記録式水温計を用いて、流入水温の自動観測を行う。	・4月～3月の1年間 ・1時間ピッチの連続測定 ・2ヶ月に1回引き上げ データ処理・メンテナンス
・ダム直下1地点	・ダム直下地点に1ヶ所設置	自記録式水温計を用いて、放流水温の自動観測を行う。	・4月～3月の1年間 ・1時間ピッチの連続測定 ・2ヶ月に1回引き上げ データ処理・メンテナンス

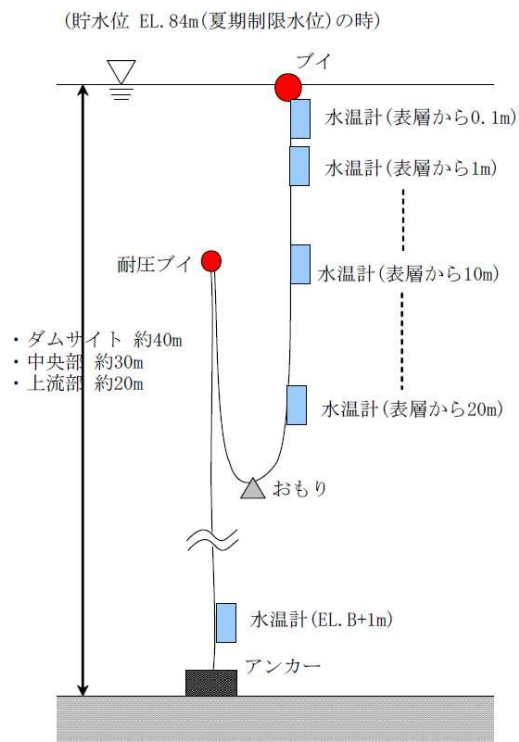


図 5.41 鹿野川ダムにおける貯水池内の自記録式水温計の設置イメージ

(2) 水質改善効果把握調査

春～秋季に貯水池内で発生するアオコの原因となる *Microcystis* 属等の挙動を把握し、気泡式循環施設稼働前後の貯水池内水平・鉛直方向及び時期的な植物プランクトンの発生状況を把握するとともに、中～下層のDO改善効果や鉄、マンガン、栄養塩等の溶出抑制効果を把握することを目的に、表 5.17 に示す集中的な調査を実施している。

表 5.17 鹿野川ダムにおける水質改善効果把握調査 概要

観測地点	観測水深	観測方法	観測期間
・貯水池内水平方向 5 地点 ・鉛直方向 各地点 5 水深 計 25 ポイント	・水温, DO, pH, EC・・・ 各地点毎回計測機器にて鉛直方向に 1m ビッチで測定 ・クロロフィル a・・・ 毎回各ポイントとも採水分析(検体数 25 ポイント×9 回=225 検体) ・植物プランクトン定量・・・各月 1 回とし 3 地点(ダムサイト, 中央部, 上流部)表層のみ採水分析(検体数 3 地点×9 回=27 検体) ・COD, T-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, T-P, PO ₄ -P・・・ 毎回 3 地点(ダムサイト, 中央部, 上流部)で 5 水深採水分析(検体数 15 ポイント×9 回=135 検体)	・水温, DO は機器測定 ・クロロフィル a, 植物プランクトン定量, 各水質項目は、採水器にて採水	・4 月～12 月に実施 ・各月 1 回の計 9 回

(3) 段階的モニタリング計画

鹿野川ダムでは、気泡式循環施設を設置初年度に3基、翌年に2基と段階的に整備することとなったことから、これを利用して段階的稼動による水質改善効果の発現状況の違いを把握できるよう段階的モニタリング計画を立案した。また、気泡式循環施設の効率的な運転方法の確立に向けて、運用方法を各年で変更する等の工夫も行っている(表 5.18)。

