

# 気候変動による湖沼の水環境への 影響評価・適応策検討に係る手引き

令和3年3月

環境省 水・大気環境局 水環境課



## はじめに

国内の湖沼は環境基準達成のため、昭和 59 年に制定された湖沼水質保全特別措置法等に基づき、汚濁負荷削減対策等により、水質改善の取組が進められています。しかし、湖沼における水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準のうち、令和元年度時点での COD の達成状況は 50.0%、全窒素及び全りんは 49.2%であり、河川や海域と比較して低い状況にあるとともに、近年では横ばいの傾向が続いています。

また、平成 28 年には底層溶存酸素量が新たに水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準に追加されました。これは水域の底層を生息域とする魚介類等の水生生物やその餌生物が生存できることはもとより、それらの再生産が適切に行われることにより、底層を利用する水生生物の個体群が維持できる場を保全・再生することを目的としています。

しかし、湖沼をとりまく状況は変わってきています。近年において、地球の気温の上昇、大雨の頻度の増加や、農作物の品質の低下、動植物の分布域の変化、熱中症リスクの増加など、気候変動による影響が全国各地で現れており、さらに今後、長期にわたり拡大するおそれがあります。

気候変動に対処し、国民の生命・財産を将来にわたって守り、経済・社会の持続可能な発展を図るためには、緩和（温室効果ガスの排出削減等）に全力で取り組むことはもちろん、現在生じており、また将来予測される被害の防止・軽減を図る気候変動への適応に、多様な関係者の連携・協働の下、一丸となって取り組むことが重要とされています。

我が国における気候変動適応策の法的な位置づけを明確化する「気候変動適応法（以下「適応法」という。）」が平成 30 年 6 月 13 日に公布、同年 12 月 1 日に施行され、同法第 7 条に基づき、気候変動適応に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るため、政府は、同年 11 月 27 日に「気候変動適応計画」を閣議決定しました。

適応法では、地方公共団体の責務として、「その区域における自然的、経済的、および社会的な状況に応じた気候変動適応に関する施策の推進」（第 4 条第 1 項）及び「その区域における事業者等の気候変動適応及び気候変動適応に資する事業活動の促進を図ること」（第 4 条第 2 項）が定められています。

また、それぞれの都道府県及び市町村における取組を推進するため、努力義務として「地域気候変動適応計画」の策定に努めること（第 12 条）とされているほか、気候変動影響及び気候変動適応に関する情報の収集、整理、分析及び提供並びに技術的助言を行う拠点として、地域気候変動適応センター（以下「地域センター」という。）の確保に努める（第 13 条）ことなどが定められています。

湖沼は古来よりその地域の人々と密接に関わり、地域の文化を育むとともに、利水や漁業、観光等、人間生活や社会経済活動にとって不可欠な存在です。地域と共生し、恵み豊かな湖沼を、将来に渡って継承していくことは我々の責務です。

一方で湖沼は、水が滞留するという閉鎖的な水理上の特性を持ち、汚濁物質が蓄積しやすいため、公共用水域の中でも湖沼の水環境は気候変動の影響を受けやすいと考えられます。湖沼の特性（気象、地形、周辺環境、利水や漁業、観光等の利用条件等）によって気候変動の影響は様々ですが、その影響は人々の生活に直結するものです。

本資料「気候変動による湖沼の水環境への影響評価・適応策検討に係る手引き（仮称：以下「手引き」という。）」は、地域気候変動適応計画を策定するにあたって環境行政の担当者が活用できるよう、湖沼の水環境に関連する気候変動の知識、および影響や適応策の検討にあたっての考え方、検討事例の提供等を目的としています。本手引きが、各地域の実状を踏まえた、湖沼の水環境保全を図る取組の一助となれば幸いです。

令和3年3月

環境省 水・大気環境局 水環境課

## 目 次

1. 手引きの概要 .....	1-1
1.1 手引きの目的と適用範囲 .....	1-1
1.1.1 目的 .....	1-1
1.1.2 適用範囲 .....	1-1
1.2 本手引きの位置づけ .....	1-2
1.3 手引きを活用することによりできること .....	1-3
1.4 手引きの構成 .....	1-3
1.5 手引き作成の検討経緯 .....	1-5
1.6 気候変動・適応策に関する参考情報 .....	1-5
2. 湖沼における気候変動の影響と適応策とは .....	2-1
2.1 気候変動およびその影響に関する一般的な知識 .....	2-1
2.1.1 世界の気候変動 .....	2-1
2.1.2 日本での気候変動 .....	2-3
2.1.3 気候変動による影響 .....	2-9
2.2 湖沼の水環境への影響について .....	2-12
2.2.1 湖沼の水環境の変化による影響 .....	2-12
2.2.2 我が国の湖沼における長期的な水質等の変化 .....	2-13
2.3 湖沼における適応策について .....	2-24
2.3.1 「適応」とは .....	2-24
2.3.2 適応の考え方 .....	2-25
2.3.3 湖沼における適応策 .....	2-27
3. 湖沼における気候変動による影響評価と適応策の検討に向けて .....	3-1
3.1 気候変動影響と適応策の検討の考え方 .....	3-1
3.1.1 検討の流れ .....	3-1
3.1.2 影響評価・適応策の検討を行うための手法 .....	3-3
3.1.3 気候変動による湖沼の水環境の変化と影響の関連 .....	3-4
3.2 情報・データ等の収集 .....	3-6
3.3 気候変動影響の整理 .....	3-7
3.4 影響評価の実施、適応策の検討 .....	3-11
3.4.1 全循環不全による底層水の貧酸素化と魚類等の底層利用種への影響 .....	3-13
3.4.2 気温上昇に伴う水温上昇による冷水性魚類への影響 .....	3-19
3.4.3 植物プランクトンの増殖による利水への影響 .....	3-25
3.4.4 湖面結氷の短期化による地域への影響 .....	3-29
3.4.5 その他の検討 .....	3-31
3.5 気候変動による影響を踏まえたモニタリング計画の検討 .....	3-36
3.6 数値解析モデルを用いた気候変動影響と適応策の検討方法 .....	3-39
3.6.1 数値解析モデルを用いた検討 .....	3-39
3.6.2 湖沼流域特性に応じた解析手法の検討 .....	3-39
3.6.3 水質予測モデルの構築 .....	3-40
3.6.4 将来気象条件の設定 .....	3-41
3.6.5 将来水質予測計算、水質変化の整理 .....	3-42
3.6.6 影響評価 .....	3-42
3.6.7 適応策の検討 .....	3-46
4. 気候変動による影響評価と適応策の実施に向けたアプローチ .....	4-1
4.1 影響評価と適応策の実施に向けて .....	4-1
4.2 適応策の実施に向けたアプローチ .....	4-2
4.2.1 適応策の実施に対する現状・課題 .....	4-2
4.2.2 適応策の実施に向けた進め方（順応的管理・共有・連携による取組） .....	4-2

## 【コラム】

・ 排出シナリオ .....	2-2
・ 汽水湖における水質変化と対応例 .....	2-33
・ 情報整理シートを用いた気候変動影響・適応策検討の整理例 .....	3-34
・ 湖沼における長期的なモニタリングの事例 .....	3-38

## 【資料編（別冊）】

1. 簡易的手法を用いた気候変動による影響評価・適応策の検討例 .....	1-1
2. モデル湖沼での解析モデルを用いた気候変動による将来予測・影響評価の検討例 .....	2-1
3. 湖沼における水環境の変化への対応事例 .....	3-1
4. 用語集 .....	4-1

※本手引きにおいては、「水環境」の定義として、湖沼における水質、生態系、および水辺の環境等を指すこととします。

# 1. 手引きの概要

---

## 1.1 手引きの目的と適用範囲

### 1.1.1 目的

本手引きは、環境行政の担当者等が、気候変動による湖沼の水環境等の将来変化予測やそれによる影響及び対策（適応策）を検討していくにあたっての考え方や留意点をとりまとめた技術資料です。

また、気候変動適応に関する基礎的な知識に加えて、気候変動の影響を受けやすい湖沼の水環境やその適応策に関する情報等について提供することで、気候変動による影響の認識や適応策の検討のきっかけとしていただくことを目的としています。

### 1.1.2 適用範囲

本手引きでは、我が国の湖沼における水環境の変化やそれによる地域等への影響について取り扱うもの<sup>\*1</sup>とします。

ただし、気候変動による影響には水量の変化もあり、水量変化に関連して洪水による影響、渇水による影響も生じます。治水や利水への影響については、例えば、「国土交通省気候変動適応計画 平成 27 年 11 月 国土交通省」や「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～答申、令和 2 年 7 月、社会資本整備審議会」を参照ください。なお、水量、水位の変化に対して水環境への影響が示唆される場合には、本手引きにおいてそれらの影響への対応について提示しています。

また、淡水湖と汽水湖では特性が異なります。汽水湖では干満の影響を強く受けることから、淡水湖での対応に加え塩分、海面水位等を考慮した検討が必要となることに留意が必要です。

※1：ダム等の人造湖についても本手引きでの考え方を参考とすることはできますが、取水・放流による水位管理や曝気等による水質保全対策等、人為的な操作により水質に及ぼす影響が比較的大きいことが考えられ、将来影響を検討する際は、このような人為的操作等の考慮が必要です。ダム湖での気候変動影響については、例えば、国土交通省国土技術政策総合研究所<sup>\*2</sup>での研究成果などがあります。

※2：「気候変動によるダム貯水池の水質への影響に関する研究」：国土技術政策総合研究所資料第 856 号、2015 年 8 月

## 1.2 本手引きの位置づけ

環境省では、都道府県及び市町村が策定する「地域気候変動適応計画」の標準的な策定手順や情報収集の方法等の考え方をとりまとめた「地域気候変動適応計画策定マニュアル（平成30年11月27日）<sup>1</sup>」を作成し公表しています。

本手引きは、地方自治体が「地域気候変動適応計画」を策定する際に、「水環境・水資源」の分野での気候変動による影響評価、適応策の検討において、湖沼の水環境を対象として検討に活用することができる技術資料です（図 1.1）。

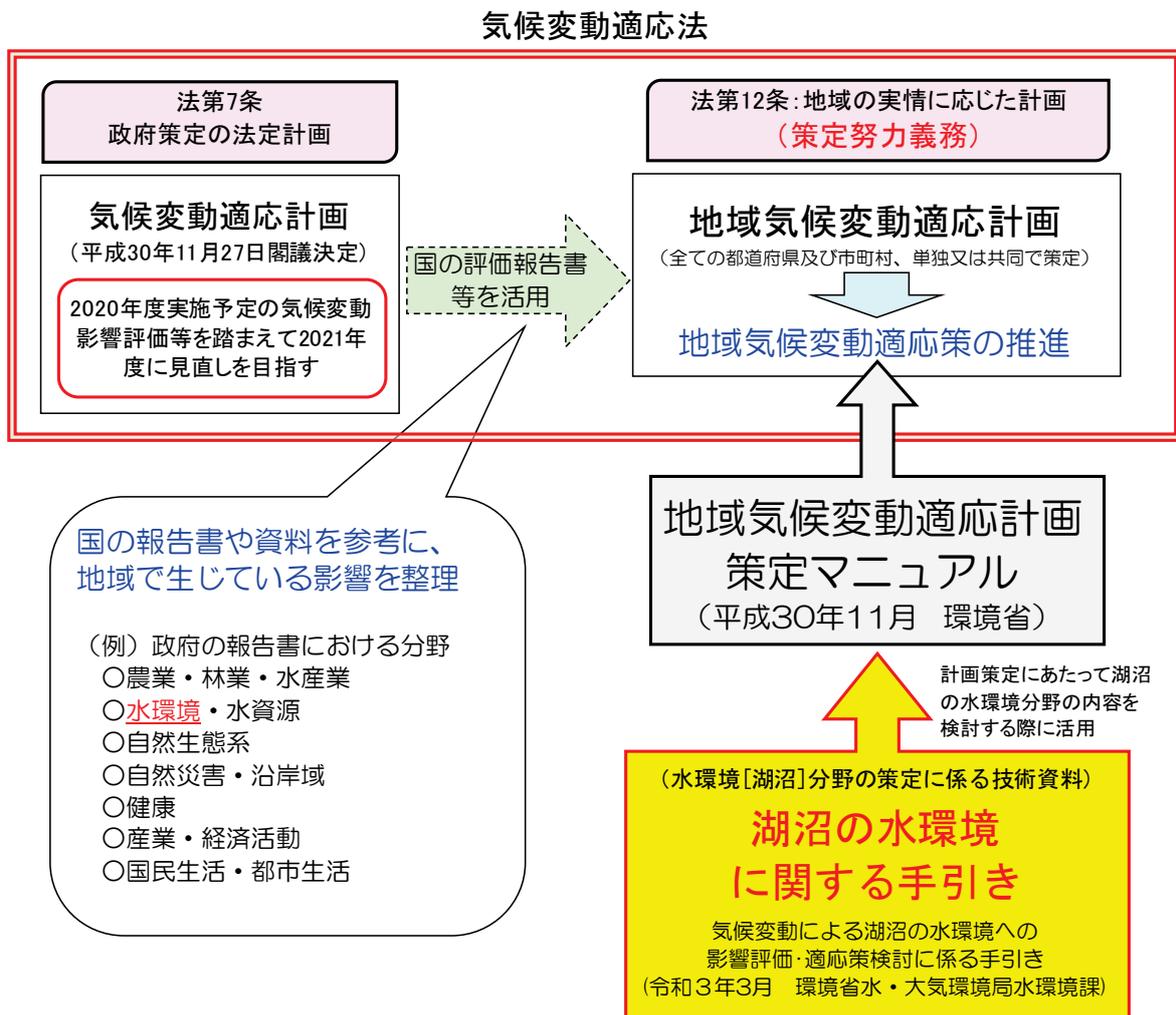


図 1.1 気候変動適応法による政府及び地域の適応計画と本手引きの位置づけ

<sup>1</sup>環境省、地域気候変動適応計画策定マニュアル（H30.11）：<http://www.env.go.jp/earth/tekiou.html>（気候変動適応法第12条に基づき、都道府県及び市町村が、地域適応計画を策定・変更する際の参考となるよう、入手可能な情報を使って標準的な手順を示し、参考となる情報・考え方等を提供することを目的として作成された）

## 1.3 手引きを活用することによりできること

本手引きを用いることで、前述の地域気候変動適応計画の策定にあたっての検討に必要な事項や考え方を得ることができます。また、下記に示すような、基礎的な知識や検討の考え方、検討事例を知ることができます。

- ・湖沼の水環境における気候変動影響の事例・知識（第2章）
- ・湖沼における気候変動影響・適応策検討の考え方（第3章）
- ・湖沼における気候変動影響・適応策の実施に向けたアプローチの考え方（第4章）
- ・気候変動による影響評価・適応策の検討事例、水環境の変化への対応事例（資料編）

## 1.4 手引きの構成

この手引きは、3つの章と資料編で構成されており、その概要は以下のとおりです。

第1章：本手引きの目的や適用範囲、使い方等

第2章：基礎的な知識として、世界や日本における一般的な気候変動による種々の影響、および気候変動による湖沼における水環境への影響、適応策の事例

第3章：湖沼における気候変動影響予測・評価、適応策検討を行う際の考え方や手法

3.1 節：湖沼における気候変動影響・適応策の検討にあたっての考え方

3.2 節：気候変動影響を把握するための情報・データの収集方法

3.3 節：湖沼におけるこれまでの気候変動影響を把握するための収集した情報・データの整理方法

3.4 節：湖沼における気候変動による影響評価・適応策の簡易的な検討方法

3.5 節：気候変動による変化の監視や適応策の効果検証等を行うためのモニタリングの考え方

3.6 節：解析モデルを用いた気候変動影響を予測する際の解析方法、将来条件設定の考え方や、予測結果を用いた影響評価、適応策検討の考え方

第4章：今後、実際に影響評価や適応策を実施していく際のモニタリングや検討の考え方、アプローチ

資料編：簡易的手法を用いた10湖沼での検討例や、モデル湖沼（八郎湖、琵琶湖、池田湖）における解析モデルによる影響評価事例、水環境の変化への対応事例、用語集

本手引きの構成（特に3章）は、図 1.2 に示すように、「地域気候変動適応計画策定マニュアル」で示されている検討の手順（STEP）と対応させており、計画策定にあたって水環境分野の内容を検討する際に活用しやすくしています。



図 1 地域気候変動適応計画策定/変更の流れ

図 1.2 「地域気候変動適応計画策定マニュアル」で示された各 STEP と本手引きの構成との関係

出典：地域気候変動適応計画策定マニュアル、環境省（平成 30 年 11 月）：<http://www.env.go.jp/earth/tekiou.html>

## 1.5 手引き作成の検討経緯

本手引きの作成にあたって、表 1.1 に示す、湖沼の水質および気候変動に関する学識経験者と関係機関の研究者、また湖沼を管理する行政担当者（地方自治体）から構成される「気候変動による湖沼への影響評価・適応策検討会」（平成 25～令和 2 年度）において議論した結果をとりまとめました。

表 1.1 気候変動による湖沼への影響評価・適応策検討会 メンバー(令和 3 年 3 月末)

氏名	所属・職名
今井 章雄	国立研究開発法人 国立環境研究所 琵琶湖分室長
大野 進一	秋田県 生活環境部 環境管理課 八郎湖環境対策室 副主幹（兼）班長
*岡田 光正	放送大学 理事・副学長
奥田 一臣	滋賀県 琵琶湖環境部 琵琶湖保全再生課 水質・生態系係 課長補佐
坂元 克行	鹿児島県 環境林務部 環境保全課 技術補佐
風間 聡	国立大学法人 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻教授
中村 智幸	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産技術研究所 環境・応用部門 沿岸生態システム部 副部長
福濱 方哉	国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水環境研究官
古米 弘明	国立大学法人 東京大学大学院 工学系研究科附属 水環境工学研究センター教授

五十音順に記載、敬称略、また\*は委員長

## 1.6 気候変動・適応策に関する参考情報

環境省では、気候変動適応情報プラットフォーム「A-PLAT」を開設して、気候変動の影響や適応策の検討に際して関連する様々な情報やデータを公開し、ダウンロードできるように整備しています。「A-PLAT」は、気候変動による悪影響をできるだけ抑制・回避し、また正の影響を活用した社会構築を目指す施策（気候変動適応策、以下「適応策」という）を進めるために参考となる情報を、分かりやすく発信するための情報基盤です。（URL：<https://adaptation-platform.nies.go.jp/index.html>）

本手引きに基づく気候変動影響、適応策の検討にあたって、将来の気温や降水量など、必要な情報やデータを収集することが可能です。なお、A-PLAT の見方、データ入手方法など、具体的な活用方法が「地域気候変動適応計画策定マニュアル-手順編-」に記載されています。



## 2. 湖沼における気候変動の影響と適応策とは

### 2.1 気候変動およびその影響に関する一般的な知識

本節は「気候変動の観測・予測・影響評価に関する統合レポート 2018（環境省、文部科学省、農林水産省、国土交通省、気象庁）」および「日本の気候変動 2020（文部科学省、気象庁、2020.12）」から、湖沼の水環境に関連がある内容を引用して作成しています。

#### 2.1.1 世界の気候変動

##### (1) 気温の上昇

世界の年平均気温は、図 2.1 に示すように、機器を用いた観測が広く開始された 19 世紀後半以降、変動を繰り返しながら上昇しており、長期的には 100 年あたり 0.72℃の割合で上昇しています。

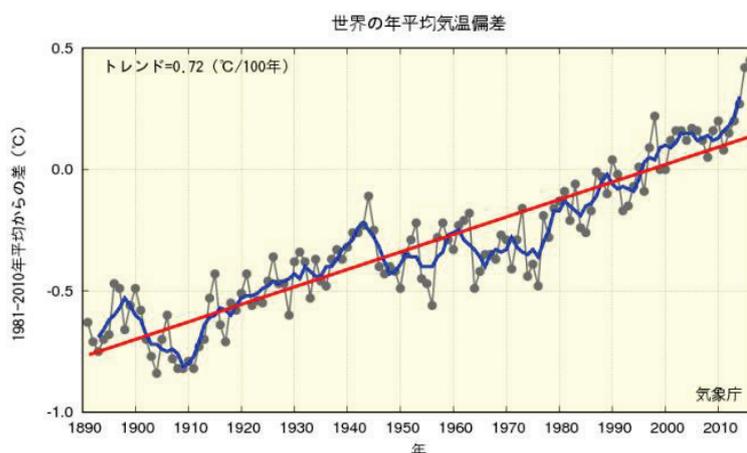


図 2.1 世界の年平均気温の経年変化(1891～2016 年)

出典：気象庁 気候変動監視レポート（2018）図 2.3-1

また、図 2.2 に示すように、21 世紀末（2081～2100 年）における世界の年平均気温は、20 世紀末（1986～2005 年）と比較して、RCP2.6 シナリオ（次ページ参照）で 0.3～1.7℃、RCP8.5 シナリオで 2.6～4.8℃の上昇が予測されています。

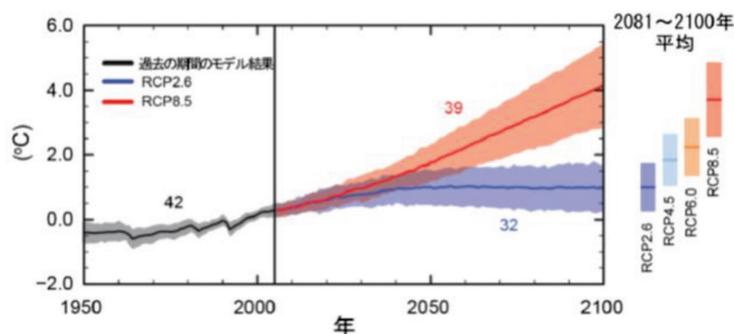


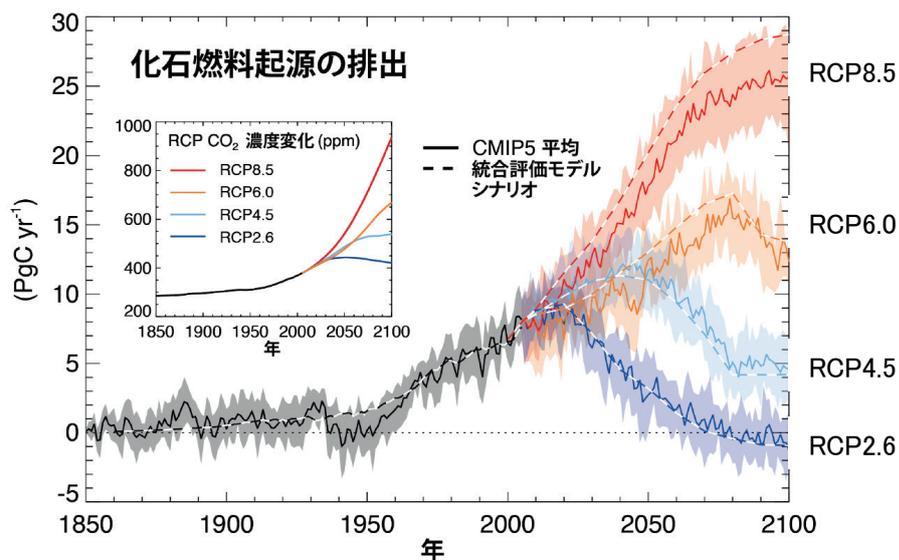
図 2.2 世界の年平均気温の将来変化

出典：IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約（2013）図 SPM.7(a)

## <コラム 排出シナリオ>

気候変動の予測を行うためには、放射強制力（地球温暖化を引き起こす効果）をもたらす大気中の温室効果ガス濃度やエアロゾルの量がどのように変化するか仮定（シナリオ）する必要がある。IPCC 第5次評価報告書では、将来の放射強制力の違いに応じて、RCP（Representative Concentration Pathway）2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5の4つのシナリオが用いられている。RCPに続く数値が大きいほど2100年の放射強制力が大きいことを意味している。選択するシナリオに幅があることや、気候システムを再現する気候モデルに不完全性があること等により、気候変動の予測には不確実性を伴うことに留意する必要がある。

その4つのシナリオについて、放射強制力の大きさの違いに応じて、2100年以降も放射強制力の上昇が続く「高位参照シナリオ」（RCP8.5シナリオ、 $8.5\text{W/m}^2$ の増加を意味する。）、2100年までにピークを迎えその後減少する「低位安定化シナリオ」（RCP2.6シナリオ）、これらの間に位置して2100年以降に安定化する「高位安定化シナリオ」（RCP6.0シナリオ）及び「中位安定化シナリオ」（RCP4.5シナリオ）が選択されている（図2.3）。



図外側；地球システムモデルによる逆算の結果。

細線：個々のモデルの結果、太線：複数のモデルの平均

**図 2.3 RCP シナリオに基づく二酸化炭素の濃度変化(図内側)と RCP シナリオに対応する化石燃料からの二酸化炭素排出量**

出典：気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書統合報告書の公表について

(H26.11.2 報道発表資料)

## (2) 降水量

世界（陸域）の年降水量の変化は、図 2.4 に示すように、全球で一様な変化傾向はなく、地域によって年降水量が増加する地域と減少する地域があります。1901 年以降、北半球中緯度地域である北アメリカやヨーロッパでは降水量が増加する傾向となっています。

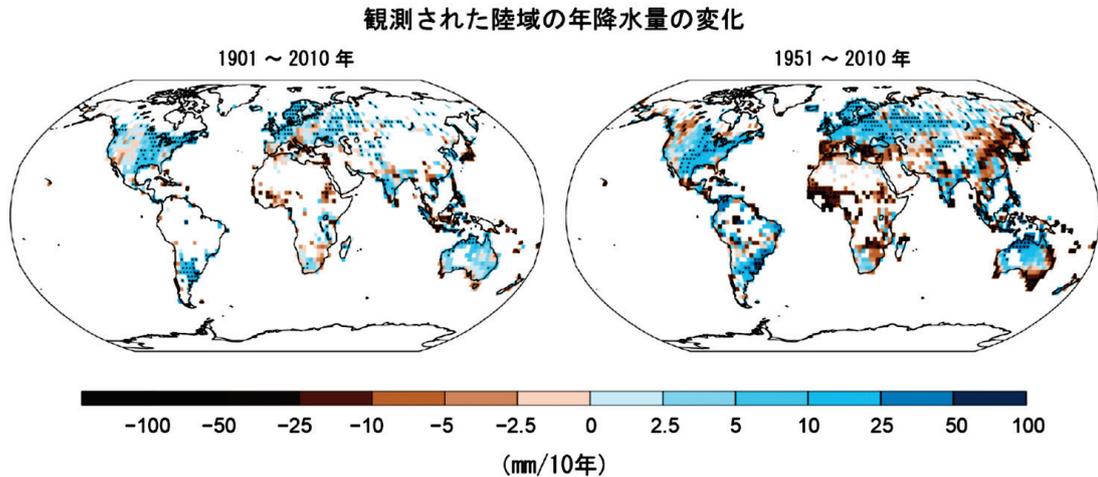


図 2.4 世界(陸域)の年降水量の変化の分布

出典：IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約（2013）図 SPM.2

## 2.1.2 日本での気候変動

### (1) 気温

都市化の影響が比較的小さいとみられる気象庁の 15 観測地点における 1898～2019 年の観測によると、日本の年平均気温は、図 2.5 に示すように、様々な変動を繰り返しながら上昇しており、上昇率は 100 年あたり 1.24℃となっています(信頼水準 99%で統計的に有意)。

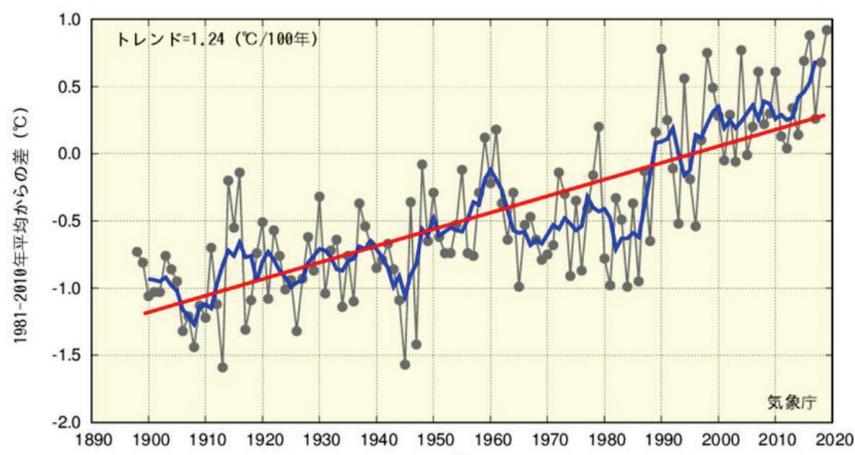


図 2.5 日本の年平均気温偏差の経年変化(1898～2019 年)

細線(黒)は国内 15 観測地点での年平均気温の基準値からの偏差を平均した値を示している。太線(青)は偏差の 5 年移動平均値、直線(赤)は長期変化傾向(この期間の平均的な変化傾向)を示している。基準値は 1981～2010 年の 30 年平均。

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020（詳細版）図 4.1.3

また、都市化の影響が比較的小さいとみられる気象庁の13観測地点の観測値を用いて解析を行ったところ、図2.6に示すように1910年から2019年の統計期間の間で、日最高気温が30℃以上の日(真夏日)の日数は増加しています(信頼度水準99%で統計的に有意)。

一方、図2.7に示すように、同期間における日最低気温が0℃未満(冬日)の日数は減少しています(信頼度水準99%で統計的に有意)。

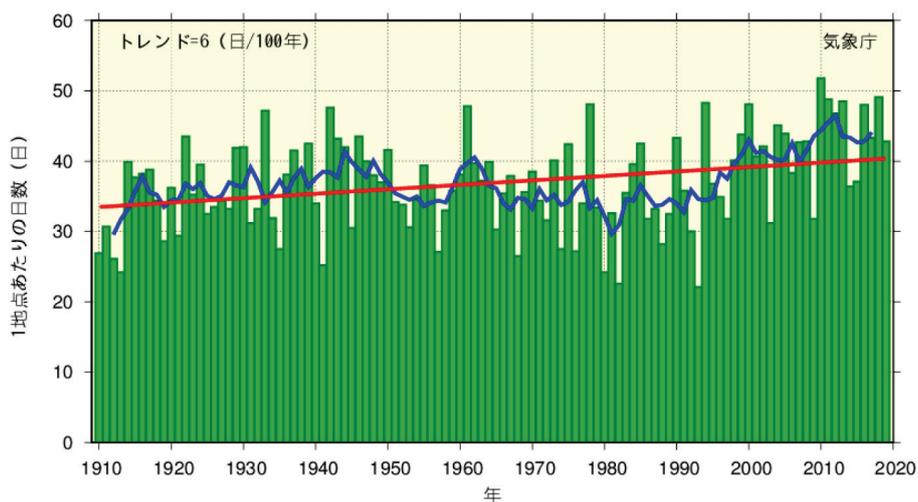


図 2.6 日最高気温 30℃以上(真夏日)の年間日数の経年変数(1910~2019年)

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020 (詳細版) 図 4.1.4 (a)

棒グラフ(緑)は各年の年間日数の合計を各年の有効地点数の合計で割った値(1地点当たりの年間日数)を示す。曲線(青)はその5年移動平均値、直線(赤)は長期変化傾向(統計期間を通じた平均的な変化傾向)を示す。

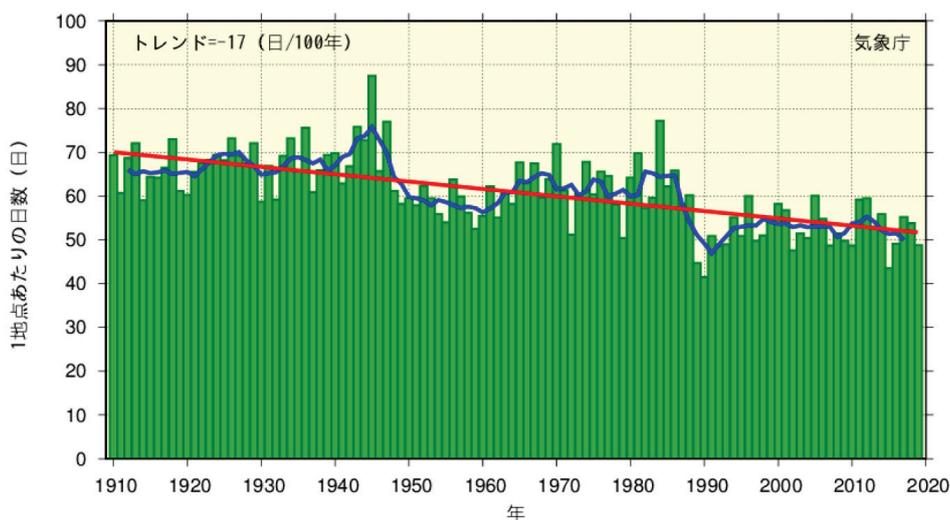


図 2.7 日最低気温 0℃未満(冬日)の年間日数の経年変数(1910~2019年)

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020 (詳細版) 図 4.1.5 (a)

棒グラフ(緑)は各年の年間日数の合計を各年の有効地点数の合計で割った値(1地点当たりの年間日数)を示す。曲線(青)はその5年移動平均値、直線(赤)は長期変化傾向(統計期間を通じた平均的な変化傾向)を示す。

## (2) 降水量

図 2.8 に示すように、気象庁の全国約 1,300 のアメダス観測地点で 1976 年から 2019 年に観測された降水量のデータを用いて計算した、1 時間降水量が 50mm 以上の短時間強雨の年間発生回数は増加しています（信頼度水準 99%で統計的に有意）。1,300 地点当たりの年間発生回数の増加率は、10 年あたり 28.9 回となっています<sup>1</sup>。

気象庁の全国 51 観測地点で 1901 年から 2019 年の期間に観測された降水量のデータによると、図 2.9 に示すように、1.0mm 以上の降水が観測される日数は減少しています（信頼度水準 99%で統計的に有意）。減少率は 100 年あたり 9.5 日となっています。

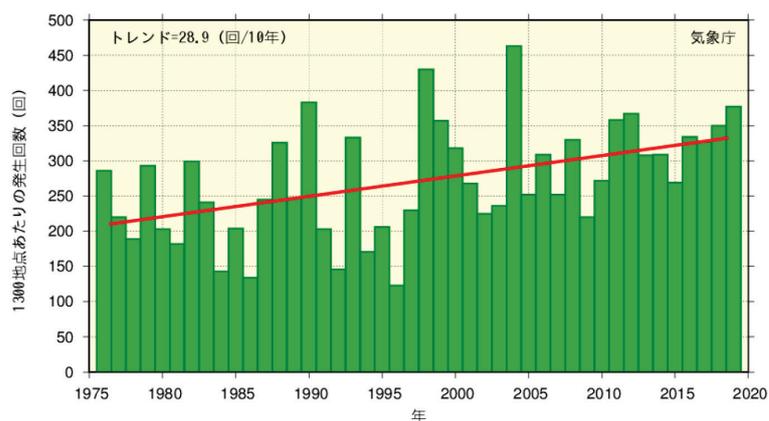


図 2.8 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数の経年変化(1976～2019 年)

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020（詳細版）図 5.1.4（a）

棒グラフ（緑）は各年の年間発生回数を示す（全国のアメダスによる観測値を 1,300 地点あたりに換算した値）、赤直線は長期変化傾向（この期間の平均的な変化傾向）を示す。

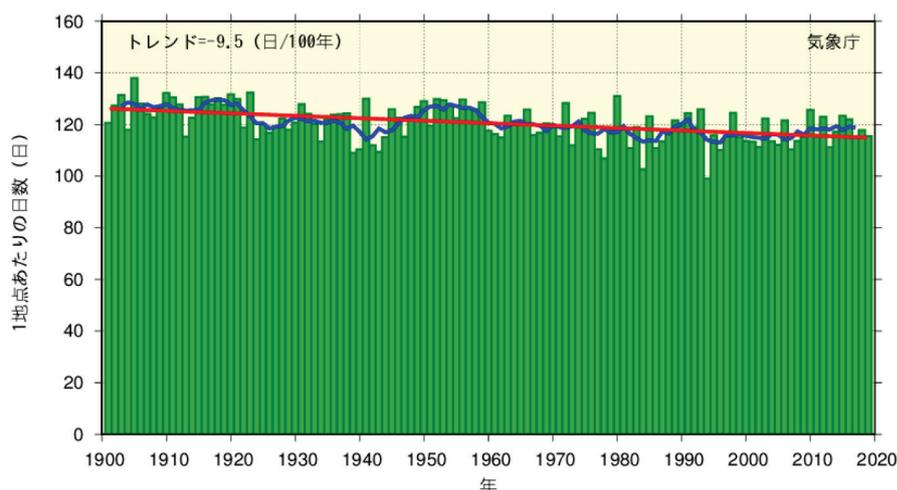


図 2.9 日降水量 1.0mm 以上の年間日数の経年変化(1901～2019 年)

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020（詳細版）図 5.1.6

棒グラフ（緑）は各年の年間日数の合計を有効地点数の合計で割った値（1 地点当たりの年間日数）を示す。青太線は 5 年移動平均値を、赤直線は長期変化傾向（この期間の平均的な変化傾向）を示す。

<sup>1</sup> アメダスの観測期間は 40 年余りのため、短時間強雨の長期変化傾向を確実に捉えるためには今後のデータの蓄積が必要であるとされています。

気象庁による予測では、図 2.10 に示すように、4℃上昇シナリオ (RCP8.5) の場合、21 世紀末 (2076～2095 年平均) における 1 時間降水量 50 mm 以上の短時間強雨の回数は、20 世紀末 (1980～1999 年平均) と比べて全国的に有意に増加すると予測されています。

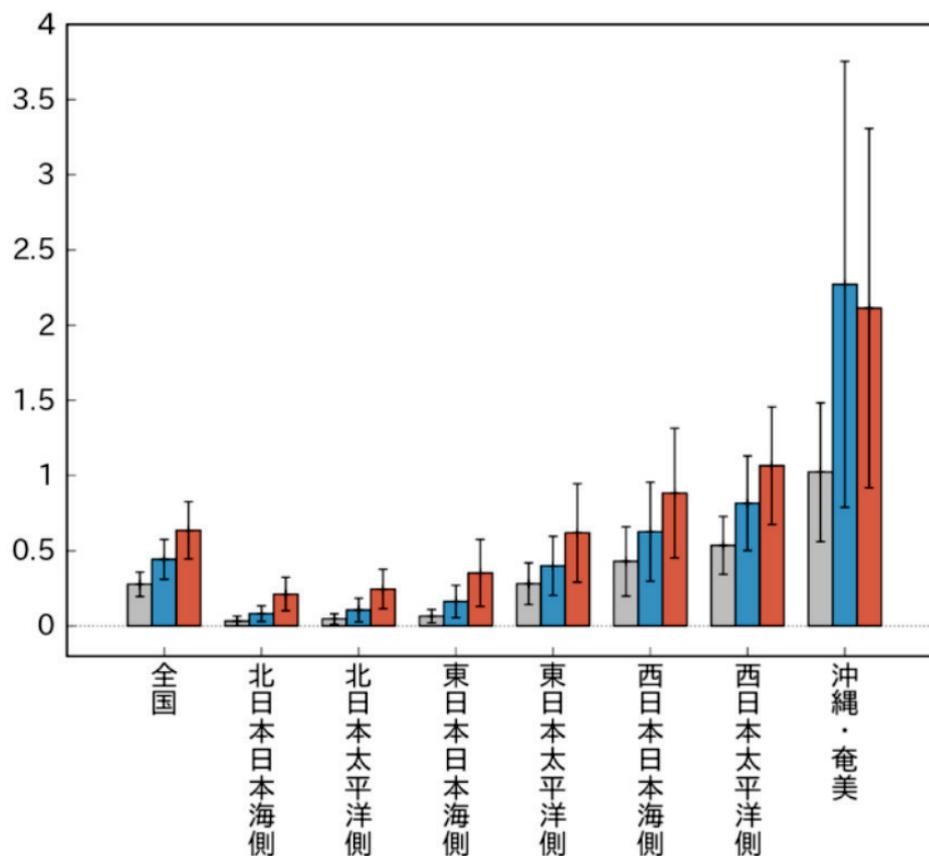


図 2.10 全国及び地域別の 1 地点あたりの 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数 (回/年)

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020 (詳細版) 図 5.2.15 (b)

棒グラフはそれぞれの大雨の発生回数、細い縦線は年々変動の幅。棒グラフの色は灰色が現在気候、青が 2℃上昇シナリオ (RCP2.6) の将来気候、赤が 4℃上昇シナリオ (RCP8.5) に対応する。ただし、現在気候にはバイアス補正を加えているものの完全にバイアスが除去されている訳ではなく、観測値とは値が異なることに注意。

### (3) 降雪・積雪

気象庁による予測では、4℃上昇シナリオ (RCP8.5) の場合、図 2.11 に示すように、21 世紀末 (2076～2095 年平均) における年最深積雪は、20 世紀末 (1980～1999 年平均) と比べて、全国的に有意に減少すると言われています。2℃上昇シナリオ (RCP2.6) の場合、本州以南でのほとんどの地域で有意に減少する一方で、北海道では変化傾向が不明瞭です。両シナリオとも、広い範囲で見られている減少傾向については、気温の上昇 (確信度が高い) に伴い降水がある場合も雪ではなく雨になることが増えることを反映したものと考えられ、観測されている減少傾向とも整合することから確信度は高いとされています。

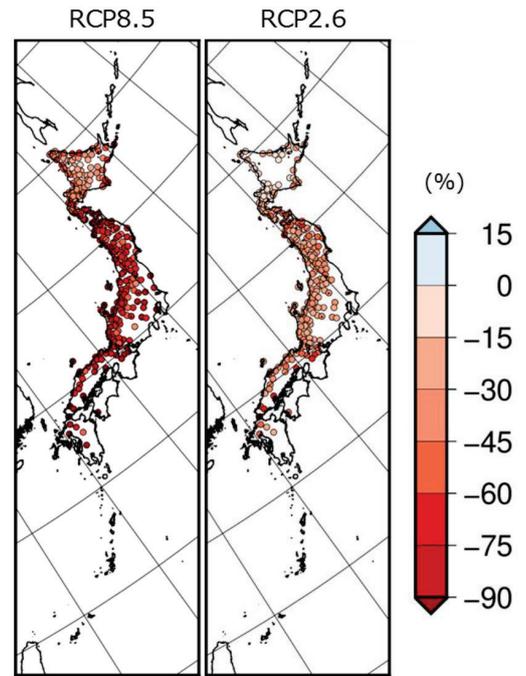


図 2.11 気象庁の予測による年最深積雪の将来変化 (%)

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020 (詳細版) 図 6.2.1

左が 4℃上昇シナリオ (RCP8.5)、右が 2℃上昇シナリオ (RCP2.6) による予測結果。地点毎にバイアス補正をした予測データを用いて、20 世紀末 (1980～1999 年平均) に対する 21 世紀末 (2076～2095 年平均) の変化率で示す。増減が 4 メンバーで一致していない地点の変化率は、予測の不確実性が大きいため表示していない。

また、図 2.12 に示すように、全国及び各地域で平均すると、2℃上昇シナリオ (RCP2.6) における東日本を除き、減少幅が年々変動の幅を大きく上回っており、将来気候における最深積雪は、現在ではほとんど現れないような小さい値が例年見られるようになると予測されています。

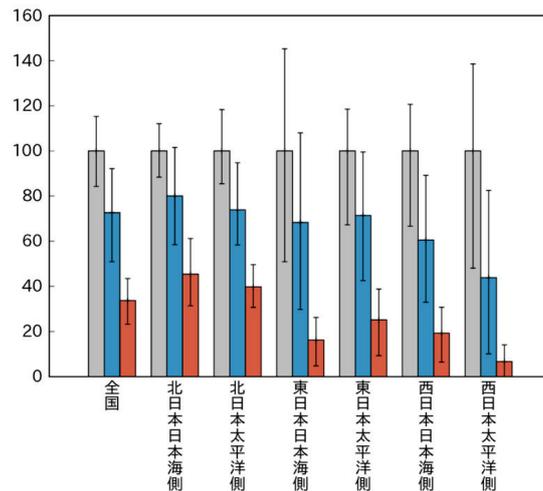


図 2.12 気象庁の予測による全国及び地域別の年最深積雪の将来変化 (%)

出典：文部科学省・気象庁 日本の気候変動 2020 (詳細版) 図 6.2.2

地点毎にバイアス補正をした予測データを用いて、現在気候を基準とした将来変化率を棒グラフ、年々変動 2204 の幅を細い縦線で示す。棒グラフの色は灰が現在気候、赤が 4℃上昇シナリオ (RCP8.5) で、青が 2℃上昇シナリオ (RCP2.6) で予測される将来変化率に対応する。

#### (4) 海面水位

日本沿岸の海面水位について、長い期間（40年間を目安として、1970以前～2009年）のデータを活用できる潮位観測施設の地盤変動を除去して潮位の変化傾向を調べた結果によると、1980年以降は多くの観測施設において年3mmに近い上昇が現れています(図 2.13)。地点により差がありますが、海面上昇の影響が今後生じることは否定できないと言われています。

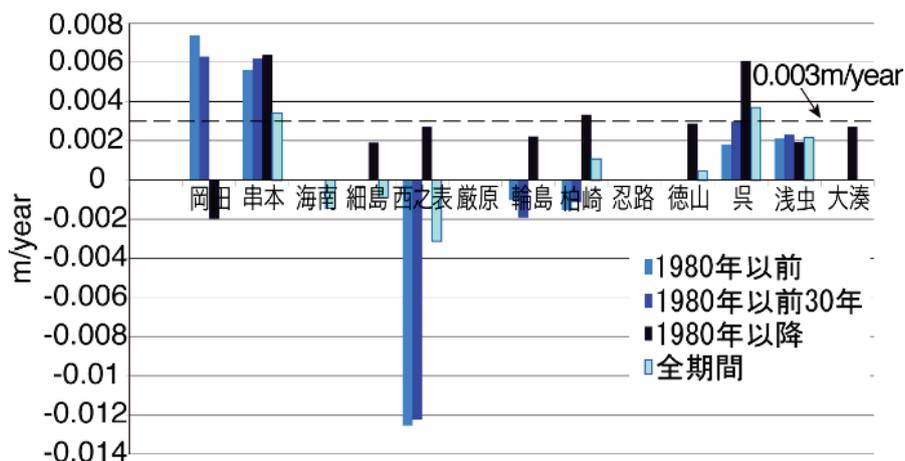


図 2.13 潮位観測施設での海面水位の変化傾向\*

出典：国土技術政策総合研究所, 2017: 河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究—「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」の成果をコアとして—, 国総研プロジェクト研究報告第 56 号.

## 2.1.3 気候変動による影響

### (1) 水環境全般

#### 1) 現状

全国の公共用水域（河川・湖沼・海域）における過去約30年間の水温変化の調査結果によれば、4,477観測点のうち、夏季は3,244地点（72%）、冬季は3,654地点（82%）で水温の上昇傾向が認められています。水温変化には、様々な自然的・人為的要因が関係しますが、気温変化もその一因であると考えられています<sup>1</sup>。

水温の上昇に伴う水環境の変化も指摘されています。例えば、植物プランクトン群集の変化とそれによる生態系における物質循環構造変化の可能性があること、また湖等の全循環へ影響があることが指摘されています<sup>2</sup>。暖冬等により表層水の水温が十分に低下せず、表層と底層の水が混合する全循環が生じない結果、底層に酸素を含んだ水が届かない状態が生じます。溶存酸素濃度が低いと、富栄養化の原因となるリンが湖底から溶出しやすい状態にもなるため、全循環の変化は、水質悪化や魚類など湖内生態系に悪影響を及ぼす可能性があります（図 2.14）。

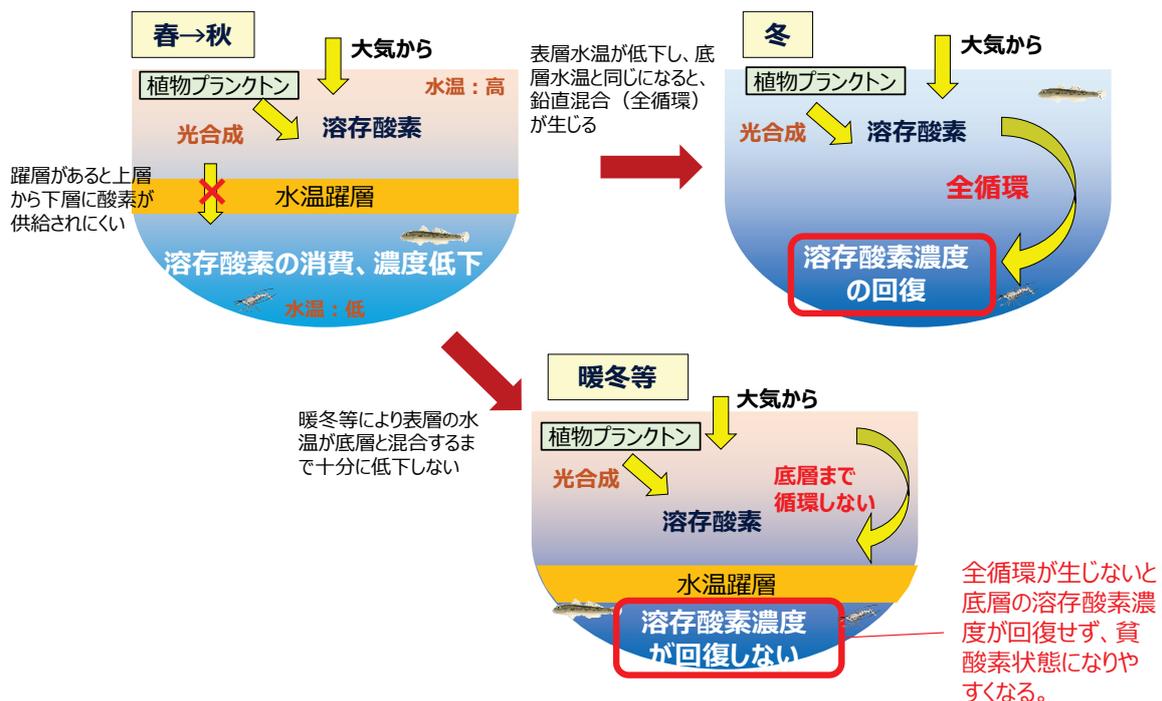


図 2.14 湖における全循環とその変化

<sup>1</sup>環境省, 2013 : 気候変動による水質等への影響解明調査

<sup>2</sup>永田俊, 吉山浩平, 熊谷道夫, 2012 : 温暖化の湖沼学. 京都大学学術出版会

## 2) 将来

気候変動は、気温の上昇を通じて湖沼や河川、沿岸域等の水温を上昇させる可能性があるほか、降水量の変化を通じて水質等の変化をもたらす可能性もあります。RCP シナリオを用いて、4つのダムにおけるケーススタディにより貯水池の水質を予測した研究によれば、水温上昇や降雨の変化等に伴い、ダム貯水池での藻類増殖や底層水質悪化、濁度上昇の影響が出る可能性が予測されています<sup>1</sup>。

また、気候変動によって、雨の量や降り方が変化するとともに、これまで雪だったものが雨に変わる可能性も出てきます。山地の多い日本において、こうした変化は河川の流況を大きく変えると予想されます。そこで、稲の成長、陸面、灌漑、河川流下、ダム操作の5つの要素を考慮した日本全域を対象とする水資源モデルを用いて、全国の河川流況の将来変化を評価した研究があります。近未来（およそ21世紀中頃）と21世紀末の気候下で河川流量計算を行った結果を用いて、日本海側北部の多雪地域の河川において現在（およそ20世紀末頃）と21世紀末の気候下の河川流量を比較すると、将来は12～3月で流量増加、4～5月では流量減少が予測されました。また、このような河川流量の季節性の変化度合いを検討したところ、日本海側の多雪地帯において河川流況が大きく変化することが予測されています（図 2.15）<sup>2</sup>。

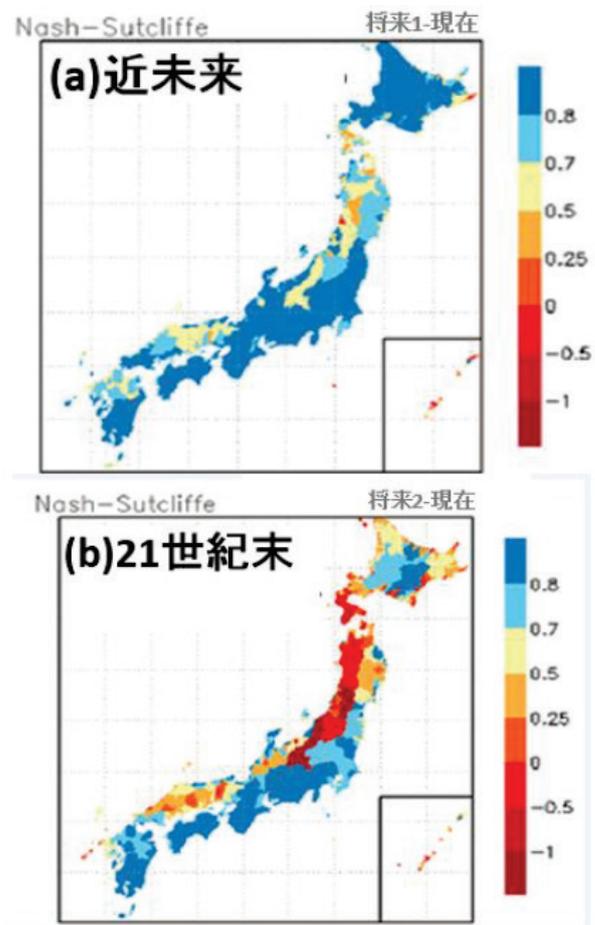


図 2.15 気候変動に伴う日本各地の河川流況の変化(近未来:上、21 世紀末:下)

出典：文部科学省：気候変動リスク情報創生プログラム成果集（2017）を一部加筆

図の上は近未来（21世紀中頃）と現在気候下の月流量気候値から算出した Nash 係数、下は21世紀末と現在気候下の月流量気候値から算出した Nash 係数をそれぞれ示す。暖色は将来にかけて観測値よりも河川の流況が大きく変化することを意味する。

※Nash 係数：水文モデルの適合性を示す指標として用いられる。近未来・21 世紀末気候下の河川流量を現在気候下の河川流量と比較することで、流量季節性の変化度合いを反映できる。

<sup>1</sup>国土技術政策総合研究所, 2015：気候変動によるダム貯水池の水質への影響に関する研究. 国総研資料第 856 号

<sup>2</sup>文部科学省, 2017：気候変動リスク情報創生プログラム成果集

## (2) 自然生態系(淡水生態系)

### 1) 淡水魚の遡上の変化

国内のアユ資源は近年減少傾向にあり、海産稚アユの採捕量、河川産アユの採捕量は1970～1980年頃から急激に下降しており、アユ漁獲量についても1992年以降減少を続けています。大阪湾・淀川の環境要因がアユの遡上に与える影響を検討した研究では、冬季の大阪湾の水温上昇が遡上数の減少要因となることが報告されています。気候変動を考慮して淀川流域圏の流出解析・水温解析では、淀川河口水温は21世紀初め頃と比較して21世紀末に1.43～1.99℃上昇し、淀川のアユ遡上数が減少することを予測しています<sup>1</sup>。

### 2) 栄養塩循環の変化

淡水、沿岸、海洋生態系における栄養塩は、生物の基礎生産や多様な生態系サービスを支える上で重要であり、その多くは陸域生態系から供給されています。北海道北部の天塩川集水域における研究では、将来の気候変動及び土地利用変化の影響により、陸域生態系からの窒素やリンの栄養塩供給が増加することを予測しています。気候変動による生態系内部での植生や微生物の栄養塩代謝速度の変化が関与しており、陸域生態系の栄養塩供給サービスや水質調整サービスへの影響は大きいことが示唆されています<sup>2</sup>。

一方、地球温暖化によって冬季の積雪に減少が生じた場合には、積雪による断熱効果が低下し、土壌中の熱・水動態が変化することが懸念されています。陸域集水域の最上流域に位置する森林域での野外観測や操作実験により、積雪寒冷地域における土壌の凍結・融解サイクルの増幅の影響によって、土壌微生物による窒素代謝速度、土壌からの栄養塩溶脱速度が大きく変化すること（アンモニウム態窒素が増加、硝酸態窒素が減少する等）が予測されています<sup>3, 4</sup>。栄養塩の変化により下流湖沼等水域での植物プランクトンに影響が生じる可能性が示唆されています。

<sup>1</sup> 浦部真治, 竹門康弘, 角哲也, 2016: 淀川におけるアユ遡上数の変動要因解析に基づいた将来予測モデルの検討。京都大学防災研究所年報, 第59号B, p.557-569

<sup>2</sup> M. Fan, H. Shibata, Wang Q, 2016: Optimal conservation planning of multiple hydrological ecosystem services underland use and climate changes in Teshio river watershed, northernmost of Japan. Ecological Indicators, 62, p.1-13.

<sup>3</sup> H. Shibata, 2016: Impact of winter climate change on nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems: A synthesis from Japanese case studies, Ecological Indicators, 65, p.4-9.

<sup>4</sup> R. Urakawa, H. Shibata, M. Kuroiwa, Y. Inagaki, R. Tateno, T. Hishi, K. Fukuzawa, K. Hirai, H. Toda, N. Oyanagi, M. Nakata, A. Nakanishi, K. Fukushima, T. Enoki, Y. Suwa, 2014: Effects of freeze-thaw cycles resulting from winter climate change on soil nitrogen cycling in ten temperate forest ecosystems throughout the Japanese archipelago. Soil Biology and Biochemistry, 74, p.82-94.