表 5.18 鹿野川ダムにおける気泡式循環施設導入後の段階的モニタリング計画

設置 順	H21年度			H22年度			H23年度			H24年度			備考
	4月	10月	3月	4月	10月	3月	4月	10月	3月	4月	10月	3月	
散気管 の運転 台数	1	6 12		4 12			4 12			4 12			・ 運転台数制御 ・ コンプレッサー 出力制御 ・ 夜間運転停止 などの効率化が考えら れる
	2	8 12		4 12			4 12			4 12			
	3	8 12		4 12			4 12			4 12			
	4			4 12			4 12			6 9			
	5			4 12			4 12			6 9			
調査の目的	・ 運転前後の水質・流動比較 ・ ポートコースへの影響把握 のための基礎調査			・ 5台フル運転での水質・流動 確認(1年目) ・ 実運転時の問題点など把握			・ 5台フル運転での水質・流動 確認(2年目) ・ 運転期間の確認			・ 効率化運転 (3台→5台→3台など)での 水質改善効果確認 ・ 運転方法の確立			
調査項目													
曝気循環施設 の流動変化 モニタリング (水温連続調 査)	←			期間中、同じ地点で連続的に実施する						→			水温データは基礎情報 として全期間必要
水質改善効果 把握調査	第 1 期 間 ← 当初の地点・項目で調査を実施						第 2 期 間 ← 地点・項目を絞り込んで実施						2年目までで全域での 効果が確認されれば3 年目以降は調査内容を 絞り込む
ポートコース への影響把握 調査	← 初年度のみ実施			←.....→ 必要に応じて実施									補足調査が必要であれ ば、2年目も実施
初期運転時の 事前調査	6 8 夏期に運転開始する場合には、 必ず実施する			春先からの運転開始で、低水 温・低DO揚水の問題は生じない			同左			同左			初年度の運転開始が夏 期となる場合は、成層 状況を見て秋以降の運 転開始にずらす必要あ り

5-10. 対策効果発現状況の確認に係る有益な事例

5-10-1. 田瀬ダムにおける富栄養化現象の抑制状況の確認事例

田瀬ダムでは、気泡式循環施設の稼働によるアオコ現象の抑制状況を確認する方法として、湖面巡視結果を図 5.42 のように整理し、気泡式循環施設の導入や運用変更、増設によりアオコ発生期間が短縮していることを示している。

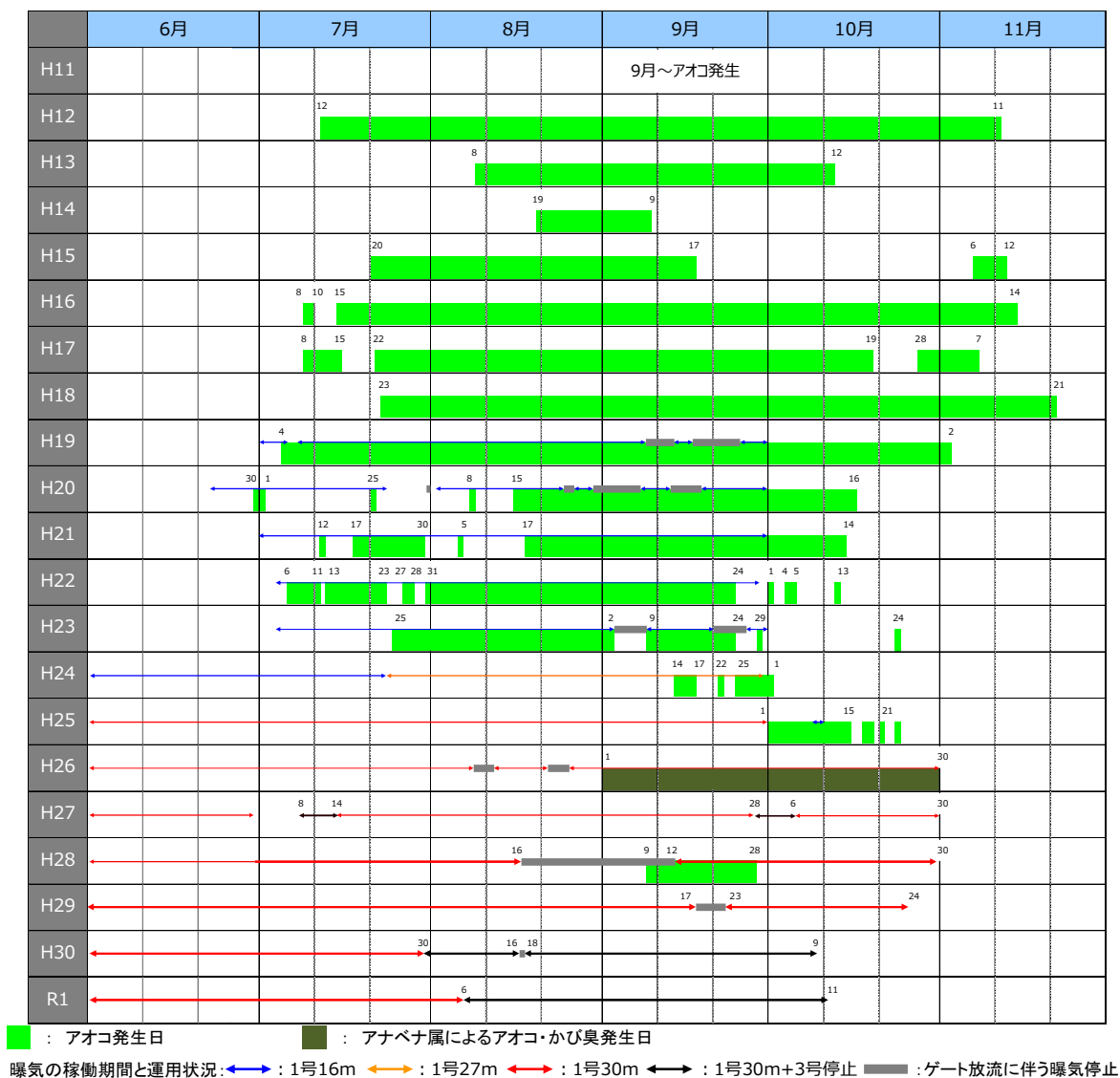


図 5.42 田瀬ダムにおける富栄養化現象の抑制状況の確認事例

5-10-2. 三春ダムにおける富栄養化現象改善の指標値の達成状況の確認事例

三春ダムでは、アオコ現象の管理目標値としてクロロフィル a 濃度の年最大値：30 $\mu\text{g/L}$ を設定している。これに対して、毎月実施される水質調査におけるクロロフィル a 濃度を時系列で整理し(図 5.43)、その達成状況を評価している。

また、この結果を経年的にも整理することで、対策による効果の達成状況が年によりどの

程度違いがあるかについても評価している(図 5.44)。三春ダムでは、気泡式循環施設の空
気吐出深度を平成 13 年から一律 EL. 309m とする運用変更を行っているが、それ以降、目標
値を超過する年が多いものの、年最大値が運用ルール変更前よりも低くなっていることが分
かる。