## 2.2 湖沼の水環境への影響について

### 2.2.1 湖沼の水環境の変化による影響

我が国の湖沼においては、観測史上、前例のない水環境の変化や、過去に少なかったが最近頻発する水環境変化等が生じてきています。

例えば、琵琶湖（滋賀県）では、2019 年春には全循環の完了が観測史上初めて確認されませんでした。翌年の 2020 年春にも確認されず、2 年連続で全循環の完了が観測されませんでした<sup>1</sup>。また、池田湖（鹿児島県）では、1990 年以降、全循環が生じなくなり、水深 200 m 以下では無酸素の状態が約 10 年以上継続していました。なお、北海道などの寒冷な地域には年 2 回循環する湖や、我が国ではないが、熱帯には年間を通じて循環しない湖も存在しています。

湖面結氷に関しては、八郎湖（秋田県）においてかつては湖面が結氷し氷上でワカサギ釣りが可能でしたが、近年では結氷しない年が増えています。湖面の氷が割れる現象（御神渡り）が生じ、地域の観光資源にもなっている諏訪湖（長野県）でも「明海（結氷せず）」「お神渡りなし」の記録の頻度が近年増加している状況です<sup>2</sup>。

このように、湖沼での水環境の変化が各地で見られるようになり、これらの現象の一要因として気候変動による影響の可能性が考えられます。このため、今後さらに気候変動が進むと、湖沼の水環境の変化を通じて、湖沼と共生している生活や地域経済、および生物の生息環境に対して影響が懸念されます（図 2.16）。

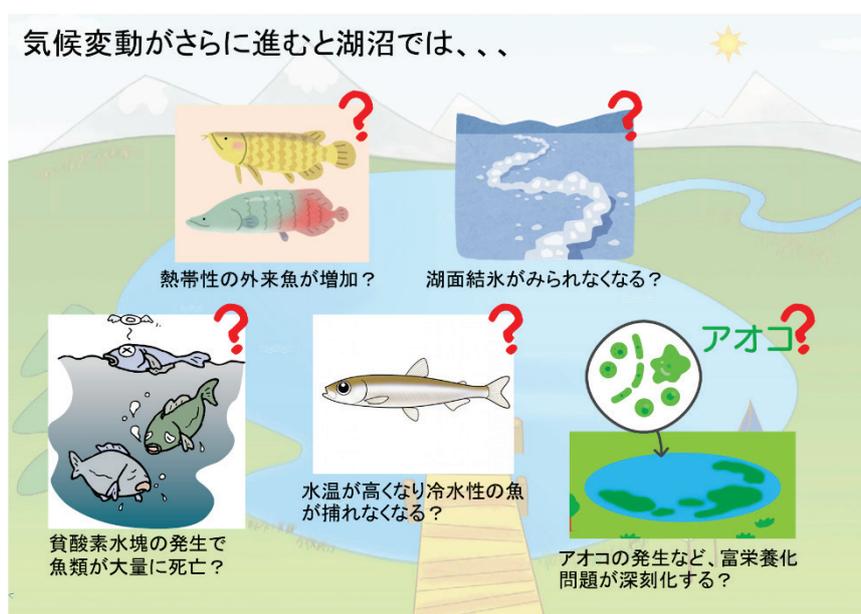


図 2.16 気候変動の進行に伴って懸念される湖沼水環境の変化の例

注：この図に示した懸念は、現時点で根拠付けられているものではなく、湖沼の水環境が変化した場合に想定される事象を示したものである。

<sup>1</sup> 滋賀県 HP、令和 2 年度第 1 回滋賀県環境審議会水・土壌・大気部会資料

<sup>2</sup> 長野県・諏訪湖の御神渡（おみわたり）と 574 年間の結氷記録、地学雑誌、2018 年 127 巻 4 号

## 2.2.2 我が国の湖沼における長期的な水質等の変化

我が国の湖沼の水環境について、現状までの気候変動影響を知るために、全国の湖沼の水質等のデータの収集整理および分析を行いました。

### (1) 全国湖沼の地方別長期的水温変化傾向

我が国の湖沼について、約 30 年以上の長期の水温データが得られている湖沼（114 水域 294 地点）を対象として、夏季（6～8 月）、冬季（12～2 月）における水温の長期的な変化の傾向を回帰分析により整理し、湖沼が位置する地方別に整理しました（図 2.17）。

夏季及び冬季に水温上昇であった地点が約 8 割以上となった地方は、東北・関東・中部・近畿でした。特に、夏季は全国的に 8 割以上の地点で、冬季は北海道を除き 7 割以上の地点で水温上昇となっています。

また、統計的に有意な水温上昇となった地点は、夏季では北海道で 2 割程度でしたが、東北・関東・中部・四国・九州ではおおむね 4～6 割で、特に近畿では 8 割と高くなっています。一方、冬季では、東北・中部で有意に水温上昇した地点の割合はおおむね 2～3 割ですが、関東・近畿・四国・九州は有意に水温上昇した地点の割合がおおむね 5～7 割と高くなっています。

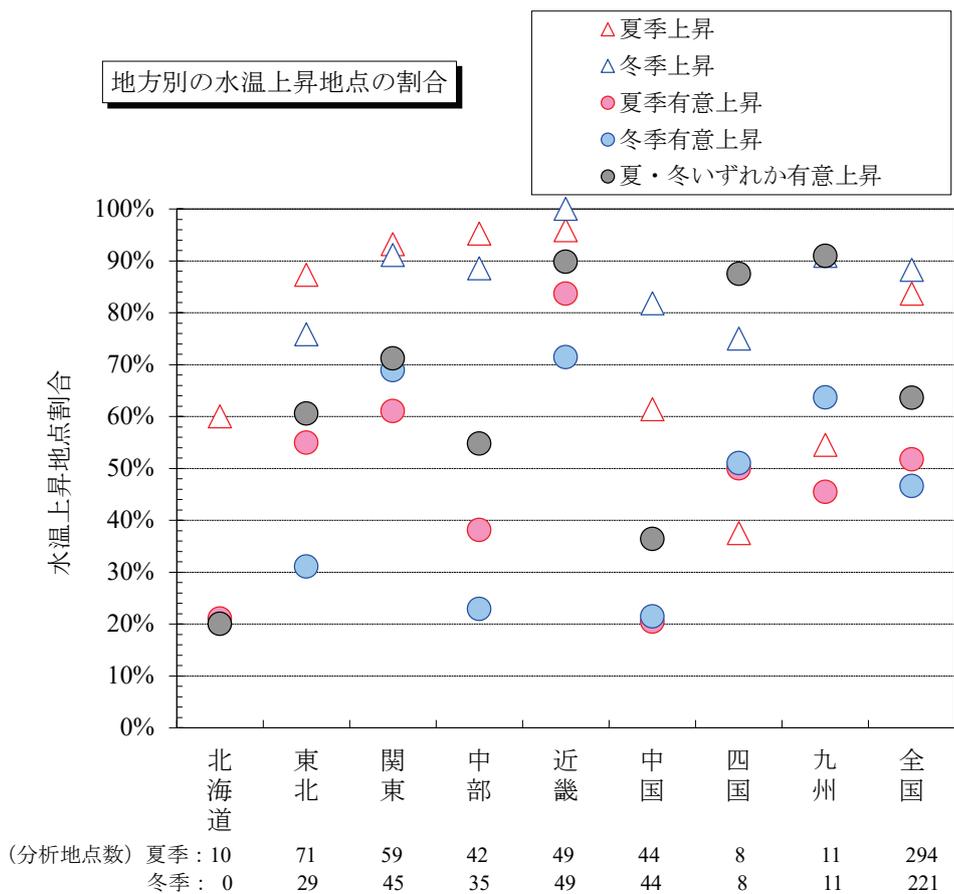


図 2.17 地方別の水温上昇地点の割合(分析地点数に対する割合)

## (2) 湖沼別の水温変化

長期的に連続した水質データが得られた湖沼のうち、21湖沼を抽出して、長期的な水温変化の特徴を整理しました。

21湖沼について、夏季（6～8月）・冬季（12～2月）に分けて過去36年間の水温変化の量を縦軸と横軸にプロットすると、図2.18のようになります。多くの湖沼では、夏季冬季ともに水温は上昇していますが、低下している湖沼も見られており、全ての湖沼で上昇しているとは一概には言えないことが分かります。これは、湖沼の位置や地形等の特徴によって、気候変動により受ける影響が異なるためと考えられます。このため、気候変動による影響は、それぞれの湖沼で考えていく必要があります。

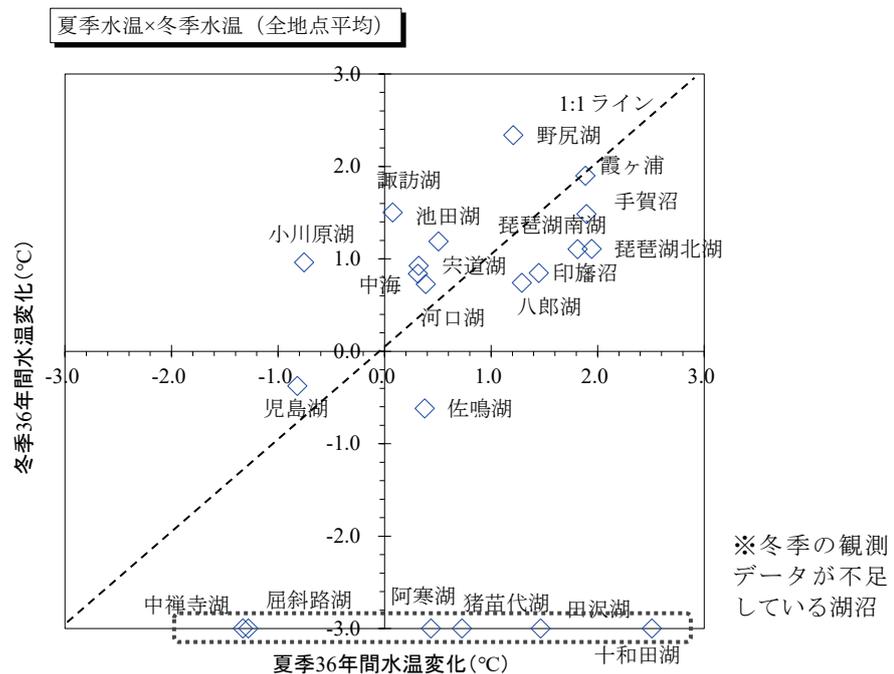


図 2.18 過去 36 年間(1981～2016 年)の水温変化(夏季:6～8 月 冬季:12～2 月)



図 2.19 データ整理した湖沼(21湖沼)

### (3) 湖沼における長期的な水質変化

#### 1) 全循環と底層の水温・溶存酸素の変化

図 2.20 に、琵琶湖（滋賀県）北湖の表層と底層における水温と溶存酸素（DO）の変化を示します。琵琶湖では表層の水温は、気温の変化に応じて季節変化を示し、おおよそ 8～30℃ の範囲で変化しています。一方底層では気温の変化は伝わらず、おおよそ一定で 6～9℃ での小さい変化を示しています。毎年、冬～春（3 月頃まで）に表層の水温が低下し底層の水温と同じになることで表層～底層で水温および水質が一樣となります（全循環、または全層循環）。この全循環により、表層と底層で水質が一樣となることで、例年夏～秋にかけて低下する底層の DO が回復し、底層に新鮮な酸素が供給されています。

しかし、近年琵琶湖ではこの全循環に変化が見られ、2019（H31）年春、2020（R2）年春と 2 年続けて、表層から底層までの DO が一樣にならず、全循環の完了が確認されなかった という観測結果が報告されています<sup>1</sup>。

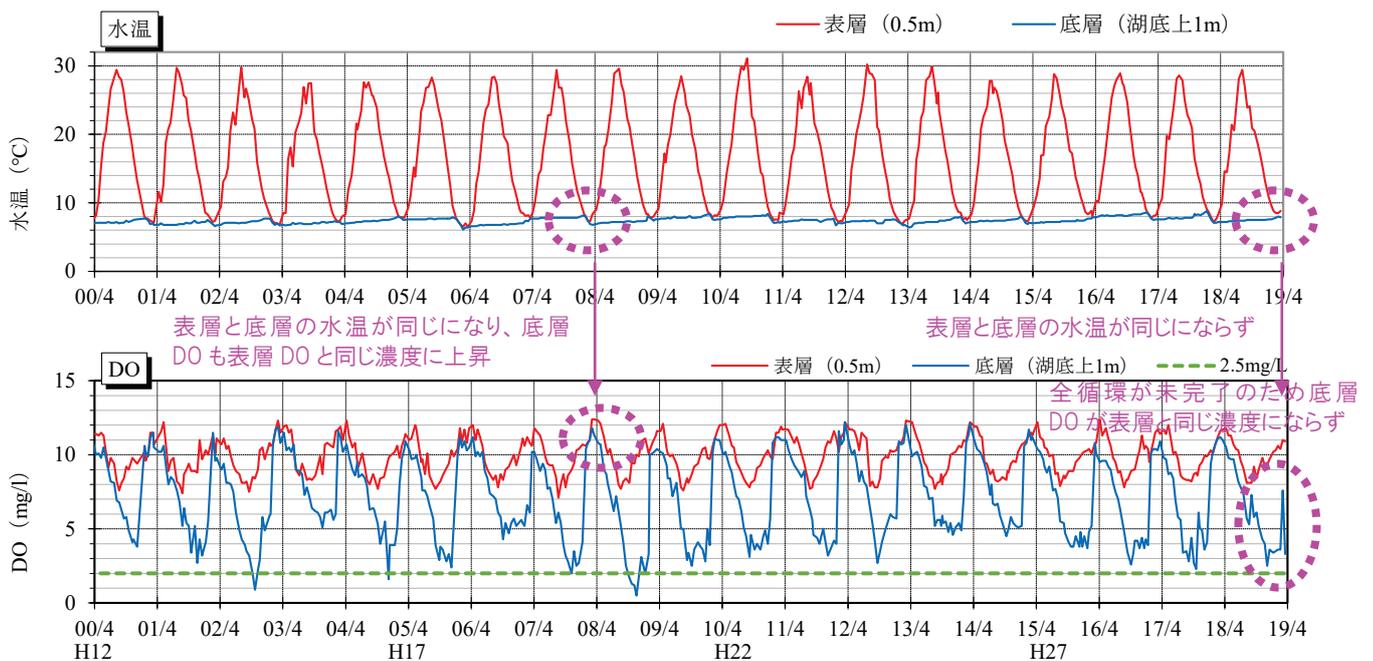


図 2.20 琵琶湖(北湖:今津沖中央、表層・底層)の水温および DO の変化(月別値:2 回/月)

<sup>1</sup>滋賀県：令和 2 年度第 1 回滋賀県環境審議会水・土壌・大気部会資料

## 2) 全循環不全による底層の貧酸素化

図 2.21 に、池田湖（鹿児島県）の水温と DO、近傍の指宿アメダスの気温を示します。指宿アメダスの年平均気温グラフから、近年 40 年間で約 1℃の上昇が見られています。

季節的なサイクルである全循環は、主に冬に気温が十分低下することで表層の水温が低下し、表層と底層の水温差がなくなることで生じます。1986 年以降、その水温差は大きくなっており、表層から底層までの全循環が生じず底層 DO がほぼゼロの状況が続きました。しかし、2010 年以降、それまでより水温差が小さくなり、全循環が生じています。全循環により表層と底層の水が混合した結果、底層 DO が回復しています。前述の琵琶湖とは逆の事象が生じており、各湖沼での事象を把握することが重要です。

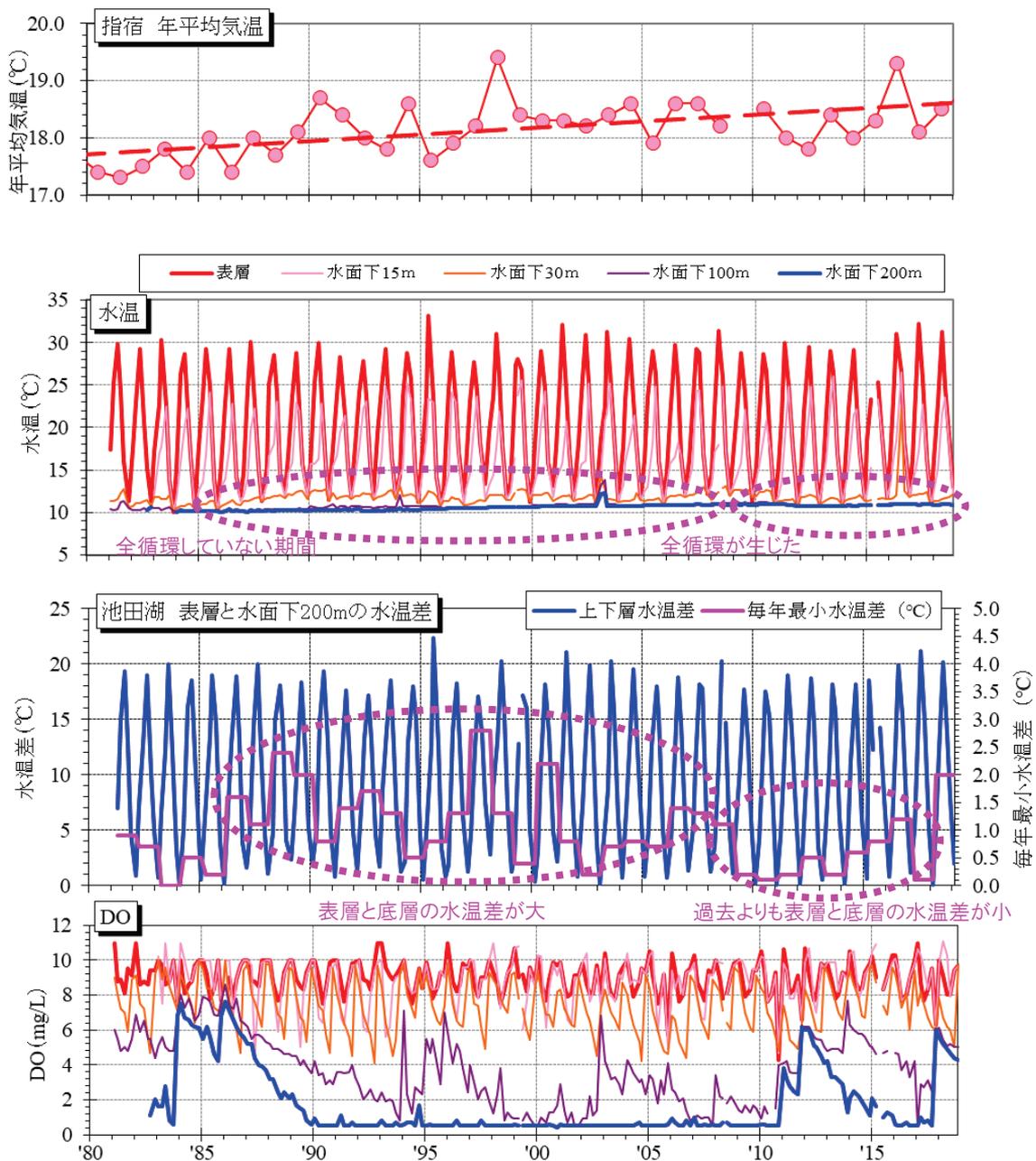


図 2.21 池田湖(基準点 2)の水温変化および DO の変化

図 2.22 に、野尻湖（長野県）の水温と DO、近傍の飯山アメダスの気温を示します。飯山アメダスの年平均気温は、1980 年頃からの約 40 年間に約 1.5℃の上昇が見られています。

湖水温の表層と水深 30m での毎年最小水温差がほぼ 0℃であり、過去から現在まで変化は見られていません。前述の池田湖では全循環が生じず、底層 DO の低下が継続しましたが、野尻湖では、底層 DO は毎年春に表層と同じ濃度に回復しており全循環が生じています。一方で、底層 DO の低下は大きくなっています。2011 年の夏季に始めて底層 DO が大きく低下し、その後も 2014 年以降、底層 DO の低下が見られるようになっていきます。

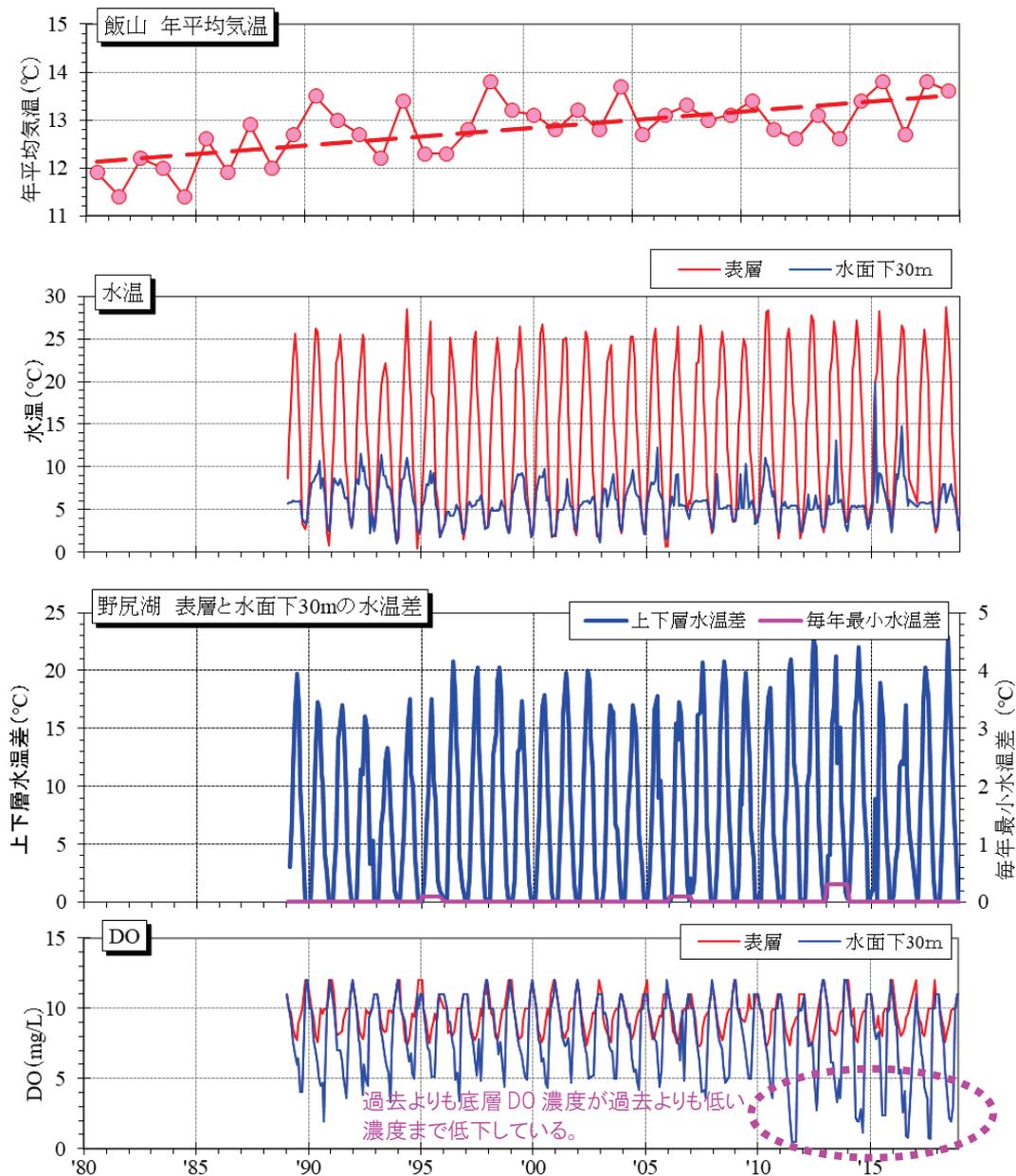


図 2.22 野尻湖(湖心)における水温および DO の長期的な変化

### 3) 底層水の貧酸素化と栄養塩の溶出

図 2.23 に池田湖（鹿児島県）の水質変化を示します。1986年に全循環の停止が確認されて以降、底層 DO がほぼゼロとなり、底層の T-N、T-P の濃度が上昇し、これは湖底泥からの溶出によるものと考えられます。2011、2012、2018年に全循環が確認され、底層 DO が回復すると、底層の T-N、T-P 濃度も減少しています。

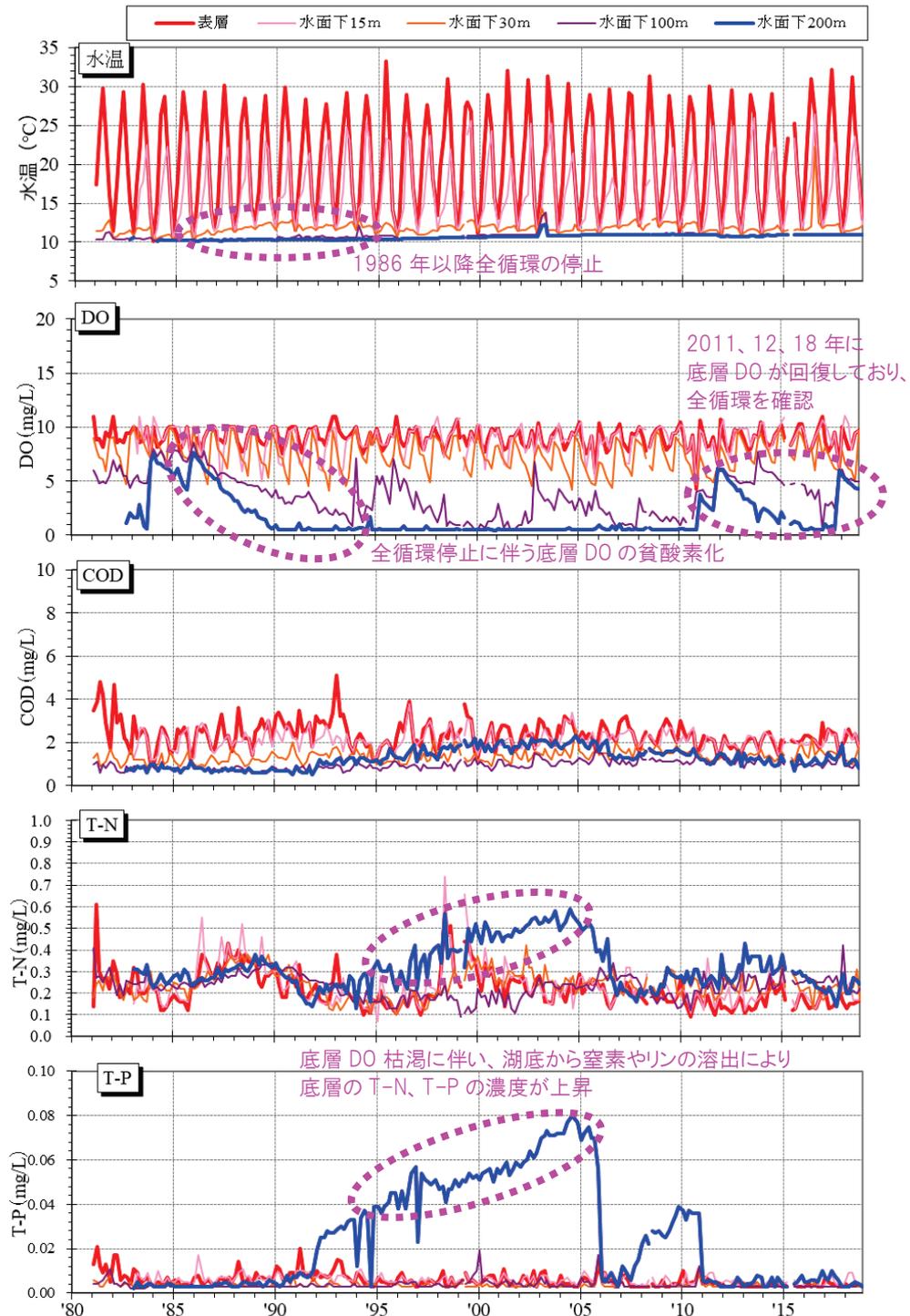


図 2.23 池田湖(基準点 2)における長期水質変化

#### 4) 富栄養化、植物プランクトンの増殖

富栄養化が水質問題となっている八郎湖（秋田県）では、近年、夏期の水温が過去よりも高くなる年が見られています。また、図 2.25 に示すように、植物プランクトン（Chl.a）が増殖し、COD の増加も大きくなる傾向が見られています。植物プランクトンの増殖には様々な要因がありますが、水温が上昇すると植物プランクトンは増殖しやすくなります。なお、T-N や T-P については、流域での負荷削減対策による影響（削減効果）等もあり、気候変動に起因した変化は明確に確認されていません。

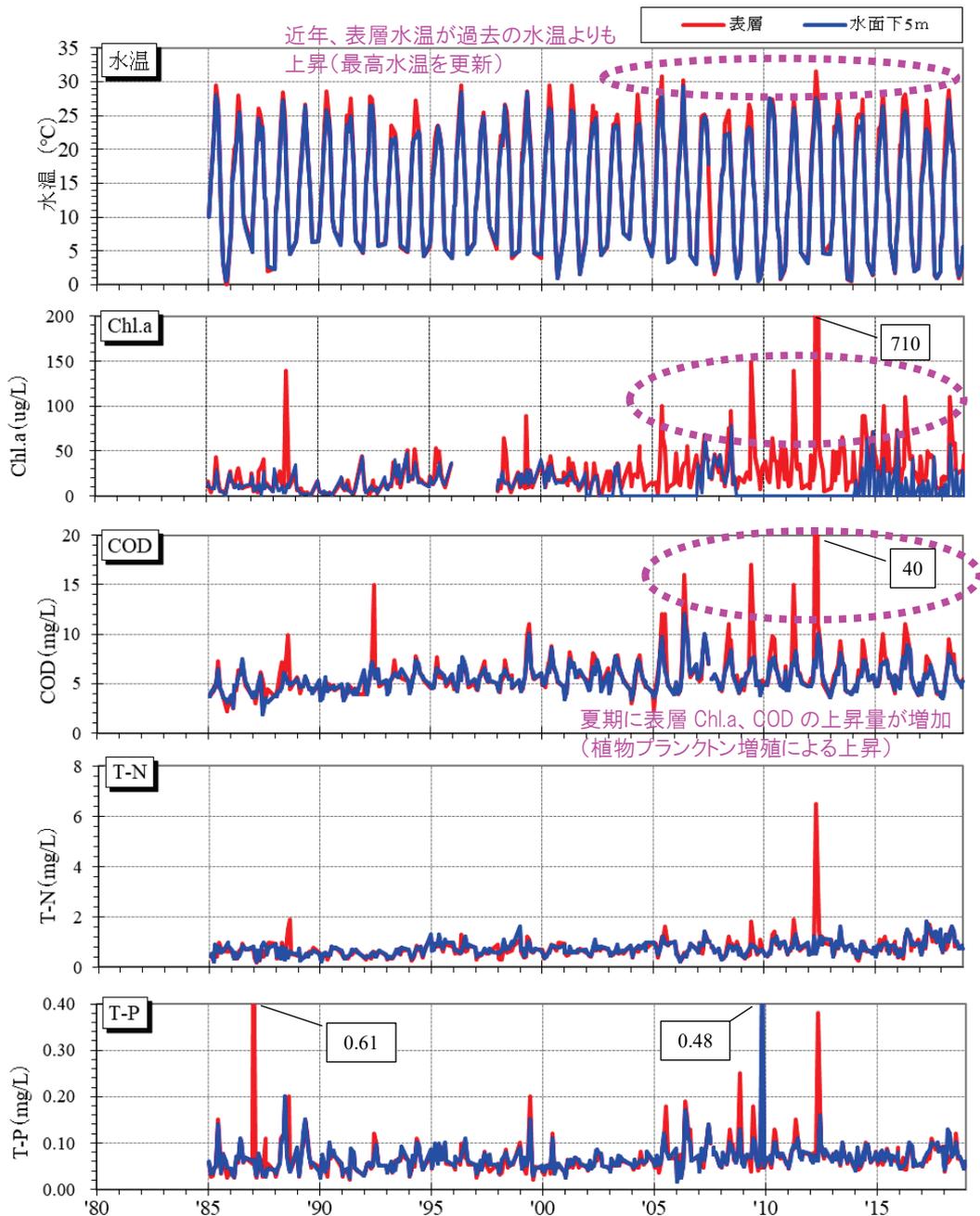


図 2.24 八郎湖(調整地湖心)における長期水質変化

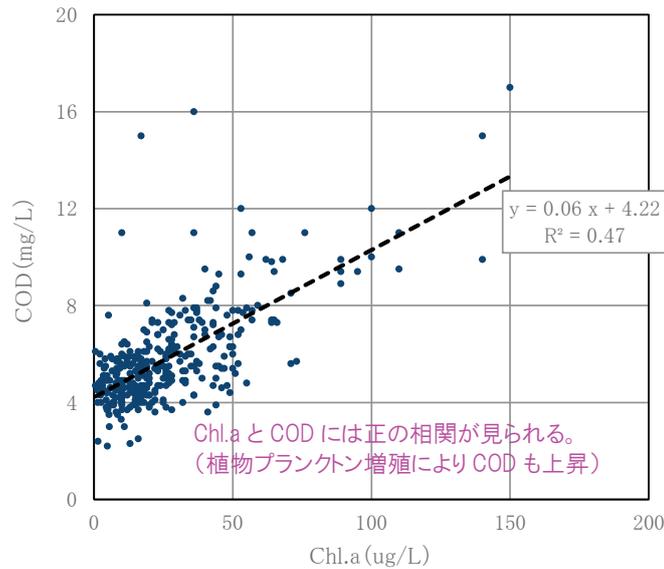


図 2.25 クロロフィル a(Chl.a)と COD の関係(八郎湖:調整地湖心表層)

#### (4) 積雪・融雪出水の変化

気候変動の影響によって降雪量および雪解け時期の変化が想定されます。これによって、春先に融雪出水が生じている地域での湖沼においては、融雪出水に伴う河川流量が増加する時期やその量に変化し、現在とは異なる湖沼への流入水量、流入負荷量となり、湖沼の水質変化に影響を及ぼす可能性が考えられます。

そこで、図 2.18 で示した 21 湖沼のうち、降雪および融雪出水の影響が想定される 5 湖沼の流域について、現在までの積雪深の状況についてアメダスデータを用いて整理しました(図 2.26)。ここでは、各湖沼の近傍の気象観測所での積雪深のデータを整理しています。

北海道の湖沼(阿寒湖)について、1980年代と2010年代では、明確な変化は見られていません。一方、東北地方の十和田湖では、1980年代に比べて2010年代は期間全体で10ヶ年平均での最深積雪深の減少が見られました。また、東北地方より南の湖沼(野尻湖、琵琶湖、宍道湖)では、春に融雪し、積雪深がゼロとなる時期が、1980年代に比べると2010年代では早くなる傾向が見られています。なお、ここでは湖沼の流域全体ではなく、積雪深が観測されている地点での整理であることに留意が必要です。