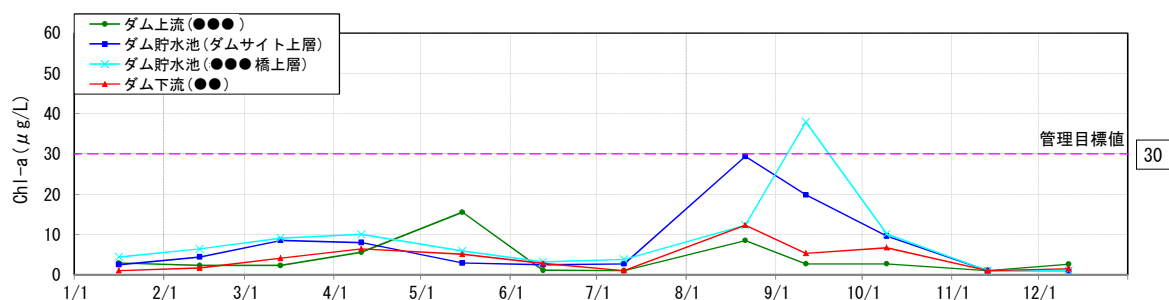


図 5.43 三春ダムにおける富栄養化現象改善の指標値の達成状況の確認事例(経月変化の整理)

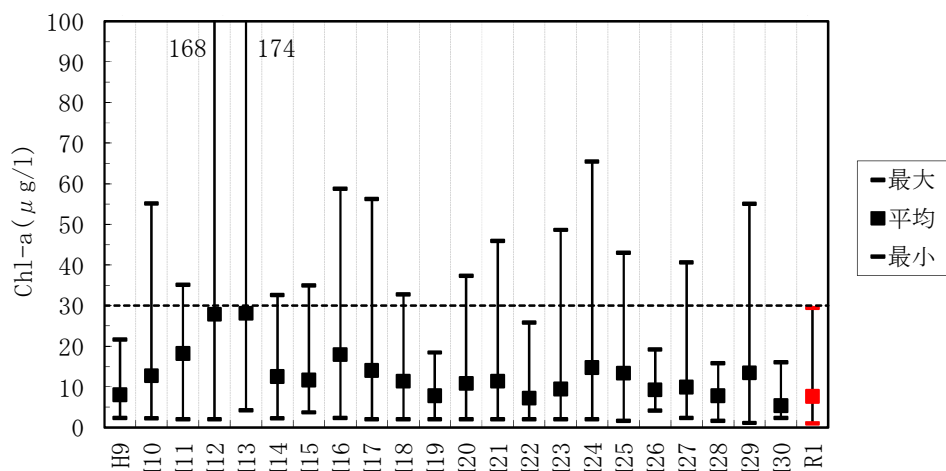


図 5.44 三春ダムにおける富栄養化現象改善の指標値の達成状況の確認事例(経年変化の整理)

5-10-3. 田瀬ダムにおける気泡式循環施設の機能の確認事例

田瀬ダムでは、気泡式循環施設の機能を確認する方法として、日最高表層水温と日最高水
温勾配に着目した効果確認を行っている。田瀬ダムでは、既往検討から表層水温 20℃以上
且つ水温勾配 0.5℃/m 以上となるとアオコ発生リスクが高くなることが確認されており、気
泡式循環施設の稼働により、その環境がどの程度解消されているかを図 5.45 に示すような
散布図を作成することで確認している。

当該ダムでは、アオコ発生リスクに応じて気泡式循環施設の運用方法を変更しているが、
第 1 段階から第 2 段階に運用方法を変える(図 5.36)ことで、同じ表層水温でも水温勾配を
小さくすることができており、これによりアオコ発生リスクを低減させることができてい
ると評価できる。