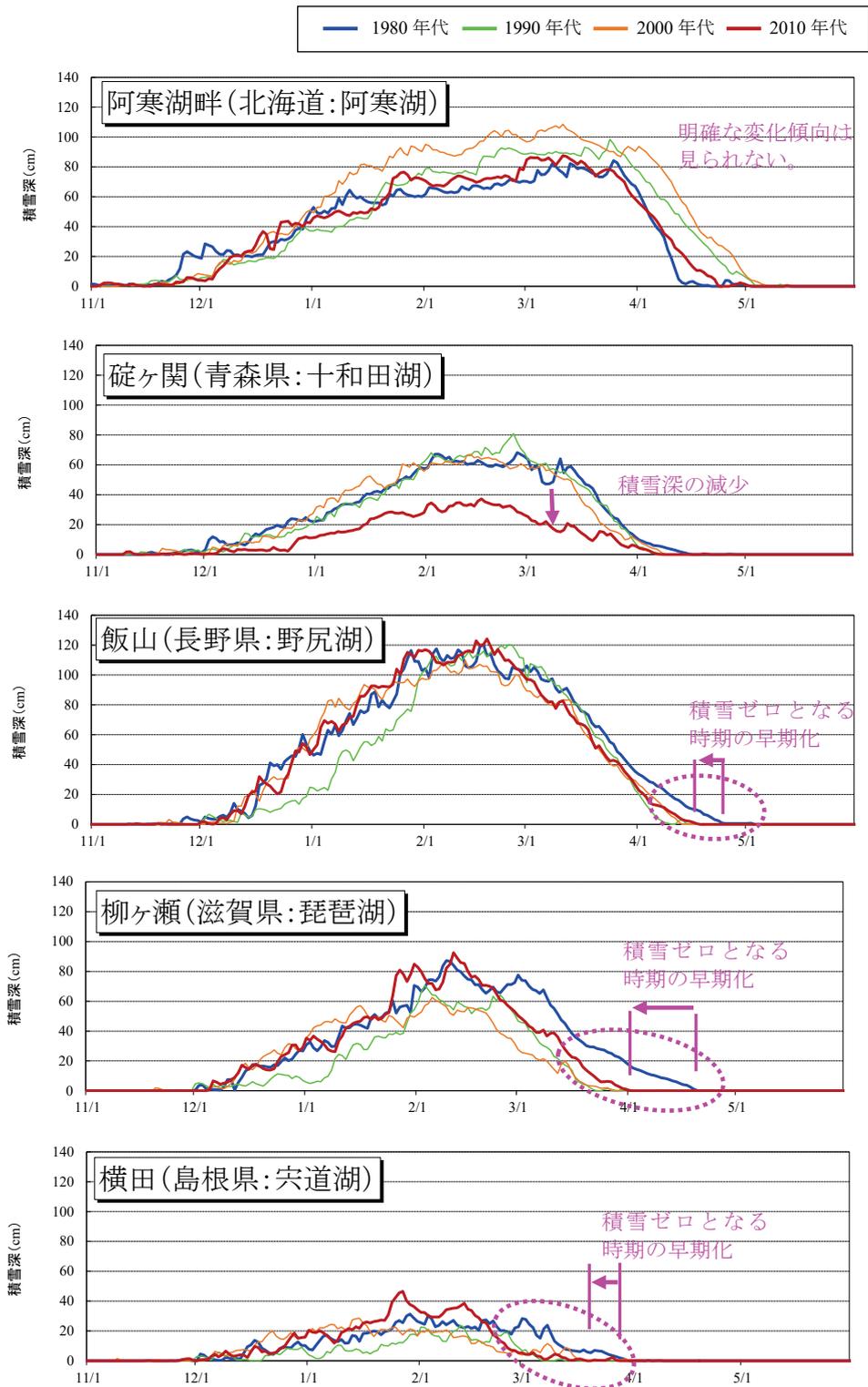


図 2.26 日々の最深積雪深の過去と現在での変化  
 (各年代での同一日の10ヶ年平均、気象庁アメダスデータ)

## (5) 湖面結氷の変化

諏訪湖（長野県）では、「御神渡り」が地域の歴史・文化および観光資源となっていますが、過去に比べて御神渡り（湖面の氷が割れる現象）が確認されない年が多くなっていることが見られています（図 2.27）。

また、濱田ら<sup>1</sup>は、日本国内の湖沼の結氷と周辺での気温観測データの積算温度（日々の気温の合計値）との関係から結氷条件を整理しています。例えば、榛名湖（群馬県）では周辺気温の積算気温が $-80^{\circ}\text{C}$ 以下になると結氷することが示されています。また、同様の方法により、摩周湖（北海道）や中禅寺湖（栃木県）等でも結氷境界の積算温度が推定され、湖沼ごとに積算温度が異なっている報告がなされています。

これらから、将来の気温上昇によって、結氷への影響の可能性が推定されます。

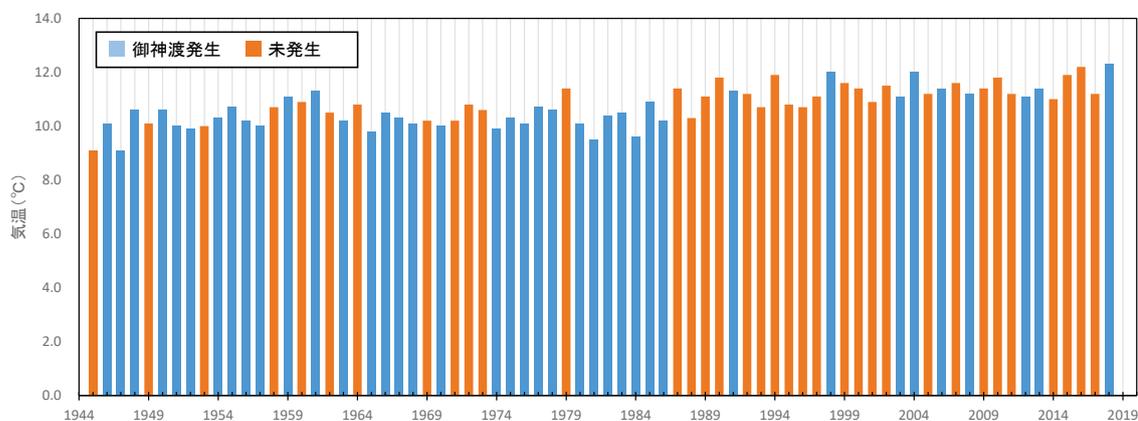


図 2.27 諏訪湖における「明海」「御神渡り」の発生と気温の関係

出典：信濃毎日新聞（2019年1月31日朝刊）掲載の資料を元に作成。縦軸は年平均気温。

※御神渡り：全面結氷した氷の厚さが10cm以上になり、零下 $10^{\circ}\text{C}$ 程度の冷え込みが数日続くと、湖面の氷が大音響と共に山脈のように盛り上がる現象

<sup>1</sup>濱田ら「日本国内湖沼の結氷条件と温暖化による変化」、陸水物理学会第33回学術大会、2011年

## (6) 流入負荷量の変化

湖沼における水質変化の要因の一つに、流入河川を通じた流域からの流入負荷量があります。流入負荷量は、図 2.28 に示すように、流域の社会状況（人口や土地利用）や気象（主に降水量）により変化します。降雨時には流域の地表面等から負荷が発生し、河川へと流出しますが、雨の降り方が変化すると河川流量が変わります。

河川流量と負荷量の関係は LQ 式 ( $L=a \times Q^b$ : a, b は係数) で表されます。図 2.29 に斐伊川における LQ 式を示します。負荷量は、降雨が無い平常時と出水時で流量に対する関係性が変化します(図 2.29 の青と赤線)。降雨があると表面流出等によって流域の土地表面等から汚濁とともに河川へ流出してくるため、負荷量が大きくなります。LQ 式のべき乗の値 (b) が 1.0 より大きいと、負荷量は指数関数的に増加する特徴を有しています。

ただし、このような関係性は河川によって、また物質によって異なるため留意が必要です。湖沼の流域が広く出水時の流入による影響が大きいと考えられる場合には、平常時だけでなく、出水時の流量観測、水質調査を行い、関係性を得ることが必要です。(※調査は「環境省「非特定汚染源対策の推進に係るガイドライン(第二版)」、平成 26 年 12 月」も参考にできる)

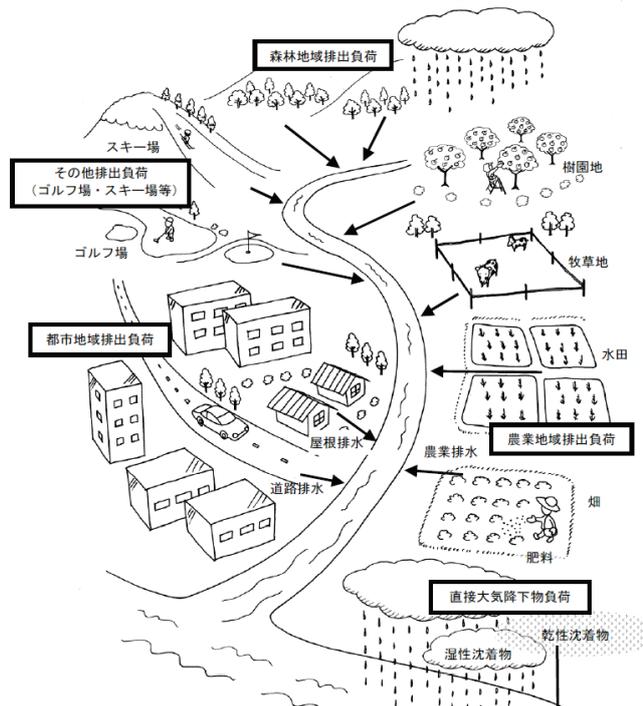


図 2.28 流域で発生する負荷の排出源

出典：環境省「非特定汚染源対策の推進に係るガイドライン(第二版)」、平成 26 年 12 月

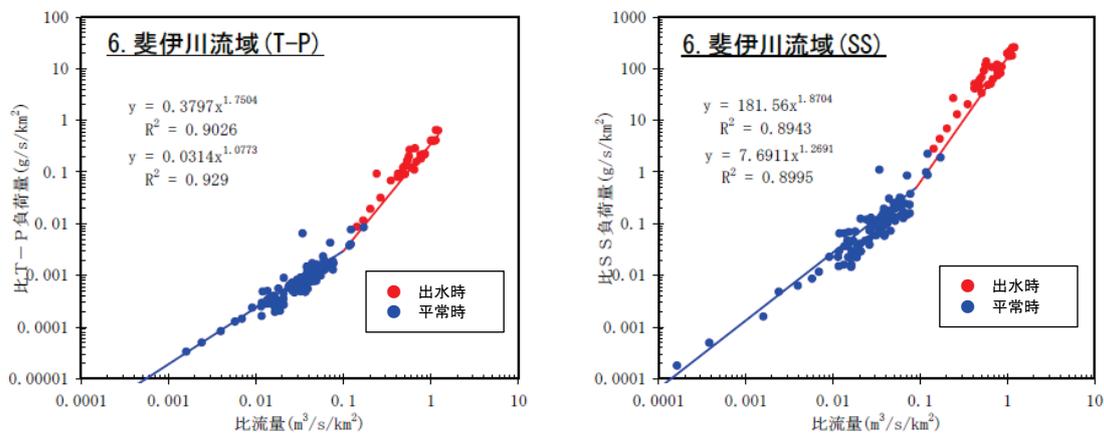


図 2.29 宍道湖に流入する斐伊川での LQ 式(流量・負荷量の相関式)

出典：湖沼技術研究会「湖沼における水理・水質管理の技術(平成 19 年 3 月)」、国土交通省 HP

## 2.3 湖沼における適応策について

### 2.3.1 「適応」とは

一般的に、気候変動への対策としては、図 2.30 に示すように「緩和」と「適応」に大別されています。

- 緩和とは：気候変動の原因となる温室効果ガスの排出を抑制
- 適応とは：既に起こりつつある、あるいは起こりうる気候変動の影響に対して、自然や社会のあり方を調整



図 2.30 緩和と適応の関係

出典：地方公共団体における気候変動適応計画策定ガイドライン（初版） 平成 28 年 8 月 環境省

気候変動適応法において「気候変動適応」とは、「気候変動影響に対応して、これによる被害の防止又は軽減その他生活の安定、社会若しくは経済の健全な発展又は自然環境の保全を図ること」と定義されています。つまり、既に起きつつある、あるいは将来起こりうる気候変動に備えるための取組が、気候変動の影響への「適応」です。

### 2.3.2 適応の考え方

気候変動適応計画<sup>1</sup>では、適応を検討する上での重要な考え方としては、次の3点が挙げられています。

- ・ 強靱性の構築を通じた適応能力の向上
- ・ 不確実性を伴う気候リスクへの対応
- ・ 適応と相乗効果をもたらす施策の推進

また、同計画では適応策の考え方について、以下のように記述されています。

＜気候変動適応計画（第4節基本戦略）での適応策の検討に関する記載＞

- ・ 我が国の社会経済及び自然環境の状況や地域ごとの特性、分野ごとの特性、気候変動影響の程度等を踏まえて、工学的・生態学的手法、土地利用、社会的・制度的手法等の様々な手法を適切に組み合わせ、社会システムや自然システムの強靱性が確保できるよう、総合的に適応を進めていくという視点を持つこと
- ・ 適応策自体が環境に負荷を与えるものとならないよう自然環境の保全・再生・創出に配慮すること
- ・ 目的や地域特性に応じて生態系を活用した適応策などの自然環境が有する多様な機能も活用すること
- ・ 適応と相乗効果（コベネフィット）をもたらす施策、すなわち、適応を含む複数の政策目的を有する施策を推進すること

また、地方公共団体が策定する地域適応計画を策定することの重要性として、将来の気候変動影響に備えて、その被害を防止・軽減していくためには、科学的な知見に基づき、中長期的な視点で計画的に対策を進めること、さらに気候変動の影響は幅広く多様であることから、全体で整合のとれた取組を推進することが求められる一方、地域における優先事項を明らかにし、適応を効果的かつ効率的に推進していくことが必要とされています<sup>2</sup>。

<sup>1</sup> 気候変動適応計画（平成30年11月27日閣議決定）、URL：<http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf>

<sup>2</sup> 地域気候変動適応計画策定マニュアル（平成30年11月）、環境省

「地域気候変動適応計画策定マニュアル<sup>1</sup>」においては、既存施策に対して、気候変動影響に対して対応力があるか、無ければ追加的な適応策を検討する必要がある、といった対応の考え方が述べられています。

＜地域気候変動適応計画策定マニュアル（P52～53）での記載を引用＞

適応策は、現在既に生じている影響に加え、予測されている将来の気候変動影響にも対応する必要があります。そのため、既存施策が将来の気候変動影響に対して、十分な対応力を持っているか、あるいは持っていないため追加的な適応策を検討する必要があるかなど、適応策を検討するための方向性を整理することが重要です。

対応力の検討は、図 27 に示すフローで実施することが考えられます。なお、既存施策の将来影響に対する方向性は、図 28 のように設定する例が考えられます。

なお、一つの気候変動影響に対する既存施策が複数ある場合は、複数の施策を合わせて、影響の将来の変化に対応できるかを総合的に判断します。

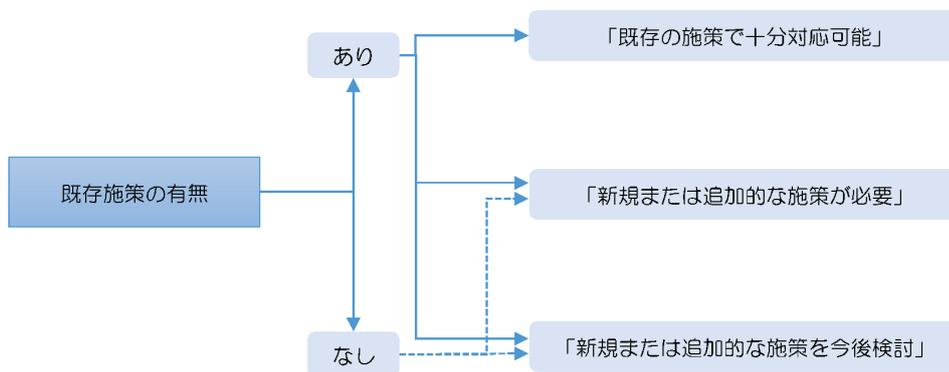


図 27 STEP5 の実施フロー

既存の施策で十分対応可能	新規または追加的な施策が必要	新規または追加的な施策を今後検討
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 将来の影響に対して、既存施策が十分に対応可能と考えられるが、必要に応じて施策の見直し等を行う場合など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 既存影響への対応としても効果が薄くなってきており、早急な既存の施策の見直し等が必要と考えられる場合など</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 短期（～5年）の気候変化では、既存の施策で概ね対応可能と考えられるが、中長期（5年～）では、見直し等が必要と考えられる場合など</li> </ul>

図 28 既存施策の将来影響への対応力の方向性の例

<sup>1</sup>地域気候変動適応計画策定マニュアル（平成 30 年 11 月）、環境省

### 2.3.3 湖沼における適応策

湖沼において、将来の気候変動による影響やそれに対する適応策を考える場合には、地域における湖沼の特徴に応じて考える必要があります。

#### (1) 湖沼における適応策の考え方

##### 1) 何に対しての適応策か

湖沼への気候変動による影響といった場合、湖沼水質が変化することや、それに伴って生息している魚類の生息場への影響や、利水での浄水処理障害や景観悪化といった影響が想定されます。

ここで、適応策として考えるべきことは、その水質変化だけでなく、その水質変化により、魚類等への生態系へどのような影響があるのか、また、人の生活や社会・経済活動へどのような影響があるのかといった視点も必要ということです。

例えば、湖水を上水道水源として使用している場合には、水温が年平均1度上昇するという将来予測がなされた場合、そのことが直接浄水処理・上水供給に影響することはほとんどないと考えられます。その視点（浄水処理）からは適応策は不要と考えることができます。しかし水温が上昇することで植物プランクトン等の増殖（アオコ発生等）につながると予測されれば、その水を取水することで浄水処理に影響が生じる可能性が考えられます。

このように、各々の湖沼の特徴\*を踏まえてどのような影響が生じるかを想定し、その影響に対する適応策です。

※湖沼の特徴には、地理的な位置や水理的特性の違いの他に、治水・利水の機能、清澄な水質・良好な自然・生態系、漁業資源、レジャーやレクリエーション等、湖沼の地域としての価値や資源があります。

##### 2) 適応策の必要性

気候変動適応法（平成30年6月制定）において、緩和策と適応策は車の両輪であり、関係者が一丸となって適応策を強力に推進していくことが法的に位置づけられています。国の気候変動適応計画（平成30年11月策定）とともに、地方自治体においても地域気候変動適応計画の策定が努力義務として位置づけられており、地方公共団体で計画の策定が進められています。

現在、地球温暖化は進行中であり、気候変動の影響が徐々に顕在化してきています。これに合わせて、様々な研究機関等から2050年頃（21世紀中頃）、2100年頃（21世紀末）等、将来の気温や降水量等の気象予測データが提供されています。その中でこれまでに観測されていない高温や豪雨等、極端な気象現象となるデータが出ていますが、現在でも極端な気

象は生じています。例えば、既往観測最大を超過する豪雨が生じ、氾濫等による被害の発生や、各地での最高気温の更新、猛暑日の頻発などが生じています。このため、2050年、2100年といった将来を待つのではなく、速やかな適応策の検討、それに応じた対応が必要です。

湖沼は、固有の自然環境を有し、地域資源として人間生活・社会経済にとって不可欠な存在です。湖沼の価値を、将来にわたって守るとともに、湖沼と人が共生していくため、気候変動による影響に対する適応策が必要です。

### 3) 関係する主体の連携による実施の必要性

適応策を、上水道や漁業資源、観光資源への影響に対して講じる場合、それぞれの関係者と連携して取り組むことが必要です。例えば、植物プランクトンが気候変動によりさらに増殖すると予測され、浄水処理に影響が生じると評価された場合、水質保全の取組と浄水場での対応を個別に行うのではなく、組み合わせて考えることで効果的・効率的な取組となります。総合的な視点から影響を捉え、関係する各主体が連携して取り組むことが必要です。

### 4) 既存対策と新規・追加的な対策

湖沼の水質変化で見ると、例えば、指定湖沼等においては水質保全対策がすでに実施されている状況です。気候変動によりさらに影響が生じると評価されれば、まず既存対策の上積み・強化によって気候変動影響への対応を考えます。その上で、既存対策だけでは解決せず、またこれまでに生じていない水質変化が生じると予測された場合には、新規または追加的な対策も必要です。

### 5) 気候変動による変化に対しての対応と変化した状況に対しての対応

湖沼の水質保全は、元来、悪化した水質（窒素、りん、COD等）を改善するための対策（負荷削減対策等）を講じることで水質を改善（濃度低下）してきました。

この対応において、気候変動による影響による水質の悪化に対して対応が必要となった場合には、悪化した水質をもとに戻す（窒素、りん、COD等の低下）という対応は適応策となります。

一方、魚類で考えると、水温が上昇する変化に対する対応としては、上昇した水温を下げるという対応だけでなく、水温が上昇した状況においても、その魚類が生息できるような対応を取る（代替地に良好な生息場所を創出創生する）ということも、適応策として位置づけられます。

この考え方は、湖沼としての価値を下げない（ここでは魚類を減らさない）という視点からの適応策となります。

## 6) 不可逆的な変化・影響に対する対応

気候変動による影響への対応には、時間軸の考慮が必要になります。一旦変化が生じてしまふと元に戻すことが難しい（不可逆な）事象に対しては、継続的なモニタリングにより水環境の変化の兆しを捉えること、事前に適応策を講じておくことが必要です。

例えば、アユなどの年魚（一年で一生を終える）の場合、気候変動によって河川の水温が異常に高かったり、流量が少なかったりする状況が発生すると子孫を残せない等の状況となり、翌年以降のその魚類の資源量に大きなダメージを与えます。このようなダメージをすぐに回復させることは難しく、不可逆的な変化になると考えられます。

このため、このような変化や影響に対しては、例えば、別の河川に遡上し産卵ができる生息場を創出しておくことでダメージを最小限にとどめることができると考えます。このような対応も適応策として捉えることができます。

## 7) 適応策の実施に向けた考え方

適応策には、河川や湖沼での栄養塩の直接除去等、時間的にすぐの実施でき、効果の発現が期待できる対策や、下水道の整備等、整備完了までに時間を要し効果の発現まで時間を要する排出負荷削減対策等、実施にかかる時間的スパンが異なる対策があります。すぐに実施できないが、中長期的に取り組む必要がある適応策に対しては、モニタリングを行いながら、影響や効果を検証して、実施を検討していくことも必要です。

## 8) 環境基準との関係

生活環境の保全に関する環境基準は、水域に対してその利用目的の適応性から類型指定されており、これまで環境基準達成に向けて様々な取組が実施されてきています。一方で適応策は、気候変動による影響に対応していくものです。環境基準の達成に向けた取組は継続していくとともに、その取組は気候変動による影響の適応にもなり得るため、必要に応じて一体的に取り組んでいくことが重要です。

### (2) 適応策の例

次ページ以降に、既往の湖沼の水質保全等での取組を参考として、適応策として想定される視点に対する適応策の例を示しています。表 2.1 には直接的な対策（ハード対策）、表 2.2 には間接的な対策（ソフト対策）、および表 2.3 にそれらを支えるモニタリングについて示しています。

また、表 2.1 では、各対策について、その対策の実施場所や、実際に対策を実施し、効果が現れるまでの事業実施期間の長さも合わせて示しています。

表 2.1 気候変動影響に対する適応策メニューの例(1/2)

適応策の視点	適応策メニュー		対策を実施する箇所				対策の実施期間	
			流域	湖沼全体	沿岸浅部	湖心深部	短期	中長期
A.底層水の貧酸素化の抑制	1	底層への酸素供給						
		深層曝気				○	○	
		表層水の深層への注入				○	○	
		高濃度酸素の注入				○	○	
	2	底質改善による酸素消費抑制						
		浚渫(継続的)		○				○
		覆土		○				○
		底土の置き換え		○				○
		干し上げ		○			○	
B.水温成層形成の抑制	3	水温成層の破壊						
		全層曝気				○	○	
		鉛直流動促進				○	○	
C.水温上昇の抑制	4	湖面遮光						
		・浮島等		○			○	
		・河畔林			○			○
		・水生植生帯整備		○			○	
	5	河川水等の導水(低温である湧水や渓流水)	○					○
D.漁獲量の確保	6	稚魚放流量の増加		○			○	
	7	漁獲量の管理		○				○
	8	新たな漁獲対象種への変更		○				○
E.生息場所の確保	9	生息環境に適した新たな生息エリアの創出		○				○
	10	種の保存のための他水域への移動、施設整備	○	○				○
F.生物保全、種の保存	11	産卵、繁殖場の創出	○		○			○
	12	種の保存のための他水域への移動、施設整備	○	○				○
	13	産卵等生息環境に配慮した湖水位管理(変動)		○				○
G.栄養塩の溶出の抑制	14 (2と同じ)	底質改善による溶出の抑制						
		浚渫(継続的)		○				○
		覆土		○				○
		底土の置き換え		○				○
		干し上げ		○				○
H.流入栄養塩増加の抑制・削減	15	河川での直接浄化						
		沈澱	○				○	
		ろ過、接触酸化	○				○	
		植生による浄化	○				○	
		底泥浚渫(継続的)	○					○

※対策の実施期間：検討を開始して対策実施して効果が現れるまでの事業実施期間の目安  
 短期：数年程度、中長期：それ以上（状況に応じて違うことがある）

表 2.1 気候変動影響に対する適応策メニューの例(2/2)

適応策の視点	適応策メニュー		対策を実施する箇所				対策の実施期間	
			流域	湖沼全体	沿岸浅部	湖心深部	短期	中長期
H.流入栄養塩増加の抑制・削減	16	生活排水処理						
		下水道整備、下水処理場の高度化(窒素りん除去)	○					○
		合流式下水道の改善	○					○
		窒素りん除去型の高度処理型合併処理浄化槽設置	○					○
	17	環境保全型農業の実施(負荷低減)	○					○
18	工場・事業場等、排水基準の強化	○					○	
19	市街地、道路等からの面源負荷削減(雨水流出抑制、路面・側溝清掃等)	○				○		
I.内部生産の抑制	20	曝気等による水の流動促進						
		浅層曝気			○		○	
		全層曝気				○	○	
		流動促進装置による流動化		○			○	
		浄化用水の導入(流動化、希釈)		○				○
	21	プランクトン増殖抑制を考慮した湖水の放流、水位管理		○				○
	22	湖内での直接浄化						
		接触酸化			○		○	
		土壌浄化			○		○	
		植生浄化			○		○	
		凝集処理			○		○	
	23	水生植生帯の整備			○		○	
	24	藻類の除去						
衝撃殺藻、紫外線殺藻等			○			○		
吸引等による直接除去			○			○		
25	漁獲による栄養塩の系外除去		○				○	
J.良好な水質の水道水の確保	26	代替水源の確保	○					○
	27	脱臭処理の強化(活性炭の準備)	○					○
	28	浄水施設の浄化能力強化	○					○
	29	局所的な清澄水域の確保(フェンス等)			○		○	
	30	水面利用方法の変更検討			○		○	
K.観光客数の維持	31	新たな遊漁施策の検討(例えばワカサギ釣りなどの代替)		○				○
	32	新たな観光施策の検討		○				○
L.土砂流出増加の抑制	33	土砂流出防止						
		森林の適正管理(流出防止)	○					○
		砂防ダム、治山ダムの整備	○					○
		未舗装道路の侵食抑制	○					○
		耕地の耕し方や土づくりの工夫	○					○

※上表のメニュー以外にも各湖沼で対策が想定されれば、適応策の検討に適宜追加されたい。

また、影響に対して直接的な対策ではありませんが、効果的な適応策の検討等に資するため、調査研究や技術開発等も不可欠です。

**表 2.2 技術開発、能力強化・向上、適応策の実施等に関わる対策の例**

分類	適応策メニュー
メカニズムの解明	<ul style="list-style-type: none"> <li>湖沼内での水質変化のメカニズムの解明</li> <li>植物プランクトンの増殖や種組成に関する研究</li> <li>水生生物に関する高水温耐性試験等、低溶存酸素耐性試験、気候変動に対する影響に関する研究</li> </ul>
予測手法の整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>流域における気候変動影響予測モデルをはじめとする、気候変動による将来予測手法や、水質変化による影響の評価手法の開発<sup>1</sup></li> <li>※適応策の定量評価や、モニタリングには適切な予測モデルの開発が不可欠</li> </ul>
技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>曝気装置等の開発 例) 大規模高効率な底層 DO 回復装置</li> <li>藻場の回復技術の開発 例) 徳島県や玄海域(佐賀県)では、植食性魚類による食害減少に取り組むとともに、藻場の造成方法や回復技術の開発を実施</li> </ul>
啓発	<ul style="list-style-type: none"> <li>気候変動影響の分かりやすい情報発信 例) 福井県では、地球温暖化現象がどの程度生じているかを県民に分かり易く情報提供(見える化)することを目的に研究チームを組織し、県民向けの「福井県から見る地球温暖化」報告書を作成<sup>2</sup></li> <li>気候変動影響に関する環境学習の実施</li> </ul>
仕組み・体制づくり	<ul style="list-style-type: none"> <li>気候変動影響の常時監視・警戒体制および温暖化対策体制の構築</li> <li>適応策を実行する流域コミュニティの構築<sup>18</sup></li> <li>湖沼水質保全計画、水質総量規制等、既存の法体系、制度との連携</li> </ul>
能力強化・向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>気候変動に関する環境学習を実施できる人材の育成</li> <li>気候変動影響、適応策についてコンサルティングやアドバイスのできる人材の育成</li> </ul>

気候変動による影響の把握や適応策の検討、および効果検証を行うため、さらに現状では十分に解明されていないメカニズムを明らかにするために、水量や水質、生物に関する長期的・継続的なモニタリングが不可欠です。また、モニタリングの実施にあたっては湖沼内および流域の河川(上流や下流)のつながりを考慮し、関係機関と連携、協力した観測体制とすることが重要です。

**表 2.3 影響把握や水質メカニズム解明、適応策の効果検証に必要なモニタリングの例**

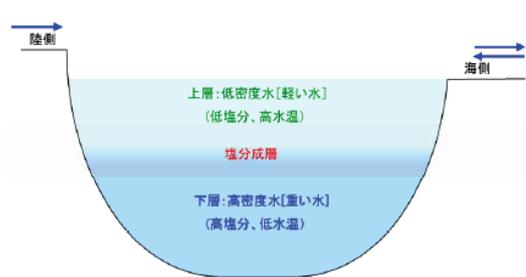
分類	内容
モニタリング	<p>&lt;メカニズムの解明、現状での影響を把握するために必要な観測&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>湖沼水温観測、水質観測</li> <li>湖沼の底層 DO の連続観測(平面的、鉛直方向)</li> <li>湖内流入河川の流量(水位)連続観測</li> <li>河川における水温連続観測 等</li> <li>アオコ、淡水赤潮等、植物プランクトンの異常増殖に対するモニタリング</li> <li>水生生物の生息状況等モニタリング 等</li> <li>生物の餌となる動物プランクトンおよび植物プランクトンのモニタリング</li> <li>魚類等、水生生物の生息数・生息状況を把握するためのモニタリング</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>モニタリング技術の向上・開発(水質、水生生物の生息量や資源量 等)</li> <li>モニタリング体制の充実 等</li> </ul>

<sup>1</sup> Climate Ready - Ontario's Adaptation Strategy and Action Plan, 2011 - 2014 p.66 (Lake Simcoe)

<sup>2</sup> 福井県衛生環境研究センター(2012.3)「福井県から見る地球温暖化」調査研究報告書  
<http://www.erc.pref.fukui.jp/center/ondanka/H23houkoku/all.pdf>

＜コラム 汽水湖における水質変化と対応例＞

「汽水」とは海水と淡水の中間の塩分を持つ水のことを言い、汽水が存在する湖沼を「汽水湖」と言います。汽水湖では塩分を含んでいることから、上下層の水の密度が塩分の違いにより異なり、塩分成層の形成が多く見られます。淡水湖と比べて強固な成層が形成されやすくなる特徴があります。その結果、上下層で水が混合しにくく、底層水の貧酸素化等の現象が生じやすくなることもあります。



汽水湖での成層のイメージ

また、生物にとっては海域や淡水域と全く異なる独自の生息場になっています。特に汽水湖は時間的、空間的に塩分の変動が生じるため、そのような変動は生物にとって大きな影響要因となります。汽水湖に生息する生物は、生産性が高く、魚類や鳥類など変化に富む多様性を有します。しかし、移動性の低い生物は、塩分等の変化により大きな影響を受けやすく、移動性のある生物もその変化に伴う影響を受けるおそれがあります。

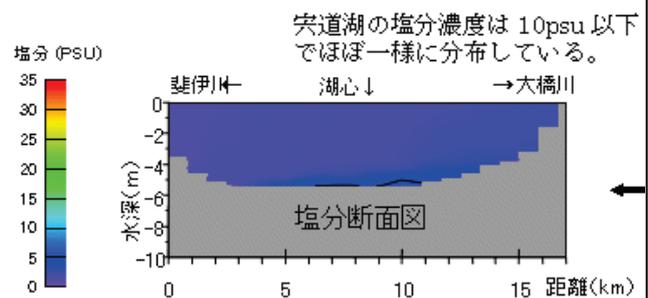
このため、人為的な作用により汽水湖環境に変化を与えると、そこに生息する生物への影響が生じるおそれがあることに留意が必要です。

出典：環境省「日本の汽水湖～汽水湖の水環境の現状と保全」平成26年12月より抜粋・加筆

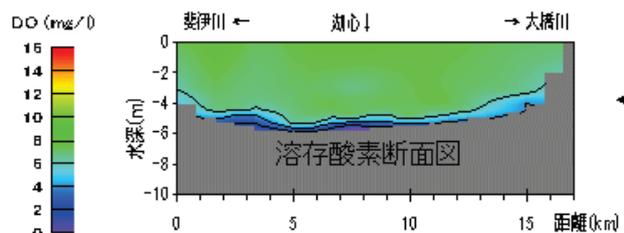
このように淡水湖とは異なる特徴を有する汽水湖においては、淡水湖とは異なる水質や生物等の保全についての取組が行われています。以下にその取組を紹介（概要）します。

事例1 宍道湖における底層水の貧酸素化と、ヤマトシジミ保全の取組について

宍道湖は島根県東部に位置し、湖面積 79.1km<sup>2</sup>、最大水深 6.4m で、湖西側の斐伊川から淡水が流入し、日本海から中海、大橋川を通じて海水が遡上する汽水湖です。宍道湖の塩分は通常 10psu\*以下でほぼ一様ですが（年により変動がある）、時々中海から 15Ppsu 以上の高塩分水が流入し、その高塩分水がしばしば湖底上 30～50cm 程度の厚さで滞留します。このため、宍道湖に生息し、地域の重要な水産資源であるヤマトシジミはその場所には生息できず、湖辺に近い、水深 0～4m までの場所に生息しています。研究者や行政による宍道湖での塩水の挙動や貧酸素水発生等の環境



宍道湖の塩分濃度は 10psu 以下でほぼ一様に分布している。



PSU：塩分濃度を表す単位  
貧酸素層は湖底上の数 10cm に形成される。

動態や、それとシジミ資源との関係等についての調査・研究とともに、漁協による漁獲管理等の様々な取組によりシジミ資源が維持されています。

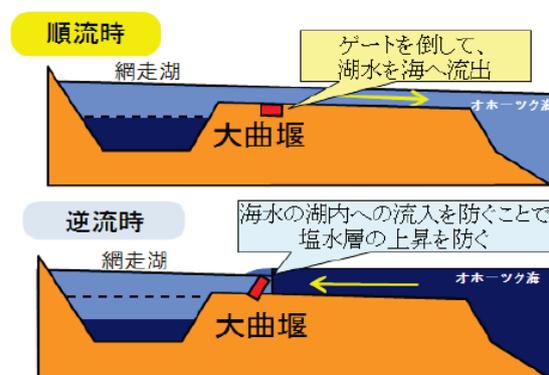
また、宍道湖は水鳥も多く飛来し、ラムサール条約にも登録されています。その取組の一つに「ワイズ・ユース（賢明な利用）」があり、地域の将来を考えた水産資源や環境保全の取組が行われています。

出典：島根県水産技術センターHP「宍道湖・中海の湖底貧酸素化現象について」より引用

## 事例2 網走湖における塩淡水境界層制御の取組について

網走湖は北海道東部に位置し、湖面積 32.3km<sup>2</sup>、最大水深 16.1m で、網走川下流に位置し、オホーツク海より海水が遡上する汽水湖です。流入した海水により淡水と塩水の二層構造となっており、下層の塩水層は水の交換が少なく、無酸素状態となっています。この塩水層の上昇に伴って青潮やアオコといった水質障害が頻発している状態です。

この対策の一つとして、塩淡水境界深度を 6～7m に保つため、塩水遡上の制御を目的として、網走川の河口より 7km 地点に大曲堰を建設し、平成 25 年度より運用を開始しています。舟運や生物影響（ワカサギの遡上や、ヤマトシジミの産卵等）を勘案して、冬期間に逆流時にゲートを起こし、順流時に倒伏させる運用を行っています。網走湖内の塩水層は海水が流入することで拡大し、風による影響で塩淡水境界層が上昇しやすくなることから堰による海水流入の制御により湖内の塩分量の増加を防いでいます。一方で、塩淡水境界層が低下すると、ヤマトシジミの生息域での塩分濃度の低下を招くおそれがあるため、配慮した堰の運用が必要となっています。



出典：国土交通省北海道開発局網走開発建設部坂井ら「網走湖水環境改善事業について-大曲堰建設影響評価と運用計画-、平成 25 年度」より抜粋、加筆修正

### 3. 湖沼における気候変動による影響評価と適応策の検討に向けて

---

本章では、図 1.2 に示すように、地方自治体が「地域気候変動適応計画」を策定するために必要となる検討のうち、湖沼の水環境について検討を行う場合の具体的な検討内容やその考え方を示しています。

#### 3.1 気候変動影響と適応策の検討の考え方

##### 3.1.1 検討の流れ

湖沼における気候変動による影響評価と適応策の検討は、図 3.1 に示すフローにより行います。

まず、検討対象の湖沼において現状把握が必要です。現時点で、気候変動による影響が生じているのかを把握します。そのために、湖沼・流域の地形的・自然的特徴（生物、生態系等）や利用状況（利水、漁業、観光資源等）、水理・水質・気象データ、および湖沼が位置する地域での将来の気象予測データ等を収集します。特に、気象や水質の過去からの長期的な変化や生息生物の変化等、湖沼における気候変動影響がすでに生じているのかどうか、生じているとしたらどのような変化かといった整理を行います。これは、気候変動影響を検討する上で重要な基礎情報となります。

その上で、将来の気象予測データ等を用いて将来の水質変化を想定するとともに、湖沼に生息する生物、また生活・経済活動する地域の人々にとって将来生じると良くない、あるいは生じてほしくないことを指標として影響を評価します。そして、その影響を回避・低減するための適応策の検討を行います。

最後に、影響評価結果、適応策検討結果を踏まえて、今後必要となるモニタリングについて検討します。

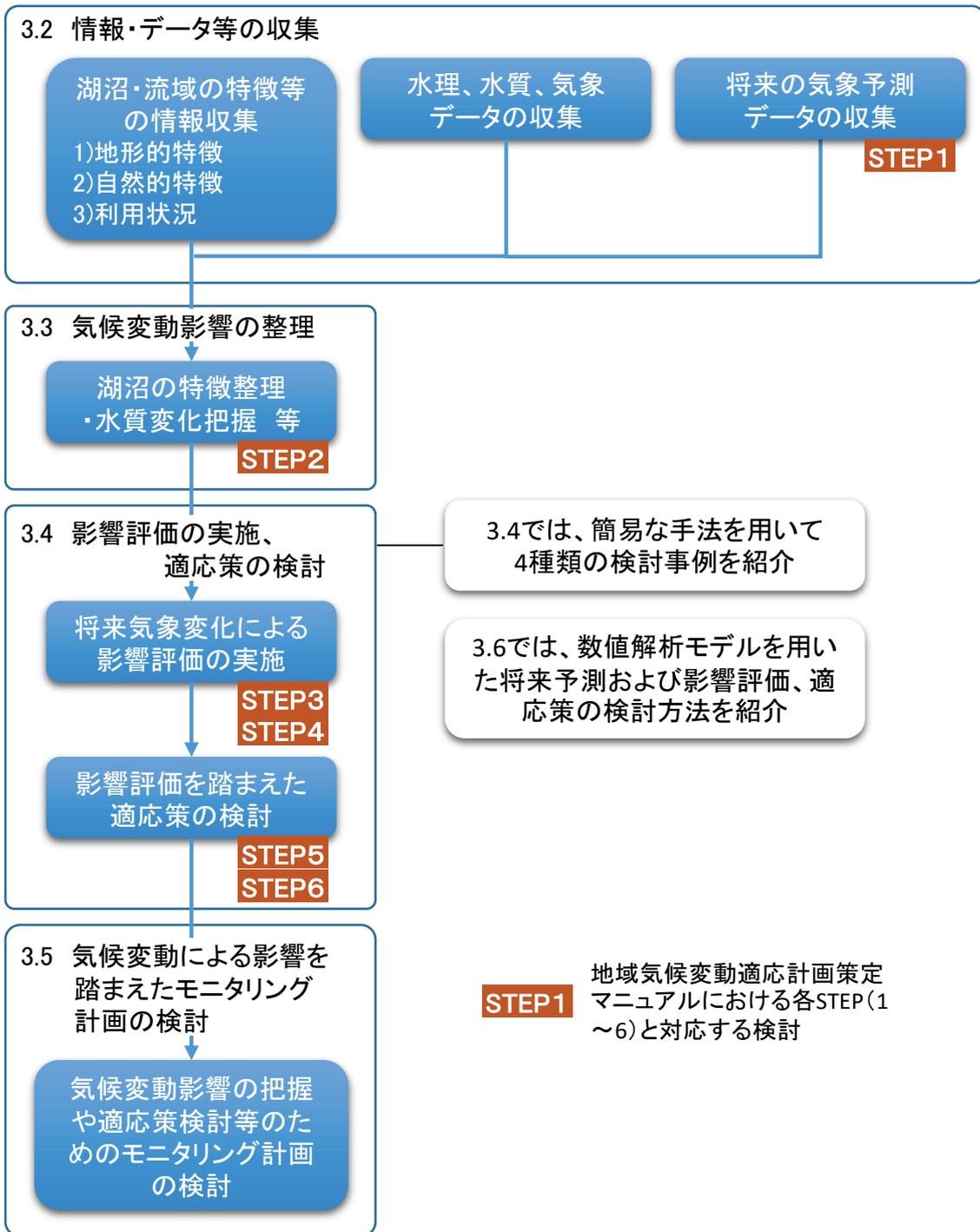


図 3.1 気候変動による影響評価、適応策の検討の流れ

※気候変動適応計画策定マニュアルの各STEPは、P1-4を参照

※図 3.1 のフローは後述する図 4.1 での(1)、(7)での検討に該当する。

### 3.1.2 影響評価・適応策の検討を行うための手法

気候変動による湖沼への影響を評価するためには、湖沼の水環境は多くの要因が複雑に関係するため解析モデルによる検討が必要です（3.1.3 に詳述）。しかし、解析モデルによる検討を行うためには、巻末の資料編で詳細を紹介している通り、解析モデルの入力条件として湖沼および流域の地形や社会条件等のデータ、および再現性を検証するため流量や水質データ等、多くのデータが必要となります。また、解析モデルを動かし、解析結果の妥当性等を判断するためには専門的な知識が必要です。このため、解析モデルを用いた検討は、地域における湖沼の重要性に応じて湖沼ごとに実施を判断する必要があります。

本手引きでは、図 3.1 に示す、湖沼における気候変動による影響評価、適応策の検討を行うための検討手法として、次の 2 つの方法を示しています。

- ・ 既存観測データ等を用いて簡易的に気候変動により生態系サービスなど湖沼の価値を損なうなどの影響を及ぼす可能性の有無とそれに対応する適応策の検討 ⇒3.4 節 および巻末の資料編に例示しています。
- ・ 解析モデルを用いて、具体的に湖沼で将来生じる水質等の変化を定量的に予測し、その水質変化により生じる影響の評価および適応策の検討 ⇒3.6 節、および巻末の資料編に例示しています。

なお、実際の影響の検討にあたっては、本手引きで示している気候変動影響の検討手法が当てはまらない場合もあります。その場合には、既往知見や論文、あるいは地域の大学や研究機関の専門家・研究者の助言を得ることが必要です。

また、解析モデルも完全に湖沼の水質変化を正確に予測することは難しいことがあります。その場合には、水質等のモニタリングを継続的に実施しながら（3.5 に詳述）、長期的に状況を把握していくとともに、モニタリングデータを蓄積し、解析モデルの精度向上も図っていくことが重要です（4 章に詳述）。

### 3.1.3 気候変動による湖沼の水環境の変化と影響の関連

湖沼における水環境の変化は、図 3.2 に示すように、様々な要因が複雑に関連します。

例えば、気候変動によって気温が上昇した際、水温上昇、植物プランクトン増加という関連がありますが、一方で、植物プランクトンの変化は、滞留時間や栄養塩等とも関連するため、それらの状況によっては気温が上昇したとしても、植物プランクトンは必ずしも増殖するとは限りません。このような関連性は湖沼の最も重要な特徴であり、単純に関連性を考えることができません。このため、気候変動による湖沼の水環境の変化を定量的に予測するためには、様々な要因を考慮できる解析モデルが必要になります。

また、我が国にある湖沼の全てが、この関連性が同じであるとは限りません。湖沼の地形や気象、周辺環境等によって、関連する・関連しないや、関連があってもその影響度は異なるという特徴もあります。

湖沼ではこのように複雑で多岐にわたる関連性があることを認識した上で、湖沼で生じる気候変動影響を検討する必要があります。

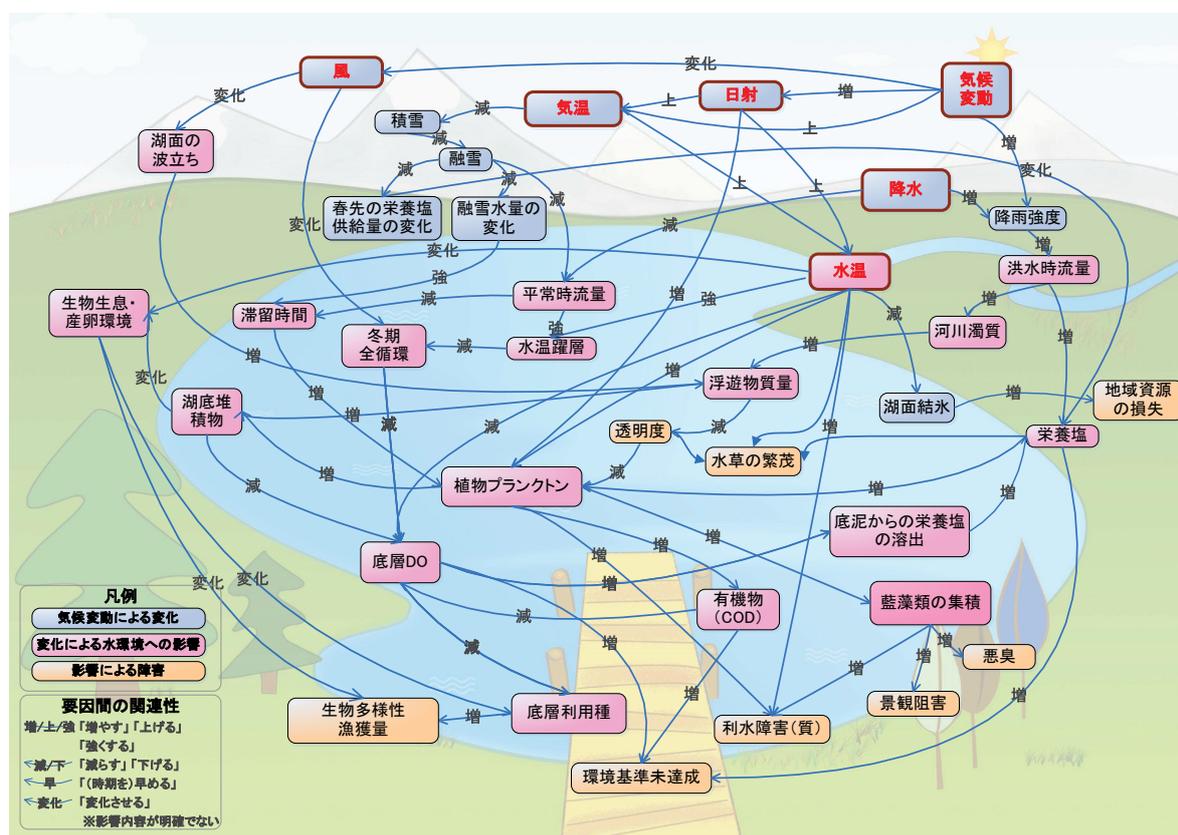


図 3.2 気候変動と湖沼の水環境との関連についての概念図  
(流域の社会条件が現在から変化せず、気象のみが変わると想定した場合)

図 3.2 に示した気候変動～環境要素の変化～影響・障害の関連性を整理すると、表 3.1 のようになります。なお、複数の要因に関連するため、例えば「植物プランクトンの変化」は水温上昇、融雪、降雨にも重複して出てきています。

気候変動による影響の検討にあたっては、気象の変化によって湖沼の水環境が変化することに加えて、その変化によって、人の生活や地域社会等へどのような影響が生じるのかを把握した上で、気候変動による影響を評価することが必要です。

**表 3.1 湖沼における水環境の変化と影響項目の例**

水環境の変化	影響を評価するための指標	生活や地域社会等への影響項目
冬季全循環の不全	① 底層水の貧酸素化、底層利用種の酸欠	底層利用種の漁獲量
	② 底泥からの窒素、リンの溶出	(植物プランクトン量の増によって) 利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド
湖水温の上昇	③ 冷水性魚類等の生息適水温とのずれ	冷水性魚類の漁獲量、遊漁人口
	④ 植物プランクトンの変化	利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド
	⑤ 魚類等の生息水深の変化	漁法、漁獲量
	⑥ 底泥からの窒素、リンの溶出	(植物プランクトン量の増によって) 利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド
湖面結氷の変化	⑦ 湖面結氷の短期化	景観、湖面結氷や氷を利用したイベント等(地域資源)
融雪時期の変化による流入量・栄養塩供給時期の変化	⑧ 植物プランクトン発生時期、量の変化	漁獲量、漁業時期
	⑨ 春先の栄養塩供給量の減少	(植物プランクトン増殖時期の変化、餌環境の変化による)漁獲量、漁業時期
	⑩ 春先の融雪水量の減少	(⑩と同じ)、利水(かんがい)
降雨強度の変化による出水時流入栄養塩量の増加	⑪ 浮遊物質量の増加、透明度の変化	漁獲量、利水(浄水処理)、景観
	⑫ 植物プランクトンの変化	利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド
降水量の減少による平常時流量の減少	⑬ 植物プランクトンの変化	利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド

## 3.2 情報・データ等の収集

現状の湖沼における気候変動影響を整理し、将来の気候変動影響を検討するために必要な次の情報・データを収集します。

### (1) 湖沼・流域の特徴等の収集

湖沼・流域の地形的・自然的特徴（生物、生態系等）や利用状況（利水、漁業、観光資源等）について、次の項目について情報を収集します。収集にあたっては、行政が観測しているデータの他、既往検討資料や、大学や研究機関での観測データ、研究成果（論文等）も収集します。

#### 1) 地形的特徴

湖沼の地形（湖岸、水深等）、流域の状況（地形、土地利用等）

#### 2) 自然的特徴

湖内や湖辺域における魚類や植生等の生物の生息・生育および分布域 等

貴重種や地域にとって重要な種（生態系ピラミッドでの上位種、地域のシンボル種等）

#### 3) 利用状況

##### A) 利水

湖水の直接取水：上水・工水・農水等での取水量、取水時期 等

##### B) 漁業

漁獲対象種およびその種の生態的特徴、漁獲量、漁獲時期 等

##### C) 観光資源

湖面利用（観光船、湖面結氷）、湖辺利用（湖水浴、親水施設） 等

### (2) 水理・水質、気象データの収集

湖沼の水質変化を把握するため、公共用水域水質測定等の定期的な観測データを収集します。観測開始より最新までの期間を対象とし、気候変動影響による変化傾向を把握するためには、可能な限り長期間（例、30ヶ年程度）のデータを収集することが望ましいです。

また、一般的に、湖沼の水質変化は気象変化に影響を受けるため、気温や降水量の他、風、日照時間等の気象データを収集します。水質データと同様に観測開始からの期間を対象として可能な限り長期間のデータを収集することが望ましいです。

### (3) 将来の気象予測データの収集

気象庁では気候モデルの出力データに基づき、日本各地域の将来（21世紀中頃、21世紀末）における気象の変化を整理して公表しています。また、環境省においても A-PLAT 等の WEB サイトにおいて都道府県別の将来の気象データについて公表しています。

これらの公表資料等のデータベースから、湖沼が位置する地方や都道府県等の将来の気象予測データ等の情報を収集します。

### 3.3 気候変動影響の整理

気候変動影響は、瞬間的ではなく長期的な視点でデータ整理を行って、過去の状況との違いを見ていくことが必要です。このため、収集した長期の気象、水質データを用いて、グラフ化等を行って、長期的に変化が生じているかを分析します。

以降では、湖沼において生じる可能性がある代表的な水質変化について整理方法を紹介します。

#### (1) 湖水温の上昇

湖水温の変化は、以下の項目等の変化が把握できるようにグラフ化します（整理例として、図 3.3、図 3.4）。長期的な整理により水温変化を把握します。また、年間平均だけでなく、季節や時期（夏、冬）に着目した整理等、湖沼の特徴に応じた整理を行います。

- ・長期的な変化の把握：年平均水温、季節別平均水温、最高水温、最低水温
  - ・冷水性魚類の生息への影響：夏の表層での最高水温（魚類の生息水深に応じて）
  - ・植物プランクトン増殖への影響：増殖時期（例：夏期）の表層での平均水温
- 等

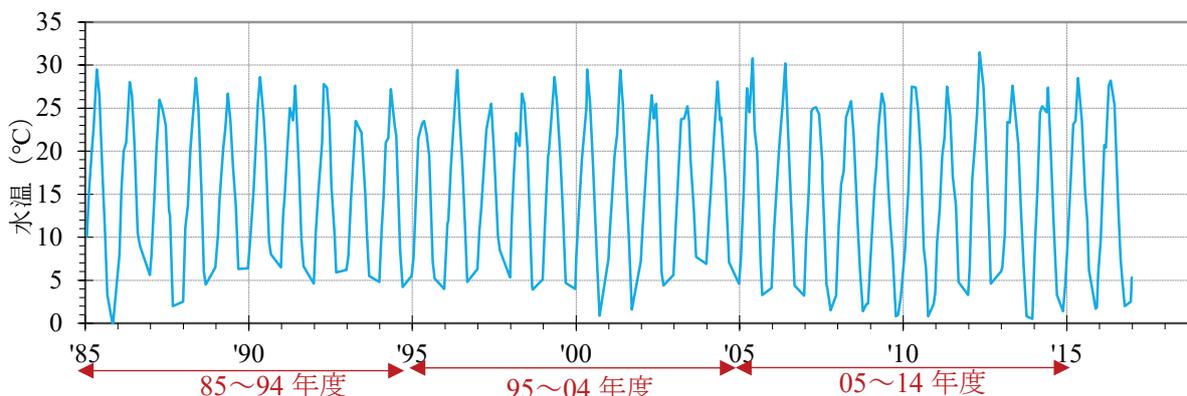


図 3.3 水温の長期的変化の整理の例(八郎湖:湖心表層データ、月別データ)

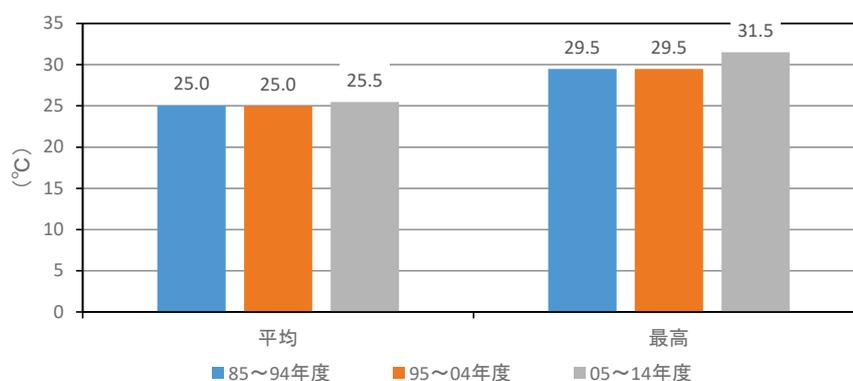


図 3.4 水温の10ヶ年平均の変化の整理の例(八郎湖:湖心表層データ)

## (2) 冬季全循環の変化

水深が大きい湖沼においては、気温とともに表層の水温が上昇する春～夏～秋に表層と底層で水温差が生じ、ある水深で水温が急激に変化する水温成層（水温躍層とも言う）が形成されます。水温成層の上下層では水の流れ（混合）が生じにくくなります。特に底層では表層から酸素が供給されにくくなり、貧酸素化が生じやすい状況になります。

秋～冬にかけて気温が低下し表層水の水温が低下して、底層水の低い水温と同程度になると表層～底層で循環が生じて水温成層がなくなり、表層～底層にかけて水温、水質が一様化します。これを全循環と言います。この循環は、湖沼の水質維持（貧酸素化の解消等）、魚類等の生息等において重要な現象です。

この現象を把握するための整理としては、湖沼内の最大水深の地点において、水深別の水温データを整理し、長期的な変化、季節的な変化の傾向を確認します（図 3.5）。全循環については、冬～春先に表層と底層の水温が同じであれば全循環が生じたと判断します。これが過去と比べて変化しているのかを確認します。

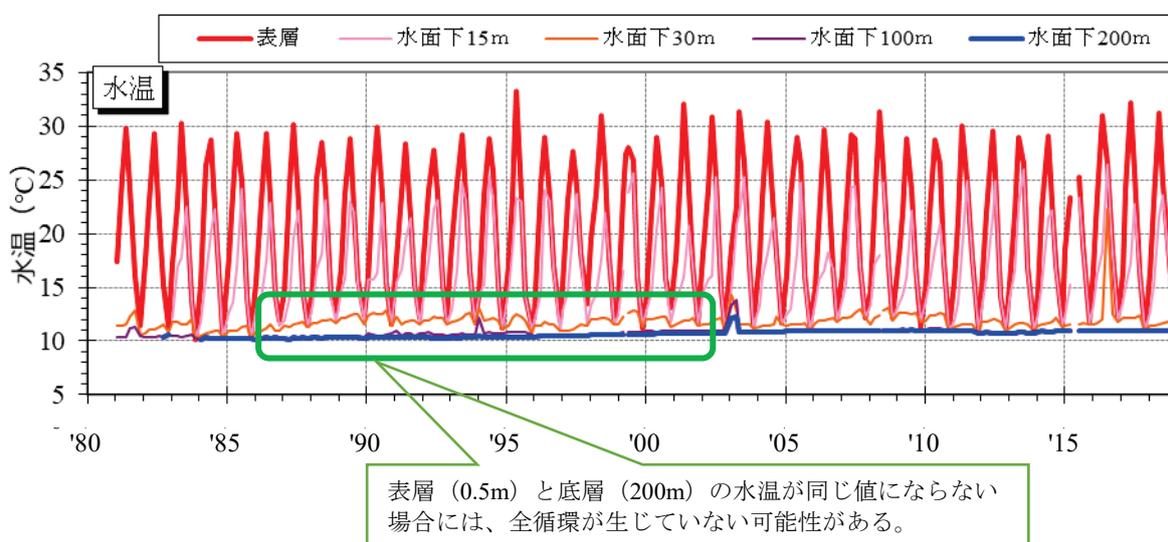


図 3.5 水深別水温データ整理の例(池田湖:基準点 2、月別データ)

## (3) 湖底層水の貧酸素化

水中の溶存酸素（DO）は、魚類等、水生生物の生息に不可欠です。また DO が極端に少ない（貧酸素）状況は、湖底泥中に含まれている窒素やりん等の物質が底泥から水中に溶出する現象を生じやすくさせ、栄養塩の供給源にもなります。

底層水の貧酸素化を底層 DO の観測データの長期的な変化から把握します。一般的には水温成層が形成される春～夏～秋にかけて底層水の DO は徐々に低下します。冬～春先に全循環が生じる（水が混合する）と表層水の DO と同じ濃度になります（図 3.6）。

また、底層水で DO が低下するのは、水中に存在する微生物が有機物を分解する際に酸素を消費するためです。底層水中の有機物の量が多いと DO の低下速度が大きくなるため、DO は低下しやすくなります。

長期的なデータから、底層水の DO 変化が過去と比べて違う状況が見られないか（最低 DO 濃度が低下している、DO 濃度ゼロが継続している等）を把握します。

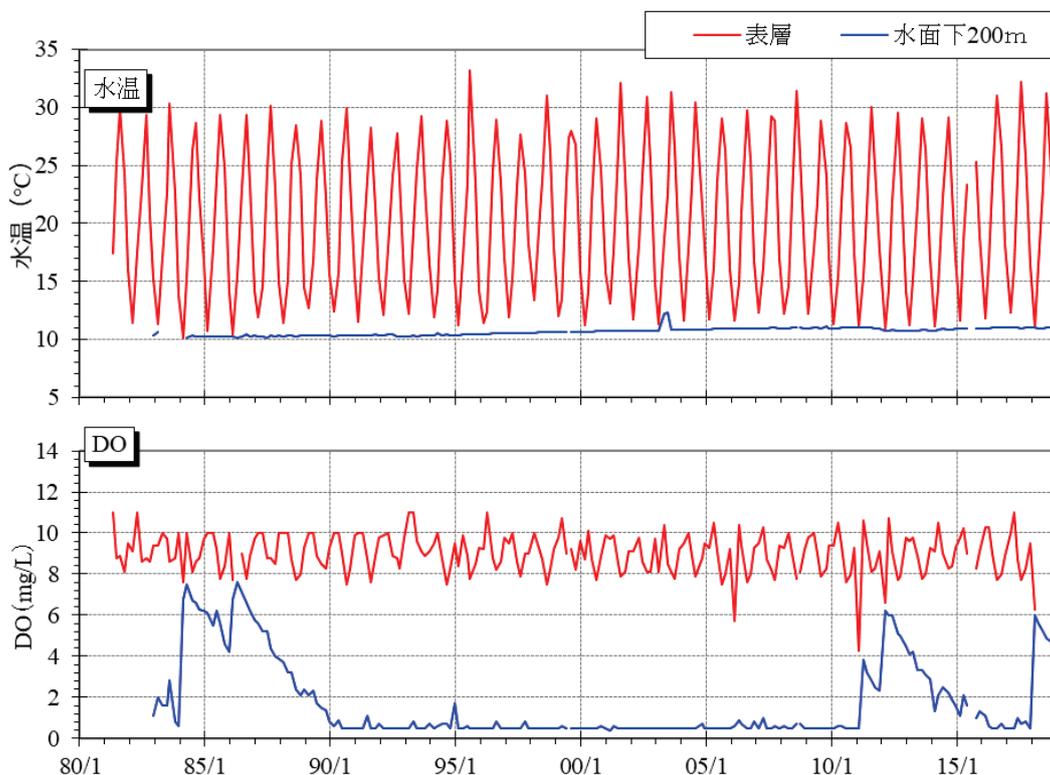


図 3.6 溶存酸素の長期的変化の整理(池田湖:基準点 2、月別データ)