なお、この整理を貯水池内の複数地点で実施することにより、地点による効果の違いを明らかにすることも可能である。

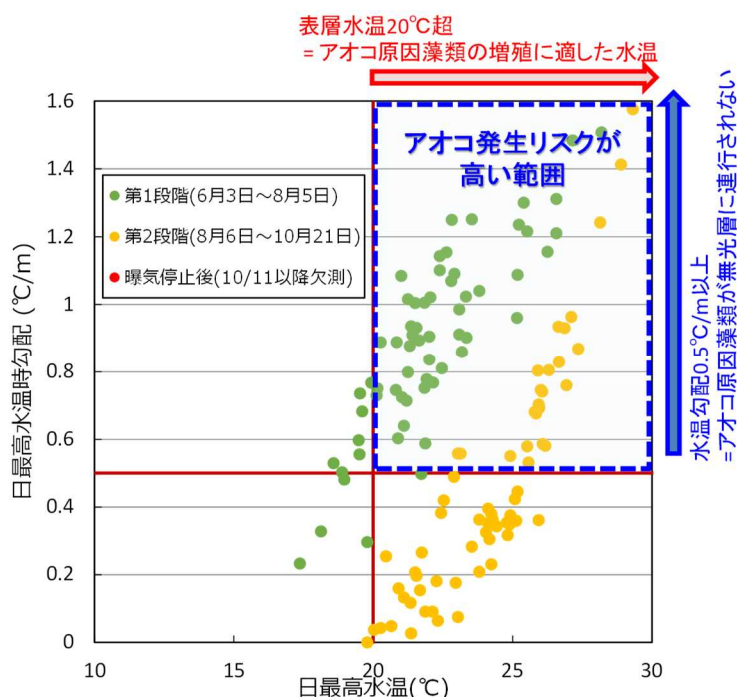


図 5.45 田瀬ダムにおける気泡式循環施設の機能確認事例

【5 章の参考文献】

- 1) Brian A Whitton, Malcolm Potts: The Ecology of Cyanobacteria – Their Diversity in Time and Space – , Kluwer Academic Publishers, 2000
- 2) Luuc R Mur, Olav M Skulberg, Hans Utkilen : Toxic Cyanobacteria in Water, WHO, 1999
https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/toxiccyanobact/en/
- 3) H Imai, K Chang, M Kusaba, S Nakano : Temperature-dependent dominance of Microcystis (Cyanophyceas) species: *M. aeruginosa* and *M. wesenbergii* Journal of Plankton Research Vol. 31, No. 2 , pp. 171-178, 2009
- 4) 小川文章, 對馬育夫, 村田里美, 服部啓太 : 底層環境に着目した停滞性水域の水環境管理技術に関する研究 (藻類増殖に関与する水質項目の影響評価) , 平成 30 年度 研究開発プログラム報告書 (13. 地域の水利用と水生生態系の保全のための水質管理技術の開発) , 国立研究開発法人土木研究所, 22-25, 2019
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2018/pdf/pro-13.pdf>
- 5) 中島進, 八木正一 : *Oscillatoria tenuis* の増殖と MIB 産生に必要な鉄の形態についての検討, 日本水処理生物学会誌, Vol. 26 , No. 2, pp. 56-60, 1990
- 6) 夏池真史, 菊地哲郎, Lee Ying Ping, 伊藤紘晃, 藤井学, 吉村千洋, 渡部徹 : 自然水中

- における鉄の化学種と生物利用性 -鉄と有機物の動態からみる森・川・海のつながり-, 水環境学会誌, Vol. 39, No. 6, pp.197-210, 2016
- 7) 水理公式集[2018 年版] : 土木学会, pp790
 - 8) Colin Reynolds : Ecology of Phytoplankton, 2006
 - 9) Ingrid Chorus, Jamie Bartram : Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management, WHO, 1999
 - 10) 今本博臣, 田作光良, 古里栄一 : 曝気循環によるアオコ・カビ臭抑制の効果検証 -9 ダム貯水池の実証実験結果から -, ダム工学, Vol23(4), pp278-289, 2013
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsde/23/4/23_278/article/-char/ja/
 - 11) 秋山優, 有賀祐勝, 坂本充, 横浜康継 : 藻類の生態, 1973
 - 12) 浅枝隆, 池田裕一, Jorg Imberger : 不連続な密度界面をもつ成層中における Bubble Plume の挙動と成層の時間推移, 土木学会論文集, No. 438/ II -17, p p 23-30, 1991
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1991/438/1991_438_23/article/-char/ja/
 - 13) 後藤浩一, 古里栄一, 浅枝隆 : 藍藻類の増殖抑制効果に対する曝気循環対策の施設規模の影響, 水工学論文集, 第 52 巻, 2008 年 2 月
https://www.jstage.jst.go.jp/article/prohe1990/52/0/52_0_1297/article/-char/ja/
 - 14) 古里栄一, 曹磊, 久納誠, 今本博臣, 奥西将之, 前田広人 : 気泡式循環対策の必要施設規模指標に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 75, No. 2, I _691- I _696, 2019
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/75/2/75_I_691/article/-char/ja/
 - 15) 丹羽薫, 久納誠, 久保徳彦, 真田誠至 : 流動制御システムに関する実験, 土木研究所資料第 3375 号, 101-102, 1995