#### (4) 富栄養化

##### 1) 流入負荷量の変化

湖沼への流域からの流入負荷量は、主に流入河川を通じて流入します。流入負荷量は、降雨がない時期の平常時の流入負荷量と降雨時のものがあり、降雨時には河川流量が増加しているため負荷量も大きくなります。一般的に、その増加割合は流量の増加よりも大きいと言われています。湖沼の特徴（流域の広さ等）によっては、年間に流入する総負荷量のうち、降雨時に流入する負荷量の割合は大きくなる場合があります<sup>1</sup>。また、負荷を構成する窒素やりん等の栄養塩によっても負荷量の割合は異なります。

このため、降雨量の違い、降り方（降雨強度や無降雨日数）の違いによって、流入負荷の量や流入する時期が変わり、それが湖内の水質変化に影響すると考えられます。ただし、湖沼の流入河川において、流量や栄養塩・有機物等の負荷量を長期間連続して観測され、データが蓄積されている事例は少ないです。そのため、必要に応じてモニタリングの実施や、地域の大学や研究機関でのデータ、研究成果等も活用してデータ収集、整理する必要があります。

<sup>1</sup> いんばぬま情報広場：河川の負荷流出特性（URL：<http://inba-numa.com/knowmore/more/kikou/>）

## 2) 植物プランクトンの増殖

植物プランクトンの増殖は Chl.a 濃度と T-N、T-P 濃度の長期的な変化から把握します(図 3.7)。富栄養化(窒素、りんが過多)になると植物プランクトンの増殖が生じることから、植物プランクトンの栄養素である T-N、T-P がどのような変化傾向で、Chl.a がどのような変化を示しているのかを把握します。なお、植物プランクトン量の直接的な指標観測項目としては Chl.a が望ましいですが、測定がない場合、COD を用いることも可能です(正の相関がある。図 2.24 参照)。

また、富栄養化は、気象だけでなく流域からの流入負荷も変化の要因となるため、下水道整備等、負荷削減対策の状況等、流域で発生する負荷の状況を把握しておくことも必要です。

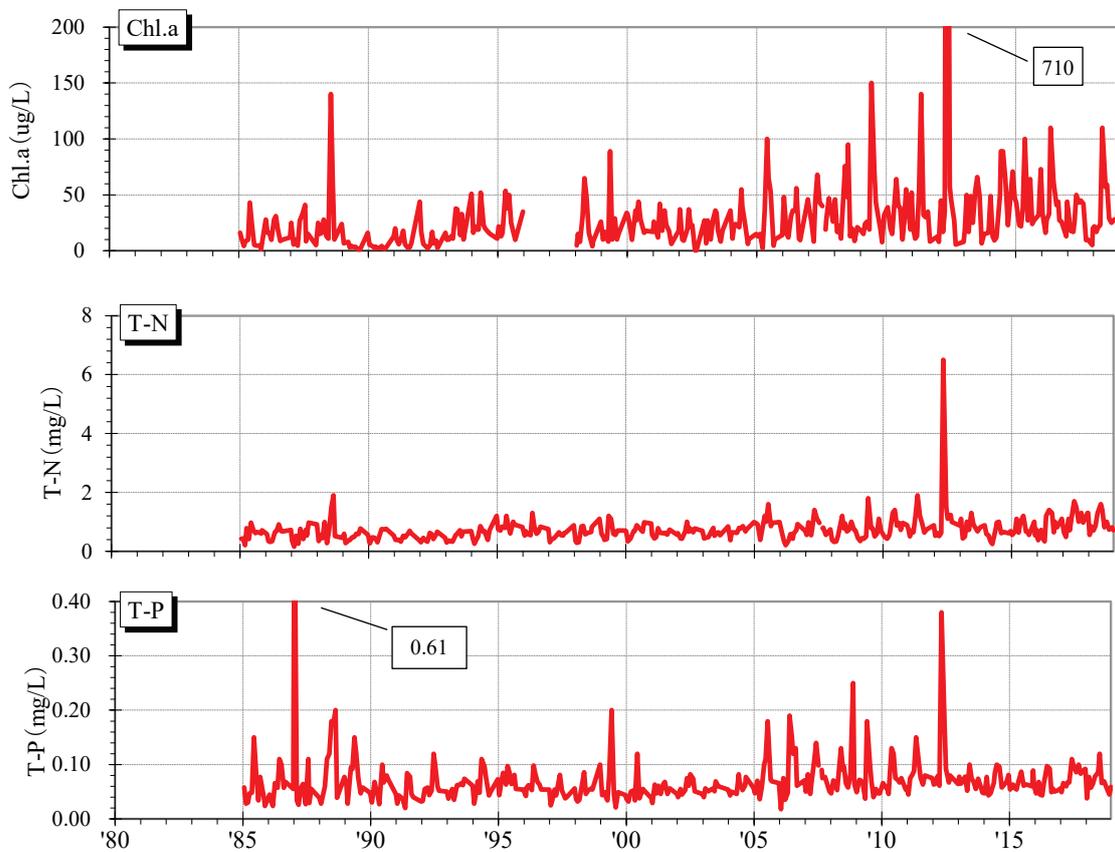


図 3.7 富栄養化の長期的変化の整理例(八郎湖:湖心表層、月別データ)

### 3.4 影響評価の実施、適応策の検討

ここまでに整理してきた湖沼の特徴や長期的な水質変化の特性から、湖沼において気候変動に伴う水環境変化による人や社会への影響を想定し、検討の必要性の有無を検討して、検討対象とする影響を選定します（表 3.2）。

前節までの湖沼に関する情報・データの整理を踏まえて、湖沼の特徴を整理して、影響評価の検討を行う必要性を判断します。

なお、検討必要性の判断にあたっては、湖沼によっては複雑な水質変化のメカニズムとなっているため、本手引きで示しているデータ以外も整理する必要性が出てくることも考えられます。必要に応じて、地域の研究機関や大学等の専門家へのヒアリング等を行います。

**表 3.2 検討対象とする気候変動影響の選定と、整理結果の例**

水環境の変化	水環境の変化 (影響を評価するための指標)	生活や地域社会への影響	情報・データ整理の結果を記入			
			湖沼の特徴	検討必要有無		
冬季全循環の不全	① 底層水の貧酸素化、底層利用種の酸欠	底層利用種の漁獲量	この欄には、前節までの情報、データの収集、および整理結果を踏まえ、各影響項目に対する湖沼の特徴を記入する。	この欄には、湖沼の特徴を踏まえ、影響評価を検討する必要性の有無を記入する。		
	② 底泥からの窒素、リンの溶出	利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド				
水温の上昇	③ 冷水性魚類等の生息適水温とのずれ	冷水性魚類の漁獲量、遊漁人口				
	④ 植物プランクトンの変化	利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド、水生植物				
	⑤ 魚類等の生息水深の変化	漁法、漁獲量				
	⑥ 底泥からの窒素、リンの溶出	利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド				
湖面結氷の変化	⑦ 湖面結氷の短期化	景観、湖面結氷や氷を利用したイベント等(地域資源)			記入例: 湖面結氷する	記入例: 必要有
融雪時期の流入量・栄養塩供給時期の変化	⑧ 植物プランクトン発生時期、量の変化	漁獲量、漁業適期				
	⑨ 春先の栄養塩供給量の減少	漁獲量、漁業時期変化、利水(浄水処理)、景観、臭気				
	⑩ 春先の融雪水量の減少	(⑩と同じ)、利水(かんがい等)				
降雨強度の変化による出水時流入栄養塩量の増加	⑪ 浮遊物質量の増加、透明度の変化	漁獲量、利水(浄水処理)、景観				
	⑫ 植物プランクトンの変化	利水(浄水処理)、景観、臭気、漁業ブランド				
降水量の減少による平常時流量の減少	(⑫と同じ)	(⑫と同じ)				

検討対象として選定された気候変動影響に対して、具体的にどのような影響評価・適応策の検討を行うのかについては、湖沼の位置や地形等の特徴によって、気候変動による水質の変化やその程度、また同じ対策でも効果の程度は異なります。このため、具体的にどのような水質変化やそれによる影響が生じ、どのような対策が必要でかつ効果的であるのかを明らかにするには、各湖沼において解析モデル等を用いた検討が必要です。

また、本手引きでは、表 3.2 で示した水環境の変化のうち、既往知見等を踏まえてデータ整理等によって簡易的に検討が可能である、次の4つの影響に対する検討方法を、以降に事例として紹介します。

- ・①冬季全循環の不全に伴う底層水の貧酸素化による底層利用種(魚類等)への影響(3.4.1)
- ・③気温上昇に伴う湖水温上昇による冷水性魚類への影響(3.4.2)
- ・④植物プランクトンの増殖による利水への影響(3.4.3)
- ・⑦湖面結氷短期化による地域への影響(3.4.4)

※丸数字は、表 3.2 に対応しています。

この検討方法では、各湖沼が気候変動による影響を受ける可能性がどの程度あるのか、影響があるとなった場合、適応策としてはどのような対策メニューが考えられるのか、といった結果を得ることができます。

また、図 1.2 や、後述の図 4.1 で示しているように、将来の予測には必ず不可実性が伴うため、検討した適応策は、実施結果やモニタリングを踏まえて定期的なチェックと、必要に応じて見直しが必要です。

### 3.4.1 全循環不全による底層水の貧酸素化と魚類等の底層利用種への影響

#### (1) 影響評価の実施フロー

全循環の不全による影響評価の実施フローを図 3.8 に示します。気候変動によって、全循環の不全、底層水の貧酸素化、及び底層利用種（魚類等）への影響が生じる可能性について検討します。

利用するデータを用いて、各々のステップで判断を行い、影響が生じる可能性について判定（評価）を行います。

ただし、可能性が低いと評価された湖沼についても、気候変動では気象の変化が急に大きくなること（例えば、異常な高温等）も想定されるため、急に影響が生じることを想定しておくことも重要です。

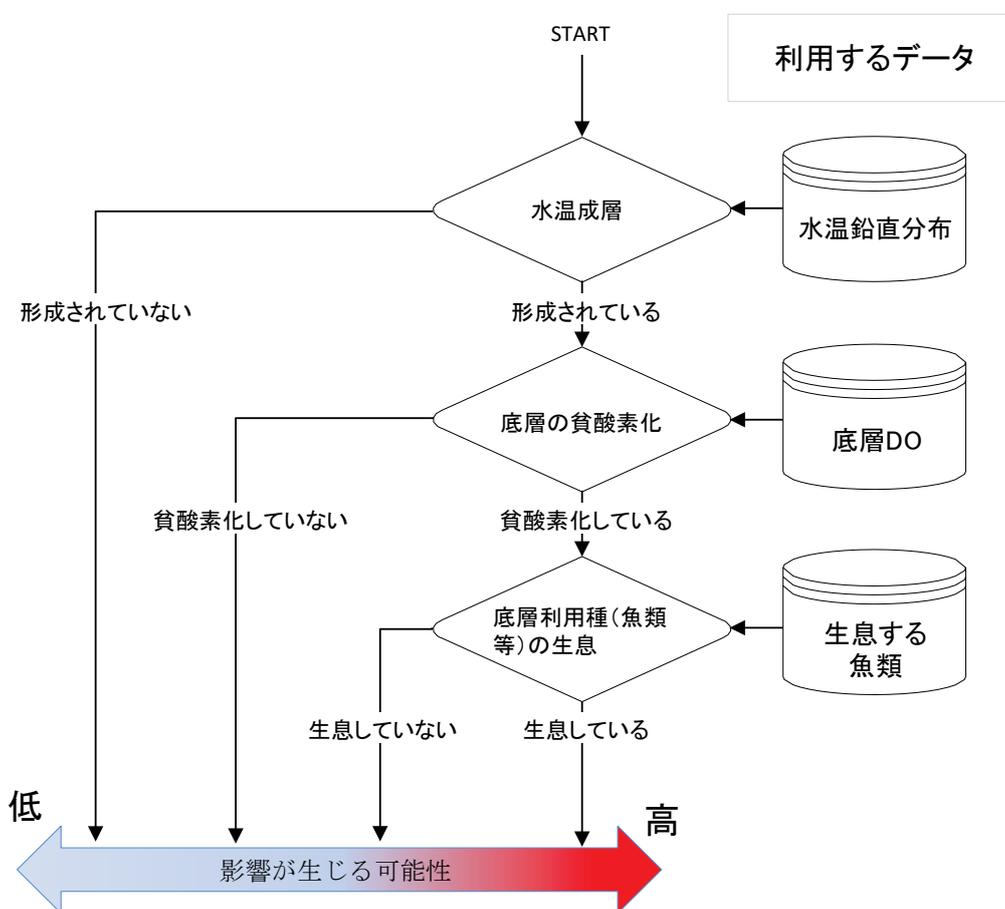


図 3.8 冬季全循環不全による底層水の貧酸素化、底生魚類の生息への影響の検討フロー

## (2) 影響評価の実施

### 1) 水温成層の形成有無の整理

夏の気温上昇により表層水温が上昇し、水温成層が形成されます。気温が低下する冬に解消しないことで全循環不全につながることから、現在、湖沼に水温成層が形成されているかどうかを確認します。湖沼の最も水深が大きい地点等において、水温の鉛直分布のデータを月別・季節別にグラフ化します(図 3.9、図 3.10)。表層水温が高くなり水温成層が最も明瞭となる、夏の時期(6~8月頃)に表層と底層の水温に差が生じていれば、水温成層が形成されていると考えられます。また、気象によって形成状況が異なるため、複数年のデータを確認します。

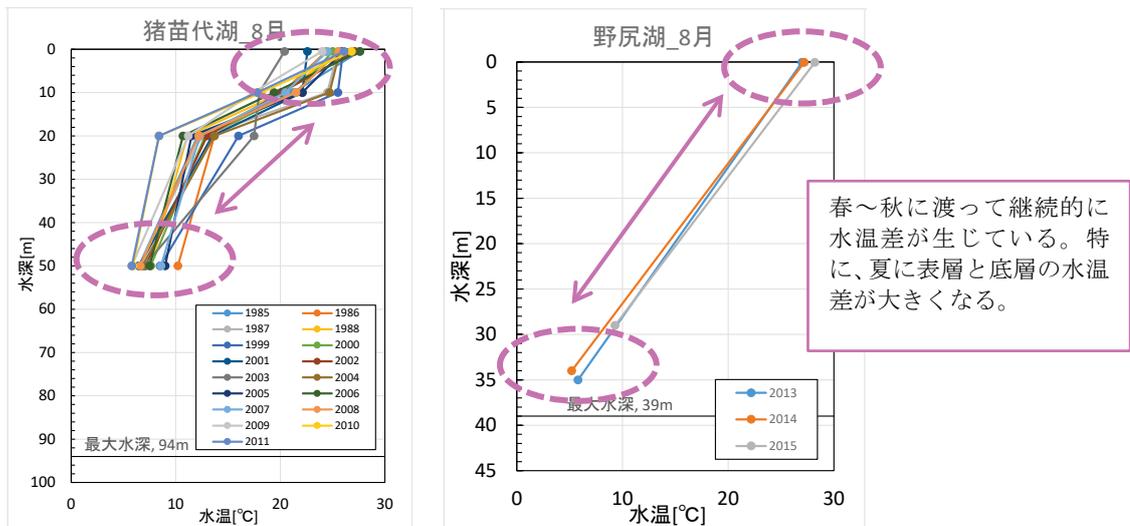


図 3.9 水温鉛直分布データの整理による水温成層の形成有無の把握(有りの湖沼の例)

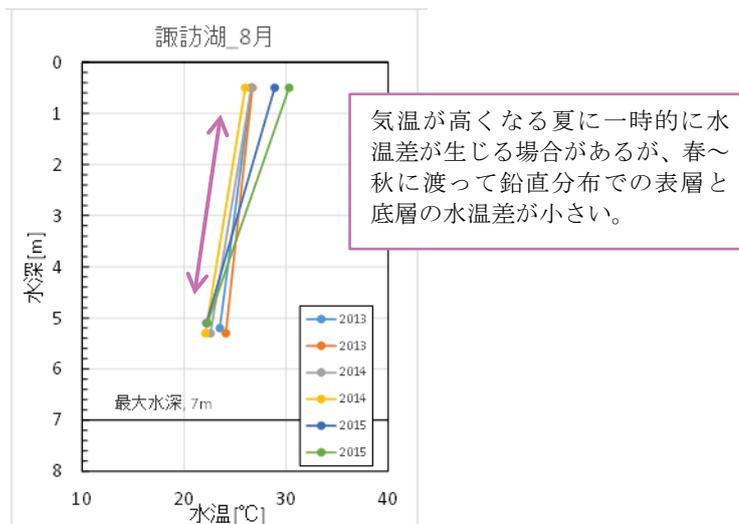


図 3.10 水温鉛直分布データの整理による水温成層の形成有無の把握(無しの湖沼の例)

## 2) 底層水の貧酸素化有無の整理

公共用水域水質測定等の DO の観測データ（毎月等）を用いて、DO 経時変化グラフを作成し、底層 DO の変化を確認します（図 3.11、図 3.12）。底層のデータとしては、湖底上 0.5m などのデータが望ましいですが、無い場合にはなるべく下層でのデータを使用します。表層水の DO 濃度は大気と接し、かつ水温によって水に溶解得る酸素量が変わるため、季節的な変化を示します。底層水の DO 濃度は、水温成層が形成される時期（春～秋）には表層から酸素が供給されにくくなるため、微生物等の酸素消費（呼吸）によって DO 濃度が低下しやすくなります。

また、貧酸素化と判断する DO 濃度は、表 3.3 のように生息している魚類の貧酸素耐性に応じて設定する等があります。各湖沼で検討対象とする魚類や水質変件事象（貧酸素水塊等）に応じて影響が生じる濃度を設定します。

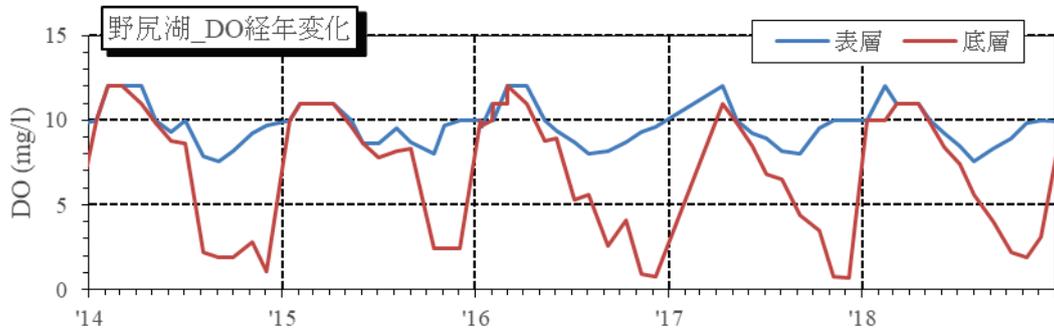
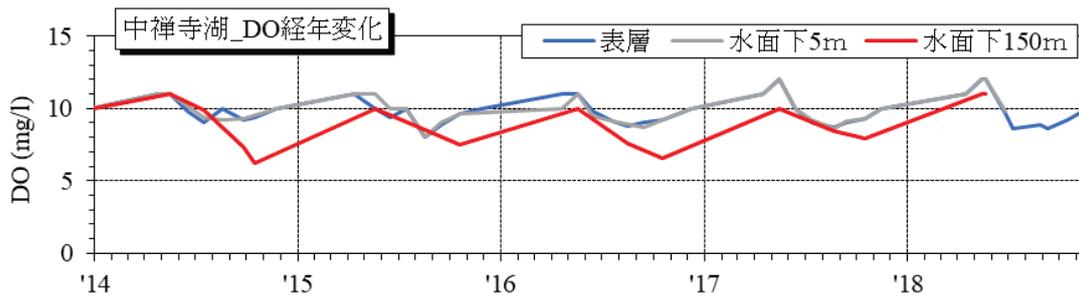


図 3.11 底層 DO データの整理による貧酸素化有無の把握(貧酸素化している湖沼の例)



※観測データで最も底層での観測データ、湖底上 1m 等が望ましい（その深さではない湖沼もあるため注意する）。

図 3.12 底層 DO データの整理による貧酸素化有無の把握(貧酸素化していない湖沼の例)

**表 3.3 (参考)底層溶存酸素量の基準値**

類型	水生生物が生息・再生産する場の適応性	基準値
生物1	生息段階において貧酸素耐性の低い水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域又は再生産段階において貧酸素耐性の低い水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域	4.0mg/L 以上
生物2	生息段階において貧酸素耐性の低い水生生物を除き、水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域又は再生産段階において貧酸素耐性の低い水生生物を除き、水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域	3.0mg/L 以上
生物3	生息段階において貧酸素耐性の高い水生生物が生息できる場を保全・再生産する水域、再生産段階において貧酸素耐性の高い水生生物が再生産できる場を保全・再生産する水域又は無生物域を解消する水域	2.0mg/L 以上

出典：環境省 HP (<https://www.env.go.jp/press/102287.html>) 平成 28 年 3 月

### 3) 底層利用種(魚類等)の生息有無の整理

湖沼の底層水が貧酸素化したとしても、底層に魚類等の生物が生息していない場合には魚類の生息等へ影響があるとは判断されません。このため、湖底等、底層を主な生息域とする魚類等(表 3.4)が生息しているかどうか、漁獲対象魚種の情報や、既存の魚類調査、既往文献等から、底層利用種の有無を確認します。

**表 3.4 湖底を主な生息エリアとしている魚類の例**

科名	種名
ウナギ科	ウナギ
コイ科	カマツカ
	ツチフキ
	ゼゼラ
ドジョウ科	アユモドキ
	ドジョウ
	シマドジョウ
ギギ科	ギギ
	ギバチ
ナマズ科	ナマズ
ハゼ科	ゴクラクハゼ
	ヨシノボリ類(トウヨシノボリ、カワヨシノボリ等)
	チチブ
	ヌマチチブ
	イサザ
	ウキゴリ
	ジュズカケハゼ

### (3) 適応策の検討

#### 1) 影響に対する適応策メニューの抽出

図 3.8 のフロー図を用いた検討により、底層水の貧酸素化や、それによって底層利用種への影響が生じる可能性がより高いとなった場合に、その影響に対してどのような適応策が考えられるのかを、図 3.13 のフローにより、各段階に応じて適応策を検討します。

図 3.13 のフローから、底層利用種への影響を回避又は抑制するための適応策としては、「水温成層形成の抑制」「底層水の貧酸素化の抑制」等の貧酸素化への直接的な対応が考えられます。また、その湖沼における底層利用種の漁業資源としての重要性や希少性の観点から踏まえ「漁獲量の確保」「生息場所の確保」など対応が考えられます。

また、直接的な影響に対する適応策だけでなく、別の観点からの対応によりその影響を相殺できる可能性の面からも適応策を考えられます。例えば、生息する魚類の視点から、貧酸素化によりその魚類の生息適域が減少するのであれば、減少を補うための「良好な生息エリアの創出」により対応することも適応策として考えることができます。

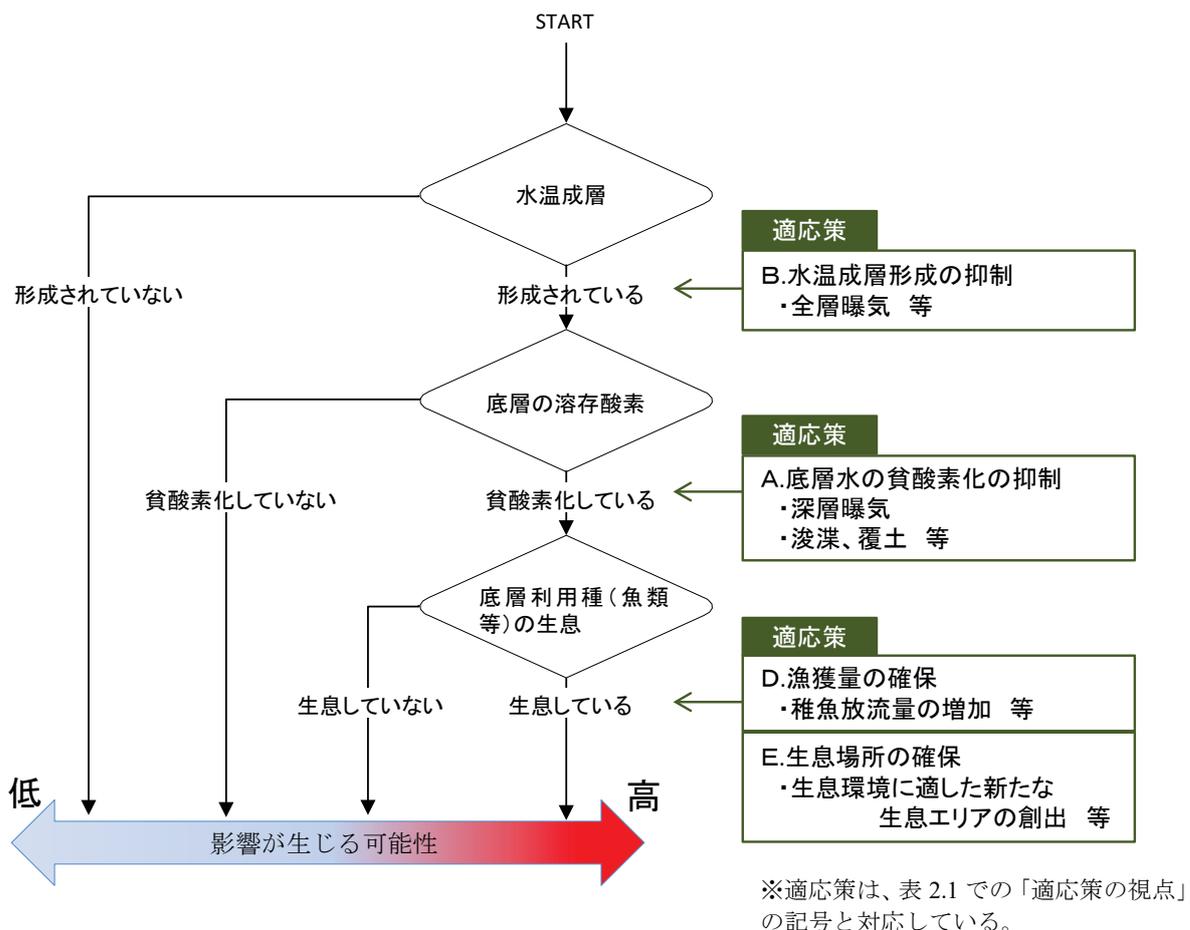


図 3.13 影響の検討フローを踏まえた適応策メニューの抽出

抽出された適応策メニューについて、2章の表 2.1 から、底層水の貧酸素化と底層利用種への影響に対する対応としては、表 3.5、表 3.6 に示す適応策メニューが挙げられます。

**表 3.5 全循環不全による底層水の貧酸素化と魚類等底層利用種への影響に対応する適応策メニューの例(表 2.1 の適応策メニュー表より抽出)**

適応策の視点	適応策メニュー		対策を実施する箇所				対策の実施期間	
			流域	湖沼全体	沿岸浅部	湖心深部	短期	中長期
A.底層水の貧酸素化の抑制	1	底層への酸素供給						
		深層曝気				○	○	
		表層水の深層への注入				○	○	
		高濃度酸素の注入				○	○	
	2	底質改善による酸素消費抑制						
		浚渫(継続的)		○				○
		覆土		○				○
底土の置き換え			○				○	
		干し上げ		○			○	
B.水温成層形成の抑制	3	水温成層の破壊						
		全層曝気				○	○	
		鉛直流動促進				○	○	
D.漁獲量の確保	6	稚魚放流量の増加		○			○	
	7	漁獲量の管理		○				○
	8	新たな漁獲対象種への変更		○				○
E.生息場所の確保	9	生息環境に適した新たな生息エリアの創出		○				○
	10	種の保存のための他水域への移動、施設整備	○	○				○

## 2) 適応策の検討

以上の適応策メニューに対して、次のように適応策を検討し、湖沼において実施すべき対策を抽出します。

- ・ 適応策メニューのうち、湖沼でこれまでに実施している対策（既存対策）はあるか。
- ・ 既存対策があれば継続実施、あるいは強化により影響へ対応が可能と考えられるか。
- ・ 既存対策で解決できないと想定される場合、新規、または追加的な対策の必要性を検討する。
- ・ 新規、または追加的な対策が必要となった場合、すぐに対応が可能な対策は実施の検討を行う、またすぐの対応が困難であれば、中長期的な実施に向けた対応を整理する。

※これらの適応策メニューのうち、「A.底層水貧酸素化抑制」でのメニューは、表 3.2「冬季全循環の不全」「②底泥からの窒素、りん溶出抑制」での対応としても参考にすることができます。

### 3.4.2 気温上昇に伴う水温上昇による冷水性魚類への影響

#### (1) 影響評価の実施フロー

水温上昇による冷水性魚類への影響として、ここではワカサギを例にして影響評価を行い、影響が生じる可能性の有無を検討します。ワカサギでは、成魚の生息適水温の範囲が0~30℃であることが既往文献から分かっています。ここでは、これを基準的な値として用いて、図 3.14 のフローに従い、将来の水温が30℃を超えるかどうかによりワカサギの生息への影響が生じる可能性について検討します。ただし、ここでの基準30℃はあくまで目安です。連続して超える日数や、地域によっても影響は異なる可能性があるため、今後、新たな知見等を反映していくことが必要です。

なお、ワカサギ以外の種については、魚種によって水温変化の適性や高水温への耐性が異なるため、検討対象とする魚種の生態的知見を収集し、その種の生息適水温を把握できれば、同様な検討を行うことが可能です。

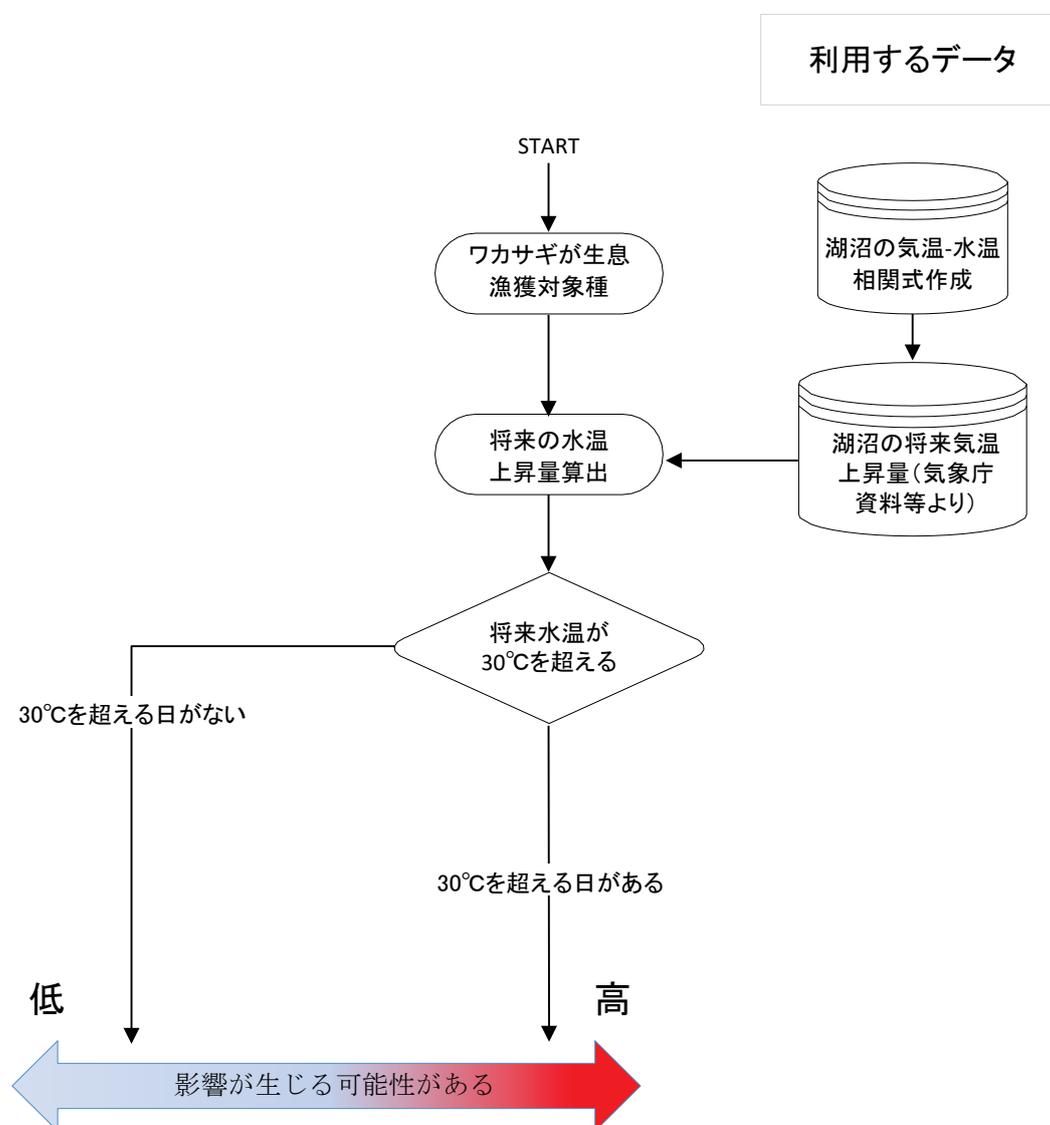


図 3.14 気温上昇に伴う水温上昇による冷水性魚類への影響の検討フロー  
(影響評価の対象魚種をワカサギとした場合)

## (2) 影響評価の実施

### 1) 対象魚種の選定

ワカサギについては、以降に示すような既往知見があります（検討する魚種に応じてこのような情報を探します）。このような資料から、ワカサギの生息適水温の範囲で、水温が高い方の条件として「30℃」を基準とします。

なお、このような魚種に関する生息適水温等の既往の知見が得られない場合には、地域の大学や研究機関等の有識者にヒアリングする等によって情報を収集し、設定することが考えられます。

#### 【参考 ワカサギの生息域の水温条件（水生生物保全環境基準類型指定専門委員会（第10回））】

ワカサギ生息域の未成魚期、成魚期、卵・孵化期における水温条件を図2.2に示す。  
ワカサギは水温の変化に対する適応幅が広く、0～30℃の広範囲にわたって生活が可能である。卵の孵化適温は5～17.5℃の範囲であり、21℃以上では孵化しないとされている。本種はどちらかといえば冷水性の魚であり、夏の高温はこの魚にとっては好ましい環境ではない。例えば、霞ヶ浦・北浦のワカサギの年総漁獲量が、前期生息期（5～8月）の気温と逆相関がみられることが報告されている。

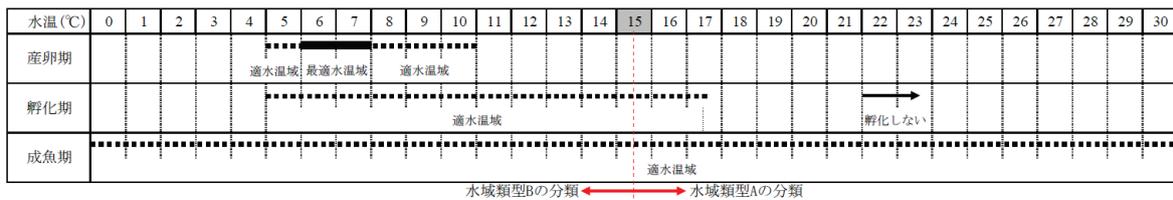


図 2.2 ワカサギ生息域の水温条件

表 2.1 日本の主要な生息水域における産卵時期

県名	水域名	産卵時期
北海道	大沼湖	4月上旬～5月上旬
	石狩湖	5月～6月
	阿寒湖	4月下旬
	網走湖	4月上旬～6月上旬
青森県	小川原沼	3月下旬～4月中旬
秋田県	八郎潟	3月下旬～4月上旬
石川県	河北湖	1月下旬～2月上旬
福井県	三方湖	2月下旬
群馬県	榛名湖	3月中旬～3月下旬
長野県	諏訪湖	2月上旬～5月下旬
	木崎湖	1月上旬～4月下旬
山梨県	西湖	2月中旬～5月中旬
茨城県	霞ヶ浦	1月中旬～2月
愛知県	入鹿池	2月中旬～2月下旬
鹿児島県	鰻池	2月～3月

※上記の図表は原典資料そのままを記載

別表2 ワカサギの生息に関する水温条件

128 ワカサギ ( <i>Hypomesus olidus</i> )				
地方名 : アマサギ 山陰・九州 ソメグリ 北陸				
	最適水温域(°C)	適水温域(°C)	生存可能範囲	
			下限(°C)	上限(°C)
産卵期	6~7 <sup>1)</sup>	5~10 <sup>1) 2) 3) 4) 5)</sup>		
孵化期		5~17.5 <sup>1) 6)</sup>		
稚仔魚期				
未成魚期				
成魚期		0~30 <sup>1)</sup>	0 <sup>1)</sup>	30 <sup>1)</sup>
〔飼育〕				
〔湖上期〕				
〔越冬休眠期〕				
〔参考文献〕				
1) 松原喜代松・落合 明(1965): 魚類学(下), 水産学全集, 19, 恒星社厚生閣				
2) 田村 正(1967): 浅海増殖場の環境-I, II, 水産増養殖叢書15-1, 2, 恒星社厚生閣				
3) 成岡俊男・小川忠幸(1975): 相模湖におけるワカサギ卵のふ化放流と人工採卵について, 神奈川県淡水魚増殖場報告, (12)				
4) 岡田 雋・伊藤小四郎(1960): 石狩古川産ワカサギ魚群の生態研究1. 忠海漁場附近における産卵期の生態, 北水孵化研報, (15)				
5) 梶生 透, 他(1979): 河口湖におけるワカサギの産卵に関する調査, 山梨県魚苗センター 事報, 昭和52年度				
6) 川本信之(1978): 養魚学各論, 恒星社厚生閣				
7) 山田寿郎(1963): ワカサギの正常発生段階(英文), 北大水産彙報, 14 (3)				
8) 渡部正雄(1968): 魚, 敬文堂				
9) 佐藤隆平, 他(1950): 青森県小川沼水産開発調査-I, ワカサギの産卵習生とその保護, 青森水産調報, 青森県				
〔備考〕				
○ふ化日数				
・7°C: 38日, 10°C: 24日, 12°C: 18日, 11~12°C: 13日(315hr) <sup>7)</sup> , 14°C: 13日, 16°C: 11日 <sup>1) 8)</sup> , 14°C: 18日 <sup>9)</sup>				

出典: 環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理  
(社団法人日本水産資源保護協会, 1976)

## 2) 将来の水温上昇算出

将来、どの程度湖沼の水温が上昇するかを見積もる必要があります。将来の水温上昇量をより正確に予測するには後述の解析モデル（3.6節）が必要ですが、ここでは目安を得るための一例を紹介します。図 3.15 は、当該湖沼での水温観測値と気象庁で観測のアメダスデータを用いて、気温と水温の相関式を直線回帰式で作成したものです。次に、当該湖沼の将来の気温上昇量（気象庁が発表している整理資料等（図 3.16）から取得）を確認します。その上で、作成した相関式と気温上昇量から、将来の水温上昇量を算定します。この時、観測値での最高水温が前述で設定したワカサギの生活が可能である最高水温としての 30℃を将来超える可能性があるかどうかを確認します。ただし、水温観測値は月 1 回の観測値であり、必ずしも最高水温のデータではないことに留意します。

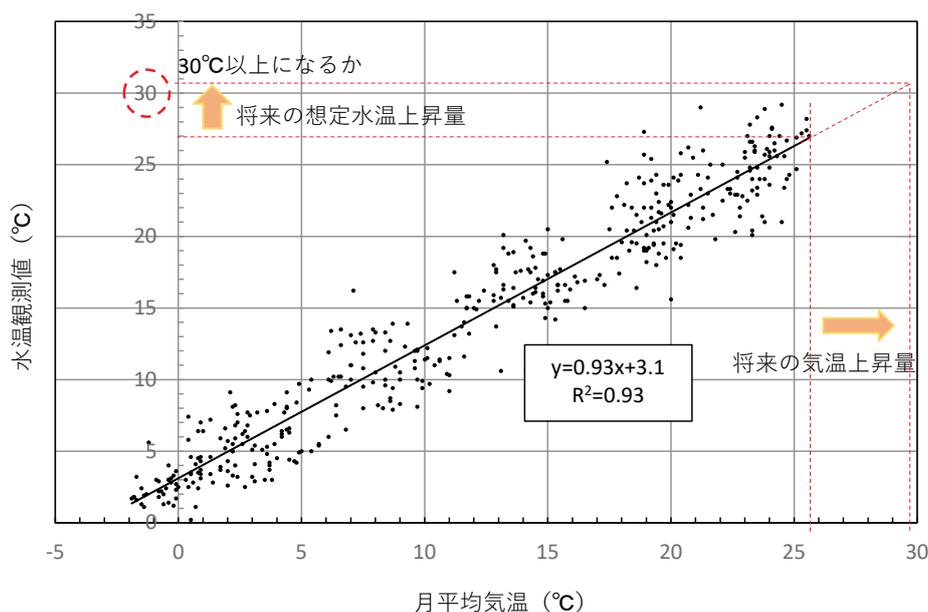


図 3.15 観測値を用いて作成した気温-水温の相関関係を用いた将来の水温算出の一例  
(横軸で用いている月平均気温は整理の一例である)

地域	年	春	夏
全国	4.5 ± 0.6	4.0 ± 0.8	4.2 ± 0.5
北日本日本海側	4.8 ± 0.7	4.3 ± 0.9	4.5 ± 0.7
北日本太平洋側	4.9 ± 0.7	4.4 ± 0.9	4.5 ± 0.7
東日本日本海側	4.5 ± 0.6	4.1 ± 0.9	4.3 ± 0.6
東日本太平洋側	4.3 ± 0.6	3.8 ± 0.9	4.1 ± 0.6
西日本日本海側	4.1 ± 0.5	3.7 ± 0.8	3.9 ± 0.5
西日本太平洋側	4.1 ± 0.5	3.6 ± 0.8	3.9 ± 0.5
沖縄・奄美	3.3 ± 0.4	3.1 ± 0.7	3.2 ± 0.4

地域	秋	冬
全国	4.6 ± 0.7	5.0 ± 0.9
北日本日本海側	5.0 ± 0.8	5.2 ± 1.1
北日本太平洋側	5.0 ± 0.8	5.5 ± 1.1
東日本日本海側	4.7 ± 0.8	4.9 ± 1.0
東日本太平洋側	4.5 ± 0.8	4.8 ± 1.0
西日本日本海側	4.3 ± 0.8	4.7 ± 0.9
西日本太平洋側	4.3 ± 0.8	4.6 ± 1.0
沖縄・奄美	3.5 ± 0.6	3.6 ± 0.8

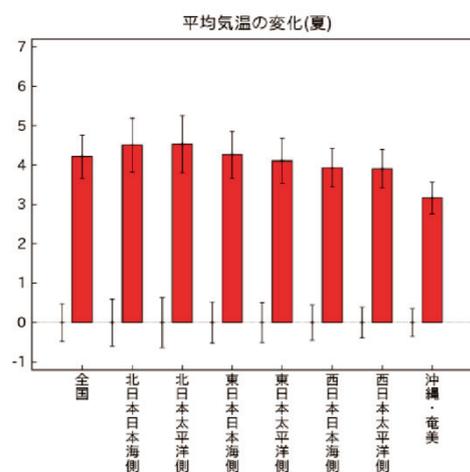


図 3.16 将来気温予測(気象庁:NHRCM05 による 2076~2095 年の計算結果)

出典：例えば、気象庁 HP「地球温暖化予測情報」から各地方の予測データ等  
(URL : <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/index.html>)

### (3) 適応策の検討

#### 1) 影響に対する適応策メニューの抽出

図 3.17 のフローに従い、適応策を抽出します。水温が 30℃を超えることに対して適応策を検討します。

漁獲対象種をワカサギのような冷水性の魚類から、温暖域に生息する魚類に変更するという考え方があります。その場合には漁業として成立するかを考慮する必要があります。次に、将来水温が 30℃を超えることに対して、水温を抑えるための対策が考えられます。

湖沼の多くの部分が 30℃を超えてしまう場合でも、一部でも水温が上昇しにくい場所（避難場所になるような場所）を創出するという対策が考えられます。例えば、河畔林を整備して木陰をつくって水温の上昇を抑制する場所を整備することや、水温の低い湧水場所の保全、比較的水温が低い河川水を導水する等が考えられます。

なお、この検討は簡易であるため、湖沼内での水温鉛直分布は考慮していません。実際には表層水温が上昇すると、ワカサギは水温の低い深い層に移動する等の回避が可能であり、表層水温が 30℃を超えるとしても一概に影響があると判断するかは留意が必要です。水温分布を考慮するためには、例えば解析モデルによる検討が必要になります。

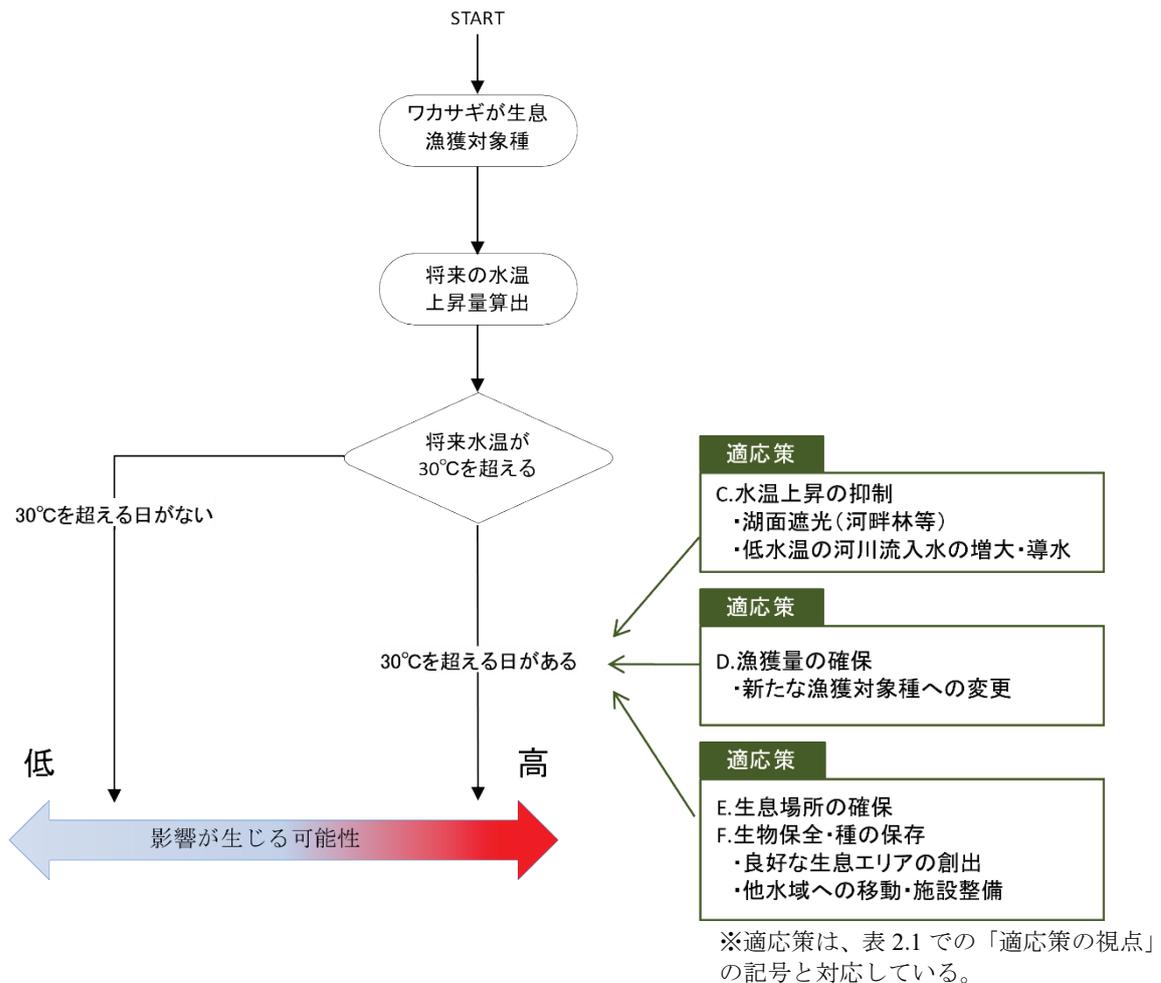


図 3.17 影響の検討フローを踏まえた適応策メニューの抽出

抽出した適応策メニューについて、2章の表 2.1 から、気温上昇に伴う水温上昇による冷水性魚類への影響に対する対応として、表 3.6 に示す適応策メニューが挙げられます。

**表 3.6 気温上昇に伴う水温上昇による冷水性魚類への影響に対応する適応策メニューの例  
(表 2.1 の適応策メニュー表より抽出)**

適応策の視点	適応策メニュー		対策を実施する箇所				対策の実施期間	
			流域	湖沼全体	沿岸浅部	湖心深部	短期	中長期
C.水温上昇の抑制	4	湖面遮光						
		・浮島等		○			○	
		・河畔林			○			○
		・水生植生帯整備		○			○	
	5	河川水等の導水(低温である湧水や渓流水)	○					○
D.漁獲量の確保	6	稚魚放流量の増加		○			○	
	7	漁獲量の管理		○				○
	8	新たな漁獲対象種への変更		○				○
E.生息場所の確保	9	生息環境に適した新たな生息エリアの創出		○				○
	10	種の保存のための他水域への移動、施設整備	○	○				○
F.生物保全、種の保存	11	産卵、繁殖場の創出	○		○			○
	12	種の保存のための他水域への移動、施設整備	○	○				○
	13	産卵等生息環境に配慮した湖水位管理(変動)		○				○

## 2) 適応策の検討

以上の適応策メニューに対して、検討対象の湖沼の現状を踏まえて適応策を検討します。検討は、前述(3.4.1(3)2)適応策の検討)での検討と同様の考え方により実施します。

### 3.4.3 植物プランクトンの増殖による利水への影響

#### 1) 影響評価の実施フロー

植物プランクトンの増殖による影響評価の実施フローを図 3.18 に示します。図 3.2 の関連図より、植物プランクトンが増殖し、水環境に影響を与える要因は複数ありますが、ここでは、利水への影響の観点から、気候変動に伴う水温の上昇が植物プランクトンの増殖に影響を及ぼすことに着目して整理します。

また、植物プランクトン増殖の指標となるデータには、直接的なデータとして「クロロフィル a (Chl.a)」がありますが、既往の観測ではこの項目を観測していない湖沼もあります。その場合には、Chl.a の数値と一定の関連性がある COD を代替の指標とすることも可能です (Chl.a と COD には正の相関がある場合が多い。図 2.24 参照)。

その上で、夏期の水温がより上昇すればアオコ原因藻類である植物プランクトンの増殖が考えられることから、夏期における Chl.a (あるいは COD) の増殖傾向が見られれば、気候変動による植物プランクトンのさらなる増殖が生じる可能性の判断資料に使用します。

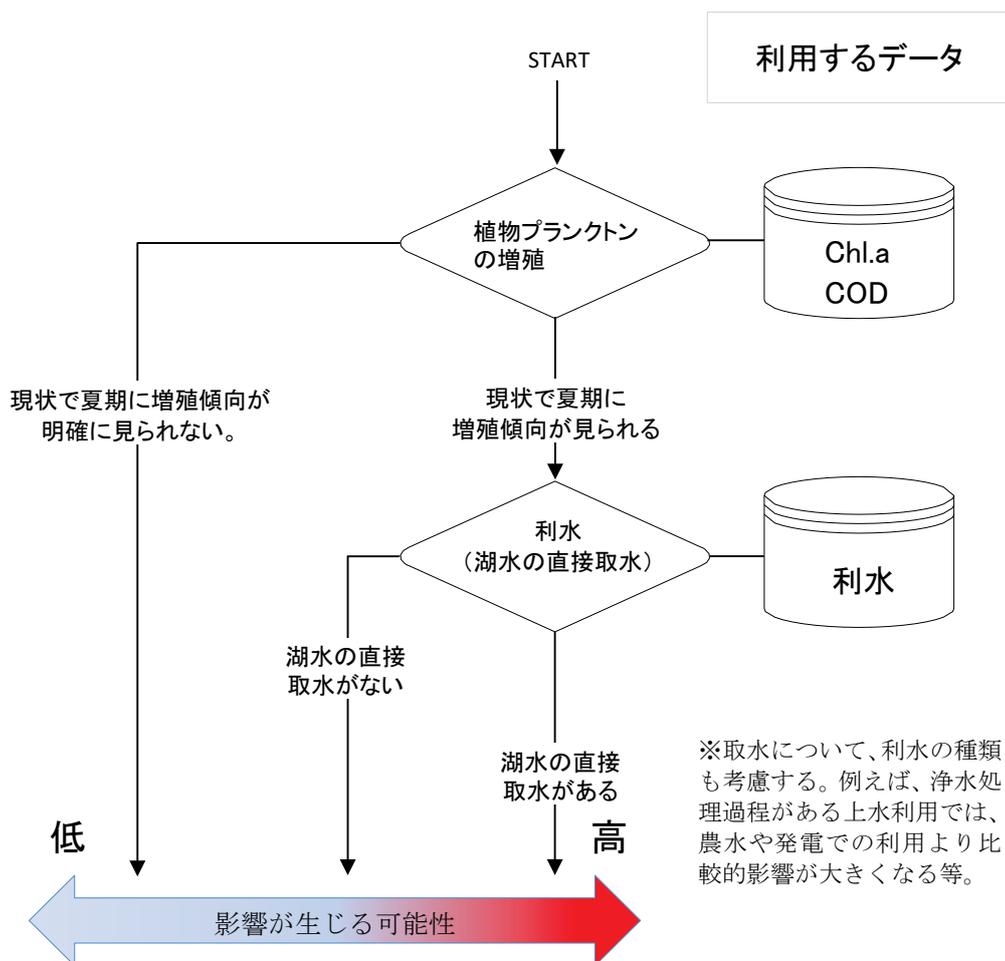


図 3.18 植物プランクトンの増殖による利水への影響の検討フロー

## 2) 植物プランクトンの増殖有無の整理

公共用水域水質測定等の水質データ（Chl.a または COD）を用いて、経時変化グラフを作成します（図 3.19、図 3.20）。一般的に水温が上昇する夏期において Chl.a または COD が毎年、明確に増加する傾向が見られる場合、植物プランクトンの増殖によるものと捉え、将来水温が上昇することで植物プランクトンの増殖の可能性があると考えます。

### a) 植物プランクトンが夏期に増殖する傾向が見られる湖沼

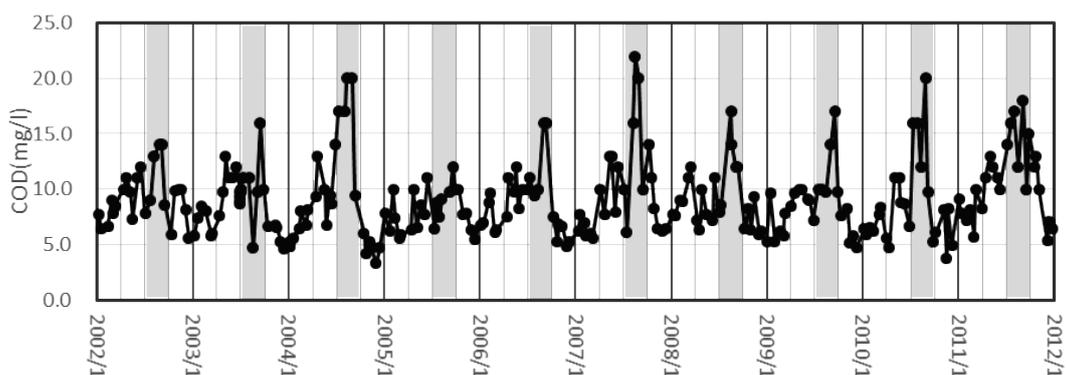


図 3.19 COD の経時変化の整理イメージ(月 1 回観測の水質データ、網掛けは夏期を示す)

### b) 植物プランクトンが夏期に増殖する傾向が明確に見られない湖沼

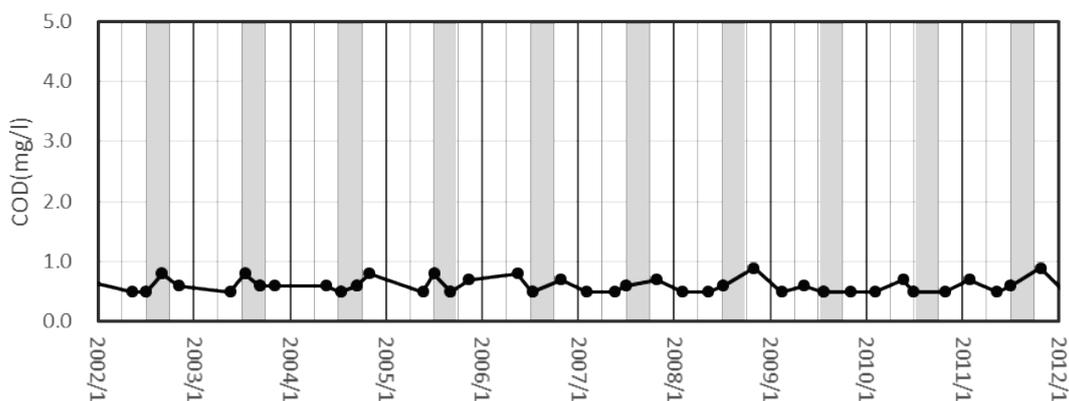


図 3.20 COD の経時変化の整理イメージ(年 4 回観測の水質データ、網掛けは夏期を示す)

## 3) 湖沼の水を直接取水する利用の有無の整理

行政や利水事業者等が所有している水利権や取水に関する資料等（3.2 節で収集）から、上水、工水、農水等の利水について 湖水からの直接の取水状況を確認し、湖水利用の有無を把握します。なお、上水については浄水処理の方法も確認し、植物プランクトンが増殖することで浄水処理への影響有無を把握します（ろ過の目詰まりやカビ臭等の臭いの除去等）。

## (2) 適応策の検討

### 1) 影響に対する適応策メニューの抽出

図 3.21 に示す検討フローにより、まず現状で植物プランクトンの増殖傾向が見られ、気候変動影響により増殖の可能性が高まることに対応するためには、「H.流入栄養塩増加の抑制・削減」「I.内部生産の抑制」等が考えられます。これらは既往の水質保全計画等の対策として実施されているものが多いです。

また、利水で生じる障害の抑制に対応するためには、代替水源の確保や、浄水施設の浄化能力強化（施設自体の改良、あるいは高度処理できる等）を適応策として考えることができます。

ここで、影響評価のフロー（図 3.18）による検討の結果、現時点で植物プランクトンが増殖していないと判断された湖沼において、現状の水温等の条件では植物プランクトンの増殖がなかったとしても、将来水温上昇が生じると、植物プランクトンが増殖する状況になる可能性も考えられます。このため、継続的に水質を監視して水質変化を見ていくことが重要です。

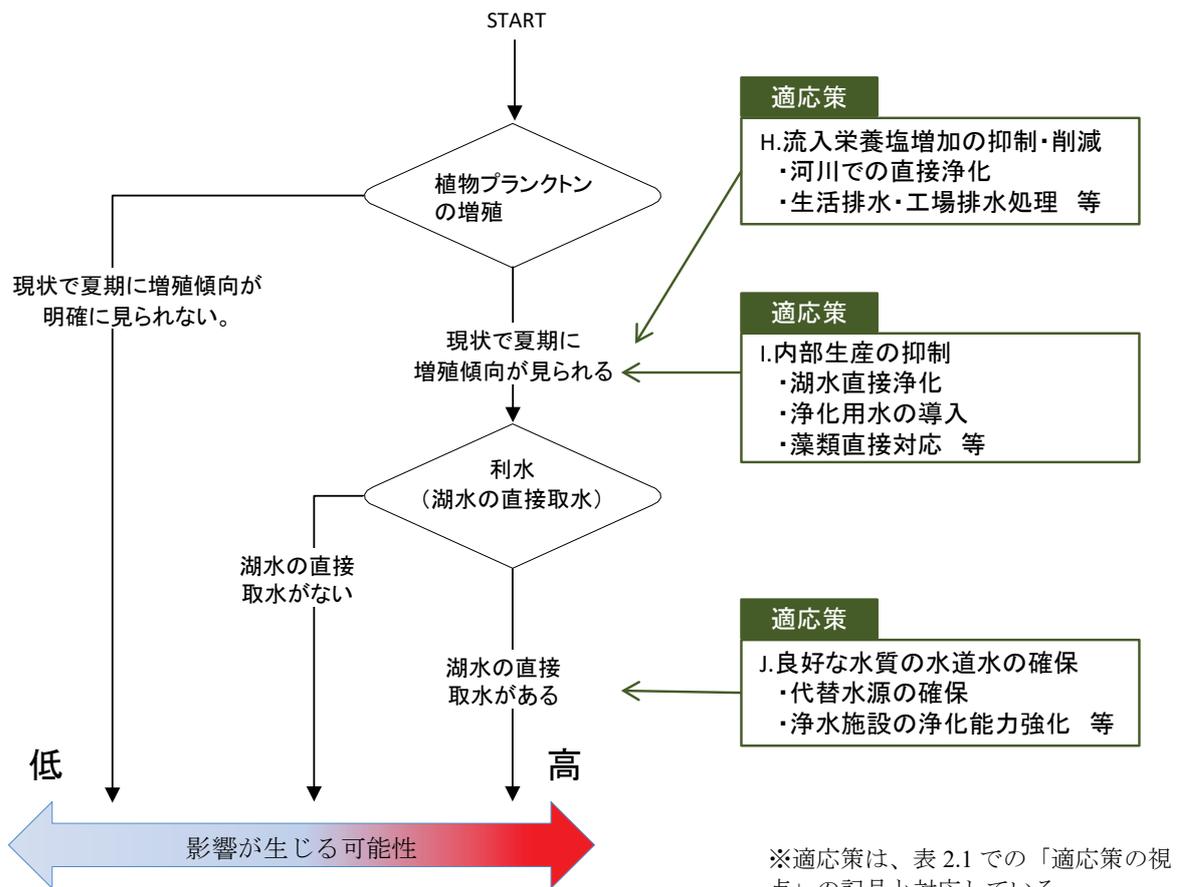


図 3.21 影響の検討フローを踏まえた適応策メニューの抽出

抽出された適応策メニューについて、2章の表 2.1 から、植物プランクトンの増殖による利水への影響に対する対応としては、表 3.7 に示す適応策メニューが挙げられます。