— 索 引 —

あ

アオコ …4, 1-1, 2-1, 2-2, 2-3, 2-5, 2-6, 2-7, 2-8, 2-9,
2-10, 2-11, 2-16, 2-18, 2-28, 2-31, 3-5, 3-6, 3-7,
3-8, 3-9, 3-10, 3-13, 3-15, 3-16, 3-18, 3-19, 3-20,
3-22, 3-23, 3-26, 3-40, 3-41, 3-51, 3-57, 4-1, 4-6,
5-1, 5-7, 5-13, 5-15, 5-16, 5-17, 5-19, 5-20, 5-21,
5-22, 5-25, 5-26, 5-27, 5-28, 5-31, 5-32, 5-59,
5-61, 5-62, 5-66, 5-67, 5-70, 5-71, 5-73
アオコレベル3-11, 3-13, 3-18, 3-20, 3-40, 5-28, 5-29
アキネート ……2-8, 2-9, 5-22, 5-24, 5-26
Anabaena2-2, 2-3, 2-4, 3-15, 3-41, 5-2, 5-3, 5-8, 5-9,
5-19, 5-22, 5-23, 5-24, 5-26, 5-28, 5-31, 5-47,
5-62
Aphanizomenon ……2-2, 2-4, 2-7, 2-8, 5-6, 5-8, 5-9

い

維持管理 ……7, 1-4, 2-23, 3-2, 3-29, 3-31, 3-34, 3-42,
3-44, 3-45, 3-46, 3-49, 3-50, 3-52, 3-54, 5-48,
5-51
一次躍層 ……2-25, 2-28
イントリュージョン ……2-25, 5-65

う

運用ルール …6, 8, 3-2, 3-25, 3-37, 3-42, 3-43, 3-44,
3-45, 3-48, 5-55, 5-56, 5-57, 5-58, 5-59, 5-60,
5-61, 5-62, 5-65, 5-71

お

Oscillatoria ……2-2, 5-19, 5-72
温水放流 ……4-1, 4-2

か

ガス胞 ……2-7, 2-8, 2-26, 2-27, 2-28, 5-32
カビ臭 …4, 8, 1-1, 2-1, 2-2, 2-5, 2-6, 2-7, 2-11, 2-12,
2-13, 2-14, 2-15, 2-16, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9,
3-10, 3-11, 3-13, 3-15, 3-21, 3-23, 3-26, 3-40,
3-41, 3-51, 4-6, 5-19, 5-22, 5-25, 5-26, 5-27, 5-31,
5-36, 5-37, 5-38, 5-39, 5-40, 5-56, 5-57, 5-62,
5-73

き

気泡式循環施設 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 1-1, 1-2, 1-3, 1-4,
2-1, 2-5, 2-11, 2-20, 2-21, 2-22, 2-23, 2-24, 2-25,
2-26, 2-28, 2-29, 2-30, 2-31, 3-1, 3-2, 3-6, 3-7,
3-8, 3-10, 3-11, 3-12, 3-23, 3-24, 3-25, 3-26, 3-27,
3-28, 3-29, 3-30, 3-31, 3-32, 3-33, 3-35, 3-37,
3-38, 3-40, 3-41, 3-42, 3-43, 3-44, 3-45, 3-46,
3-47, 3-48, 3-49, 3-50, 3-51, 3-52, 3-53, 3-54,
3-55, 3-56, 4-1, 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6, 4-7, 5-19,
5-28, 5-31, 5-34, 5-35, 5-36, 5-41, 5-42, 5-43,
5-44, 5-45, 5-48, 5-49, 5-51, 5-52, 5-54, 5-55,
5-56, 5-57, 5-58, 5-59, 5-60, 5-61, 5-62, 5-63,
5-64, 5-65, 5-66, 5-67, 5-68, 5-69, 5-70, 5-71,
5-72

休眠細胞 ……2-8, 5-31

く

空気圧縮 8, 2-23, 2-24, 3-28, 3-31, 3-33, 3-35, 3-50,
3-51, 3-52, 3-55, 5-48, 5-49, 5-50, 5-51
空気吐出 …8, 2-1, 2-21, 2-23, 2-24, 2-25, 2-28, 3-12,
3-24, 3-25, 3-27, 3-28, 3-33, 3-35, 3-50, 3-54, 4-1,

4-4, 4-5, 5-41, 5-42, 5-45, 5-56, 5-71

クロロフィル a ……2-9, 2-11, 2-26, 3-11, 3-13, 3-16,

3-17, 3-26, 3-32, 3-40, 3-41, 5-28, 5-29, 5-31,

5-43, 5-64, 5-70

さ

散気 8, 1-3, 2-20, 2-21, 2-23, 2-24, 3-33, 3-35, 3-50,

5-36, 5-50, 5-52, 5-53, 5-54

し

ジェオスミン ……2-2, 2-6, 2-11, 3-21

シミュレーション ……3-8, 3-9, 3-10, 3-23, 3-25, 3-26,

3-30, 3-31, 3-32, 3-37, 3-41, 3-42, 3-43, 3-50, 4-4,

5-28, 5-34, 5-41, 5-44, 5-57, 5-65

Pseudanabaena ……2-4, 2-11, 2-12, 3-15, 5-37, 5-38

循環 ……1, 4, 5, 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-6, 2-1, 2-20, 2-21,

2-23, 2-24, 2-26, 2-27, 2-28, 2-29, 2-31, 2-32, 3-1,

3-2, 3-10, 3-11, 3-12, 3-22, 3-23, 3-24, 3-25, 3-27,

3-28, 3-29, 3-30, 3-31, 3-32, 3-35, 3-40, 3-41,

3-45, 3-48, 3-51, 3-52, 3-54, 4-1, 4-2, 4-4, 4-5,

4-6, 4-8, 5-7, 5-13, 5-17, 5-19, 5-31, 5-34, 5-36,

5-41, 5-42, 5-43, 5-44, 5-45, 5-49, 5-55, 5-56,

5-57, 5-59, 5-62, 5-63, 5-66, 5-68, 5-70, 5-71,

5-73

植物プランクトン 2-1, 2-26, 2-27, 3-5, 3-6, 3-8, 3-13,

3-25, 3-27, 3-41, 3-54, 3-58, 4-5, 5-3, 5-4, 5-6,

5-8, 5-9, 5-10, 5-13, 5-17, 5-26, 5-57, 5-67

真光層 ……2-26, 2-27, 3-27, 5-32

す

水温 7, 1-2, 2-5, 2-7, 2-8, 2-9, 2-10, 2-20, 2-25, 2-26,

2-28, 2-29, 2-30, 2-32, 3-11, 3-12, 3-13, 3-21,

3-22, 3-23, 3-24, 3-28, 3-29, 3-30, 3-37, 3-41,

3-51, 3-55, 4-1, 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-8, 5-4, 5-5,

5-6, 5-7, 5-19, 5-20, 5-21, 5-23, 5-26, 5-27, 5-31,

5-32, 5-36, 5-40, 5-42, 5-43, 5-45, 5-46, 5-47,

5-55, 5-56, 5-62, 5-63, 5-64, 5-66, 5-67, 5-71

スカム ……2-3, 2-6, 2-9

せ

選択取水設備 ……4, 1-4, 1-6, 2-31, 4-7, 5-34

そ

送気管 ……8, 2-23, 2-24, 3-33, 3-51, 3-55, 5-48, 5-49,

5-50, 5-51, 5-52, 5-53, 5-54

た

対策検討 ……6, 1-4, 1-6, 3-1, 3-2, 3-8, 3-40, 3-46, 3-54,

5-35

濁水長期化 ……3-28, 4-4, 4-5

ち

窒素 ……2-1, 3-8, 5-1, 5-2, 5-32

て

底層嫌気化 ……1-2, 2-1, 4-5, 4-6

と

毒素 ……2-6, 2-16, 2-18, 2-31, 5-17

Dolichospermum ……2-2, 2-3, 2-4, 2-6, 2-8, 3-15, 5-6

トレードオフ ……2-31, 4-1, 4-4

は

発生要因 ……6, 7, 8, 1-4, 3-1, 3-2, 3-5, 3-8, 3-23, 3-46,

5-22, 5-32

ふ

フィコシアニン ……3-16, 3-57
富栄養化 1, 4, 6, 8, 9, 10, 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 2-1, 2-5,
2-6, 2-20, 2-28, 2-31, 3-1, 3-2, 3-5, 3-6, 3-8, 3-9,
3-11, 3-12, 3-16, 3-17, 3-23, 3-25, 3-26, 3-30,
3-37, 3-40, 3-41, 3-46, 3-47, 3-51, 4-1, 4-4, 4-8,
5-13, 5-14, 5-15, 5-17, 5-42, 5-70, 5-71
Phormidium 2-2, 2-4, 2-11, 2-12, 3-15, 3-16, 5-19,
5-36, 5-37, 5-38, 5-39, 5-47, 5-56, 5-57, 5-58

ほ

補償深度 ……2-28, 3-27, 3-28, 5-41

み

Microcystis 2-2, 2-3, 2-4, 2-6, 2-7, 2-8, 2-10, 2-16,
2-31, 3-15, 3-16, 3-18, 3-20, 3-22, 3-41, 5-1, 5-3,
5-4, 5-5, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-13, 5-19, 5-28, 5-31,
5-32, 5-45, 5-47, 5-59, 5-62, 5-66, 5-72

も

モニタリング ……6, 7, 8, 3-2, 3-25, 3-37, 3-38, 3-39,
3-40, 3-42, 3-43, 3-45, 3-46, 3-49, 5-17, 5-55,

5-59, 5-62, 5-66, 5-68, 5-69

や

躍層 2-1, 2-7, 2-25, 2-26, 2-27, 2-28, 3-23, 3-24, 3-28,
3-29, 3-30, 4-4, 4-5, 4-8, 5-23, 5-43, 5-44, 5-50,
5-55, 5-56

ら

藍藻類 6, 7, 10, 1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6,
2-7, 2-8, 2-9, 2-10, 2-11, 2-12, 2-16, 2-18, 2-20,
2-24, 2-26, 2-27, 2-28, 2-30, 2-31, 3-5, 3-6, 3-7,
3-8, 3-9, 3-10, 3-11, 3-13, 3-15, 3-16, 3-18, 3-21,
3-22, 3-23, 3-24, 3-26, 3-27, 3-41, 3-51, 4-1, 4-4,
4-6, 4-7, 4-8, 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9,
5-10, 5-11, 5-13, 5-15, 5-17, 5-19, 5-23, 5-26,
5-31, 5-32, 5-47, 5-55, 5-73

り

リン 2-1, 3-8, 3-37, 3-38, 3-39, 3-45, 3-49, 3-52, 5-1,
5-2, 5-3, 5-18, 5-19, 5-20, 5-21, 5-32