**表 3.7 植物プランクトンの増殖による利水への影響に対する適応策メニューの例**  
(表 2.1 の適応策メニュー表より抽出)

適応策の視点	適応策メニュー		対策を実施する箇所				対策の実施期間	
			流域	湖沼全体	沿岸浅部	湖心深部	短期	中長期
H. 流入栄養塩増加の抑制・削減	15	河川での直接浄化						
		沈澱	○				○	
		ろ過、接触酸化	○				○	
		植生による浄化	○				○	
			底泥浚渫(継続的)	○				○
	16	生活排水処理						
		下水道整備、下水処理場の高度化(窒素りん除去)	○					○
		合流式下水道の改善	○					○
		窒素りん除去型の高度処理型合併処理浄化槽設置	○					○
	17	環境保全型農業の実施(負荷低減)	○					○
18	工場・事業場等、排水基準の強化	○					○	
19	市街地、道路等からの面源負荷削減(雨水流出抑制、路面・側溝清掃等)	○				○		
I. 内部生産の抑制	20	曝気等による水の流動促進						
		浅層曝気			○		○	
		全層曝気				○	○	
		流動促進装置による流動化		○			○	
		浄化用水の導入(流動化、希釈)		○				○
	21	プランクトン増殖抑制を考慮した湖水の放流、水位管理		○				○
	22	湖内での直接浄化						
		接触酸化			○		○	
		土壌浄化			○		○	
		植生浄化			○		○	
		凝集処理			○		○	
	23	水生植生帯の整備			○		○	
	24	藻類の除去						
衝撃殺藻、紫外線殺藻等 吸引等による直接除去			○			○		
25	漁獲による栄養塩の系外除去		○				○	
J. 良好な水質の水道水の確保	26	代替水源の確保	○					○
	27	脱臭処理の強化(活性炭の準備)	○					○
	28	浄水施設の浄化能力強化	○					○
	29	局所的な清澄水域の確保(フェンス等)			○		○	
	30	水面利用方法の変更検討			○		○	

## 2) 適応策の検討

以上の適応策メニューに対して、検討対象の湖沼の現状を踏まえて適応策を検討します。検討は、前述(3.4.1(3)2)適応策の検討)での検討と同様の考え方により実施します。

### 3.4.4 湖面結氷の短期化による地域への影響

#### (1) 影響評価の実施フロー

湖面の結氷は、気象や地形条件等、様々な要因により結氷したり、結氷しなかったりします。それらのうち、気温もその要因の一つです。気候変動によって冬の気温が上昇すると想定されるため、これが湖面結氷に影響することが考えられます。また、結氷する・しないだけでなく、気候変動によって氷の厚さや結氷する時期が変化し、現在結氷を利用した生活や活動があれば、影響を受けることが考えられます。

図 3.22 に示すフローに従って湖面結氷短期化による地域への影響を検討します。気候変動によって結氷する・しなくなるは予測モデル等が必要になりますが、ここでは現状において湖面結氷しているかどうかによって、湖面結氷の利用やそれが観光等の地域資源としての利用に対して影響が生じる可能性を検討します。

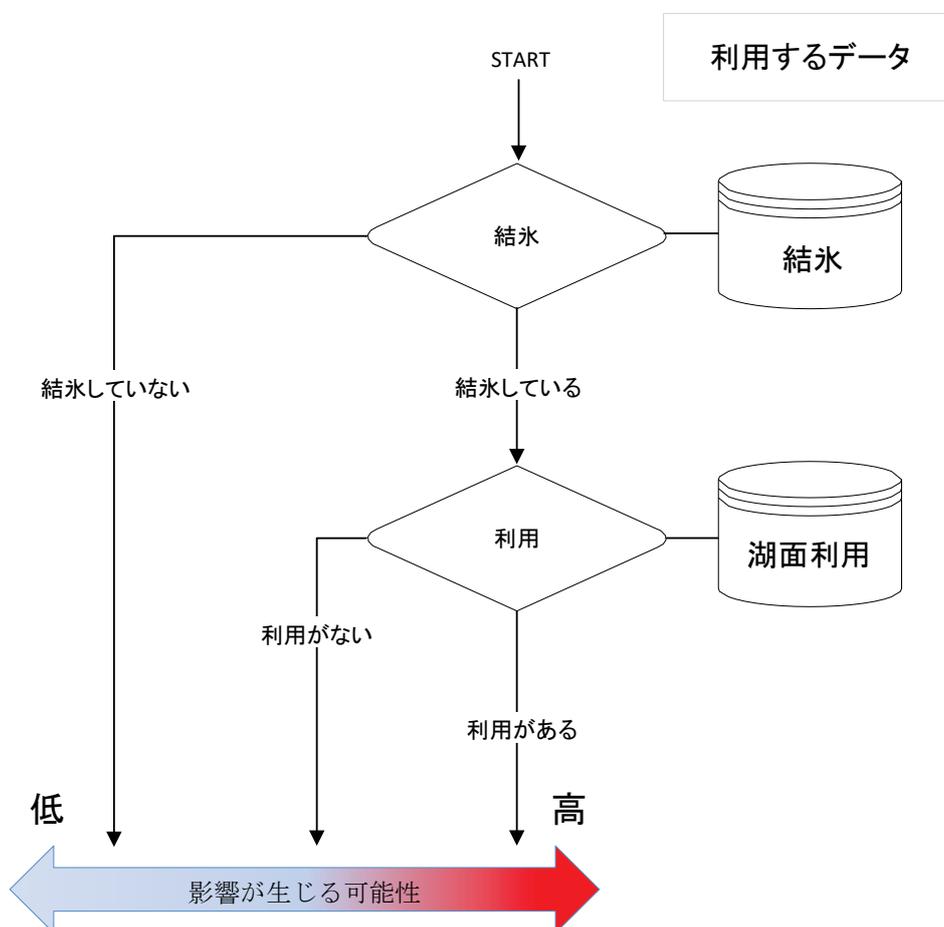


図 3.22 湖面結氷の短期化の影響の検討フロー

## (2) 影響評価の実施

### 1) 湖沼結氷の有無の整理

既往文献や湖沼を管理している行政が所有している資料等から、冬季に湖面が結氷しているかどうかの有無を調べること等により、結氷の有無を整理します。

### 2) 結氷時の湖面利用の有無の整理

観光情報や湖沼を管理している行政が所有している資料から、結氷した湖面の利用（ワカサギ釣り等）等の有無を調べること等により、結氷時の湖面利用の有無を整理します。

## (3) 適応策の検討

### 1) 影響に対する適応策メニューの抽出

図 3.23 に従い、結氷短期化による地域への影響に対する適応策を抽出します。

まず、気温上昇等により湖面が結氷しなくなることを回避・抑制する対応（人工的に結氷させる）は現実的には不可能と考えられます。そこで、結氷の観光資源としての利用に対して対応する適応策を考えます。地域において湖面結氷の利用状況に応じて、適応策を検討します。

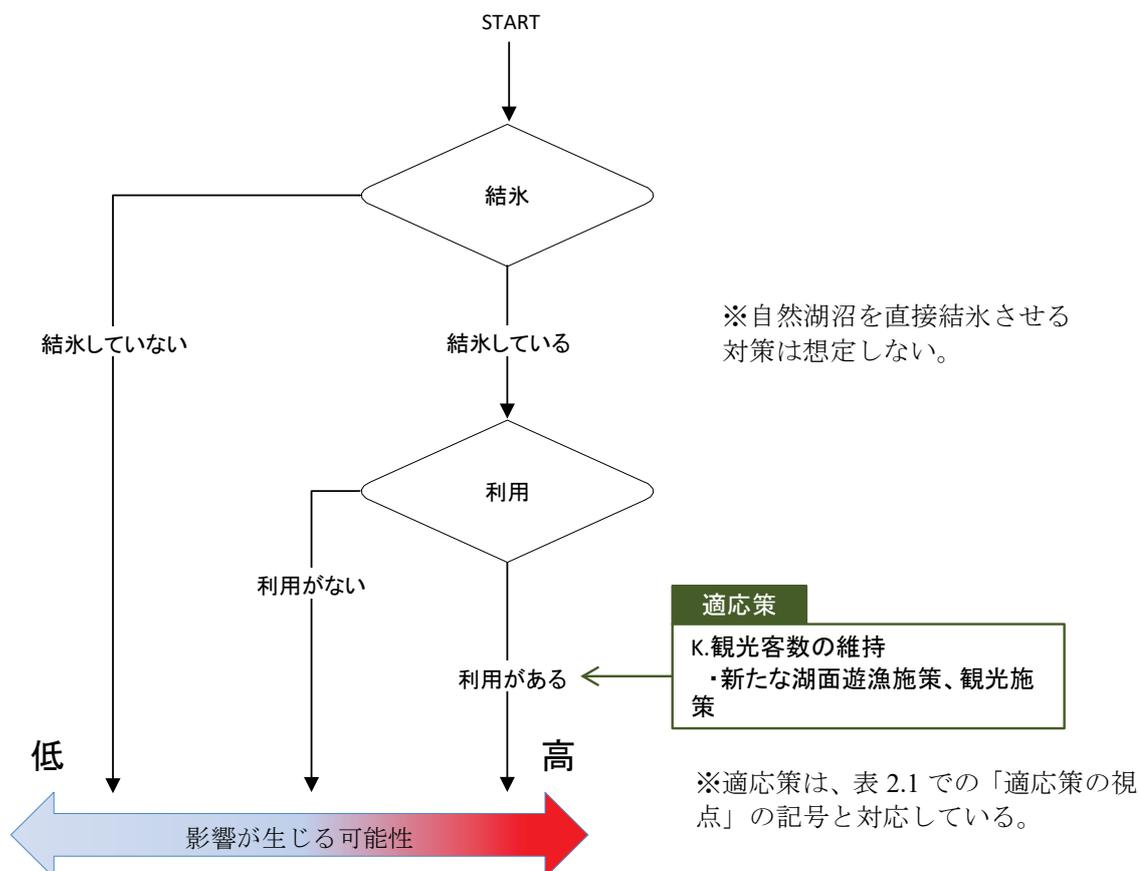


図 3.23 影響の検討フローを踏まえた適応策メニューの抽出

抽出された適応策メニューについて、2章の表 2.1 から、湖面結氷の短期化による地域への影響に対する対応としては、表 3.8 に示す適応策メニューが挙げられます。

**表 3.8 湖面結氷の短期化による地域への影響に対する適応策メニューの例**  
(表 2.1 の適応策メニュー表より抽出)

適応策の視点	適応策メニュー		対策を実施する箇所				対策の実施期間	
			流域	湖沼全体	沿岸浅部	湖心深部	短期	中長期
K.観光客数の維持	31	新たな遊漁施策の検討(例えばワカサギ釣りの代替)		○				○
	32	新たな観光施策の検討		○				○

## 2) 適応策の検討

以上の適応策メニューに対して、検討対象の湖沼の現状を踏まえて適応策を検討します。検討は、前述 (3.4.1(3)2)適応策の検討) での検討と同様の考え方により実施します。

### 3.4.5 その他の検討

#### (1) 降雨量・降雨イベントの変化による影響の考え方

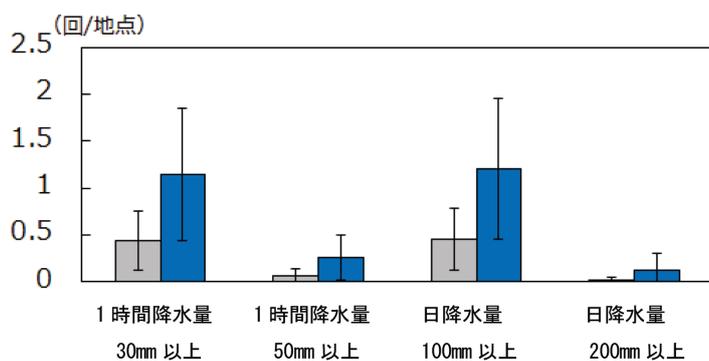
降雨量・降雨イベントが変化すると流入河川の流量や流入負荷量が増え、それによって湖沼の流動、滞留時間や水質変化に影響し、湖沼の水温変化や植物プランクトン量の変化に影響を及ぼすことが考えられます。

年総雨量の減少は、湖沼に流入する河川水の総量が減少することから、湖沼の滞留時間が大きくなり、植物プランクトンが増殖しやすい状況になる可能性が考えられます。

また、降雨イベントの変化として、ここでは降雨強度の増大について、ひと雨の雨量が増えるため流出水量が増え、それに伴って流域から流出する汚濁負荷量も増えます (P2-23 を参照)。湖沼へより多くの濁水や窒素やリン等の汚濁負荷量が流入することにより、透明度の低下や、それを栄養として植物プランクトンが増殖しやすい状況になる可能性が考えられます。

将来の降水量変化は、例えば、各地方の气象台から提供している資料 (図 3.24) や、A-PLAT で提供されている気候変動の観測・予測データ等から想定することができます。

ただし、植物プランクトンの増殖については、河川からの流入の他、気象条件等、その他の要因によっても変化するため、降雨の変化だけに影響するわけではないことに留意が必要です。



(c) 短時間強雨（1時間降水量30mm以上、1時間降水量50mm以上）と大雨（日降水量100mm以上、日降水量200mm以上）の年間発生回数の変化

### 図 3.24 秋田県平均の降水量に関する変化

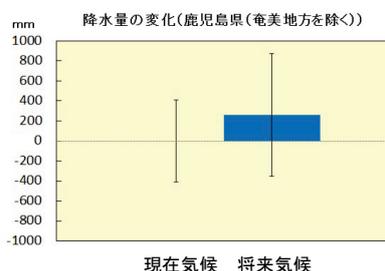
※棒グラフは現在気候（灰）と将来気候（青）における1地点あたりの発生回数。細線は現在気候、将来気候それぞれにおける年々変動の標準偏差。また、有意で且つ変化量の絶対値が現在気候の年々変動の標準偏差より大きい場合はプラス、偏差を水色に塗りつぶしている。RCP8.5 シナリオによるNHRCM05を用いた予測結果に基づく。

出典：仙台管区気象台：東北地方の地球温暖化予測情報（平成31年2月）

また、検討にあたって、河川流量の変化による湖沼の水質変化への影響は、その湖沼の流域面積の大きさによって異なることに留意が必要です。例えば、八郎湖（秋田県）では、湖面面積（47.3km<sup>2</sup>）に対して流域面積（894.3km<sup>2</sup>）は約19倍です。一方、池田湖（鹿児島県）では湖面面積（10.95km<sup>2</sup>）に対して流域面積（12.34km<sup>2</sup>）であり、ほぼ同じ大きさです。このように、流域面積と湖面面積（または湖水容量）の関係によって降雨の変化、河川流量の変化による湖水質への影響は異なることが想定されるため、降水と湖水質変化のデータを比較する等により、その影響を把握しておくことも重要です。

鹿児島県（奄美地方を除く）

	mm
降水量	260.1 ± 615.9



### 図 3.25 鹿児島県(奄美地方を除く)の降水量の変化(将来気候と現在気候との差、単位:mm)

※棒グラフが将来気候と現在気候との差、縦棒は年々変動の標準偏差（左：現在気候、右：将来気候）を示す。上の付表は変化量の増加（減少）および年々変動の標準偏差の数値を示し、その変化量が信頼度水準90%以上で有意の場合は水色に塗りつぶしている。

出典：福岡管区気象台：九州・山口県の気候変動監視レポート別冊 九州・山口県の地球温暖化予測情報第2巻、平成30年5月（2019年5月増補版）（RCP8.5シナリオによるNHRCM05を用いた予測結果を使用）

## (2) 融雪の変化による影響の考え方

融雪は冬の降雪量等に影響を受けますが、この降雪量の変化によって、冬から春にかけて融雪が生じる（河川流量が増加する）時期の変化や、融雪量の変化が考えられます。現状において融雪に伴う河川流量の増加は、春のかんがい用水や、ダム貯水池やため池の水源地として地域の重要な水源になっている場合もあります。融雪の変化によって、湖沼への流入量が変化するため、湖沼の水環境にも影響を与える可能性が考えられます。

対象湖沼が融雪による影響を受けているかは、流域に積雪地域を含んでいるか、春先等に流入河川において融雪出水が生じているかどうかにより判断することができます。そして、将来の融雪の変化を想定するため、図 3.26 のような将来の降雪に関する予測情報を使うことにより、将来の融雪の変化による影響の可能性を検討します。

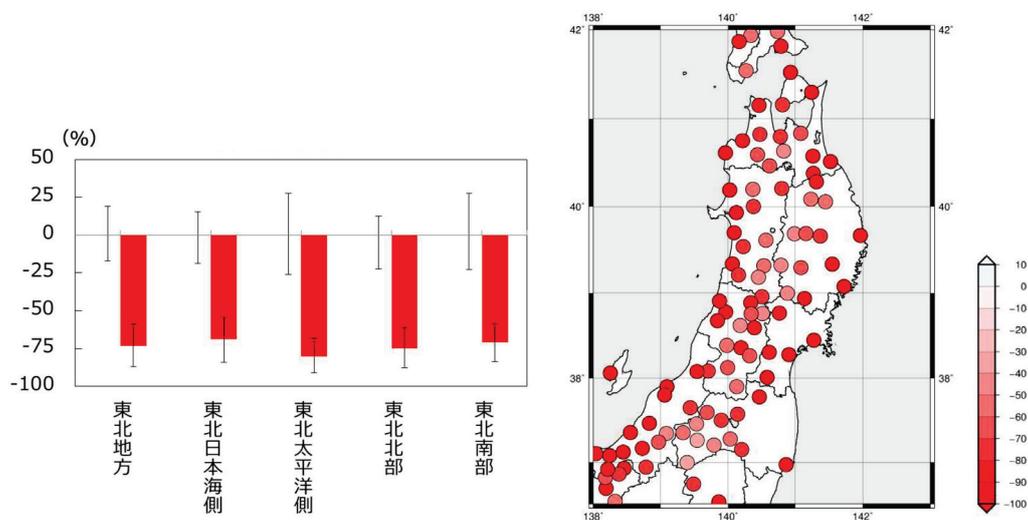


図 3.26 東北各地域の年降雪量の将来変化率(左図)、東北地方の年降雪量の将来変化率(右図、単位:%)

※左図：領域内に含まれる各観測地点での「現在気候」に対する「将来気候と現在気候の差」の比(将来変化率)を統計的に処理し、棒グラフは将来における4メンバー(将来気象予測の4通りのシミュレーションケース)平均の変化率を示す(バイアス補正済み)。細い縦線は年々変動の幅を示す。RCP8.5シナリオによるNHRCM05を用いた予測結果に基づく。

※右図：年降雪量の現在気候に対する将来気候と現在気候の差の比(バイアス補正済み)。変化傾向(増減)が4メンバーとも一致した地点のみそれらの平均値を表示(現在気候及び将来気候ともに数値がゼロの場合は表示対象外)。気象庁によるIPCCのRCP8.5シナリオに基づくシミュレーション結果(気象庁,2017a)をもとに作成

出典：仙台管区気象台：東北地方の地球温暖化予測情報（平成31年2月）

## <コラム 情報整理シートを用いた気候変動影響・適応策検討の整理例>

本手引きを用いた検討事例の1つとして、ここまでの簡易的な手法による検討を用いて、地域気候変動適応計画策定マニュアルで示されている、気候変動影響、適応策を整理し、計画に反映させるための「情報整理シート」の作成を行うと、表 3.9 のような整理を行うことができます（内容はサンプルであり、実際の湖沼の情報とは異なる）。

<表 3.9 における各 STEP での検討方法の例>

STEP	検討方法例
2	3.3 節に示した、湖沼の特徴整理、水質変化把握の検討結果を用いる。
3	3.2 節で収集した、湖沼が位置する地域での将来の気象予測データから、湖沼の水環境変化に関係すると考えられる将来の気象変化（気温や降水量）を整理 3.4 節で示した、気候変動影響の検討フローを用いて、影響が生じる可能性の有無の検討結果を用いて整理
4	STEP3 での整理結果から、重大性、緊急性、確信度の観点で整理
5-1	想定された影響に対して、湖沼における既存対策の有無を整理
5-2	既存対策によって影響への対応が可能かを検討
6	STEP5-2 を踏まえ、対応が十分でない場合に、必要となる対応を整理

なお、STEP5-2 や 6 での対応の具体的な検討にあたっては、行政や研究機関が作成している手引きや技術資料を参考に行います。例えば、下記の資料を参考とすることができます。

### ■底層の貧酸素化

- 湖沼の底層溶存酸素量及び沿岸透明度に関する水質保全対策の手引き（環境省水・大気環境局水環境課、令和2年3月

URL：[http://www.env.go.jp/water/kosyou/post\\_87.html](http://www.env.go.jp/water/kosyou/post_87.html)

### ■魚類の保全

- 内水面に関する情報（水産庁 HP）

URL：<https://www.jfa.maff.go.jp/j/enoki/naisuimeninfo.html>

### ■浄水処理方法

- 水道事業における高度浄水処理の導入実態及び導入検討等に関する技術資料（厚生労働省健康局水道課、平成21年10月）

URL：<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/jousui/01.html>

表 3.9 本手引きでの検討を用いた情報整理シートの作成の例

湖沼	【STEP2】 これまでの気候変動影響の整理 本手引き3.3節での内容		【STEP3】 将来の気候変動影響の整理 3.4.1(1)、(2)項での内容		【STEP4】 影響評価の実施 左記の検討を踏まえて整理		【STEP5】 既存施策の気候変動影響への対応力の整理 3.4.1(3)節での内容		【STEP6】 適応策の検討 3.4.1(3)節での内容	
	分野	項目	2-1	2-2	4-1	4-2	5-1	5-2		
			これまでに生じている気候変動影響を整理	2-1の原因となる気象現象を整理						2-1が将来どのような状況になるのか整理
●●湖	水環境	・冬季全循環の不全 ・底層水の貧酸素化 ・底生利用種への影響	毎年夏～秋で水温躍層が形成されるが、冬には表層から底層まで水温、DOは同様となり、全層循環が確認されている。○○年度に例年より全層循環が生じる時期が大幅に遅れたことが観測された。	真冬日の減少1980年代では年間70日程度だが、2010年代には50日程度となっている。	(○○県の将来の気象)冬(12-2月)に平均気温が5.0度上昇する。真冬日も現在より30日減少する。(出典：●●気象台資料) (想定される事象)現状では毎年、水温躍層が形成されているが毎年全循環が生じている。しかし、直前に底層DOが0mg/L近くまで低下し貧酸素化する状況が見られている。地域の漁業資源として底層に○○魚が生息しており、気温上昇の影響で全循環不全が生じると、湖底に生息する魚類等や漁業への影響が生じる可能性が想定される。	(重大性)底層DOが貧酸素化、長期化すれば、漁業資源である○○魚の生息場所が減少し、漁獲への影響が想定され、重大性は特に大きい。 (緊急性)全循環の時期の遅れが見られており、緊急性は中程度(確信度)●●湖では確認されていないが、他の湖沼で全循環不全が生じており、確信度は中程度	○	既存対策は無し	・既存対策はないが、漁業資源量を維持するため、新たな対応が必要 ・湖水量の規模から、機械的な曝気は困難	・水温鉛直分布、底層DOの連続的なモニタリング、魚類生息調査により兆候を早期に把握 ・全循環不全の発生やそれによる水質影響のメカニズムの解明 ・底層DO低下の抑制策の検討 ・生息に適した新たな生息エリアの創出検討
		・湖水温の上昇 ・冷水性魚類への影響	湖表層での水温の長期的な上昇傾向が確認されている。夏季の最高水温が●℃を超える頻度が増えている。	真夏日の増加2010年代は1980年代より2倍に増加している。	(○○県の将来の気象)将来気候では夏(6-8月)に平均気温が4.6度の上昇、真夏日も平均的に43日増加する。 (想定される事象)夏の気温上昇により将来の湖水温が●℃を超える可能性があり、○○魚の生息に影響が生じる可能性が想定される。	(重大性)○○魚への影響が生じれば漁獲への影響が想定され、重大性は特に大きい。 (緊急性)影響は生じていないが、これまでの水温上昇傾向が確認されており、緊急性は中程度。 (確信度)底層部では低水温部があり移動、回避するため、確信度は低い。	○	既存対策は無し	・既存対策はないが、漁業対象種である○○魚の資源量を維持するため、新たな対応が必要 ・気温上昇による湖水温上昇の抑制は難しいため、○○魚の資源量確保策が必要	・水温変化を早期に把握するため、湖水温の長期的なモニタリング ・○○魚の生息状況調査や水温耐性に関する生態的知見の蓄積、調査研究 ・現状で減少している○○魚の産卵場所の創出(湖岸のエコトーン整備等)に向けた検討
		・富栄養化 ・利水取水への影響	現時点では確認されていないが、数年に一度、渇水で高温時に植物プランクトンの増殖が確認されている。	(同上)	(○○県の将来の気象)将来気候では夏(6-8月)に平均気温が4.6度の上昇、真夏日も平均的に43日増加する。 (想定される事象)毎年夏季の調査データからChl.aが上昇する傾向が見られており、植物プランクトンの増殖が確認されている。周辺市町村の水道水源として湖水を直接取水して、通常の浄水処理施設により供給しており、植物プランクトンが異常増殖すれば取水停止等の影響が生じる可能性が想定される。	(重大性)周辺の上水の水源であるため、水質悪化の影響は大きい。 (緊急性)頻度は低いが植物プランクトンの異常増殖が確認されており、緊急性は中程度(確信度)影響は生じていないが、現時点でも発生していることがあるため、確信度は中程度	○	・「●●湖水質改善計画」があり、この計画で位置づけられている既存対策の一層の推進が必要 ・生活系・事業系からの汚濁負荷削減対策、農業系・畜産系・市街地等からの面源負荷削減対策の実施	・流域での負荷削減は限界まで来ており、対策は継続するが影響を回避できるほどの大きな負荷削減量は今後見込めない。 ・湖内対策等、新たな対応を検討する必要がある。 ・浄水施設は簡易処理であり、水質悪化への対応は現状では不可能	・対策実施による効果把握のための定期モニタリング ・水の滞留改善・流動化(環境に配慮した水位変動による流動化) ・直接取水している上水道の浄水処理方法高度化の検討
		・湖面結氷 ・地域への影響	毎年、湖面結氷しているが、イベント主催者から氷の厚さが薄いと感じる年が数年に一度程度確認されている。	(同上)	(○○県の将来の気象)冬(12-2月)に平均気温が5.0度上昇する。真冬日も現在より30日減少する。(出典：●●気象台資料) (想定される事象)毎年湖面結氷し、その結氷を利用して町の氷まつりが開催されている。結氷しなくなる、あるいは氷が薄くなればイベントへの影響が生じる可能性が想定される。	(重大性)イベントには全国から観光客が訪れ、地域産業に重要であり、重大性は大きい。 (緊急性)現状でイベント開催への影響はないため、緊急性は低い。 (確信度)予測が難しいため、確信度は低い。	-	既存対策は無し	・既存対策はなく、地域の価値を維持するため、新たな対応が必要 ・気温上昇、結氷への影響の直接的な対応は難しいため、影響が生じた状況を想定した新たな対応が必要	・結氷状況の監視 ・町や主催者と協議し、イベントの内容見直し、他の氷の調達場所の選定

### 3.5 気候変動による影響を踏まえたモニタリング計画の検討

気候変動影響を把握し、適応策を検討、実施していくにあたって、モニタリングは重要です。湖沼ごとに着目すべき気候変動影響は異なるため、湖沼の特徴（漁業、利水、観光、景観、自然・生態系等）やそれらに対して想定される影響に応じてモニタリング計画を検討し、継続的に実施していくことが必要です。

#### (1) 現状および今後の気候変動による影響を把握するためのモニタリング

将来の影響を明らかにするためには、まず過去から現在までの湖沼の水環境の変化、およびそのメカニズムを把握することが必要です。その上で、現在まで気候変動による水環境変化等が顕著には見られていない湖沼においても、今後気候変動が進めば、将来では水環境の変化が生じる可能性が考えられます。そのため、水環境が変化する前の状況を把握し、将来の変化をモニタリングすることで、気候変動による水環境の変化を捉えることができるとともに、迅速な対応につながります。また、気候変動による湖沼の水環境の変化として、気象の急変により大きな出水や高温が短時間で生じること、それら局所的に生じる可能性があります。このため、なるべく高頻度で連続的に、かつ複数地点で空間的に把握できるよう、モニタリングすることも重要です。

#### (2) 将来予測・適応策検討のためのモニタリング

気候変動による影響を、定量的に把握し、適応策を検討するためには、現状の湖沼での水環境のメカニズムを解明・把握した上で、水質予測や生態系を予測するモデル等を構築し、予測モデルを用いた将来予測が必要です。

モニタリングデータにより現在生じている水環境の変化の要因を解明し、それを予測モデルに組みこむとともに、モニタリングデータを予測モデルの検証データとして使用することで、より予測精度が高いモデルとすることができます。

#### (3) 適応策の効果検証・改善のためのモニタリング

適応策による効果把握・評価を行うために、適応策を講じる前と後で現地データを得ておくことが必要です。

また、将来の湖沼における水環境の変化には、想定外の変化が生じる場合があります。予測モデルでも全てを予測できるものではありません。そのような事象を見逃さないようモニタリングすることが重要です。なお、新たな事象や問題に対応していくために、気候変動影響の予測手法や影響評価手法の整備や、各種対策における技術開発等を常に行っていくことが必要です。

#### (4) 関係者の連携によるモニタリングとデータの共有・活用

上記のように、気候変動によるモニタリングは、多岐にわたるため、自治体等が単独で全てを実施することは困難です。このため、関係自治体や研究機関等の湖沼の全関係者が連携し、分担して実施することが重要です。また、このモニタリングにより得られたデータを公開して、関係者で共有し、かつ活用できるような仕組みを構築することも重要です。

表 3.10 に、気候変動による影響に対して、その状況を把握し、変化を捉えていくために必要なモニタリングの内容・手法の例を示します。なお、これらに加えて、水環境の変化を捉えるために、湖水位等、湖水の流動を把握するためのモニタリングも重要です。

表 3.10 気候変動による影響に応じたモニタリング項目と内容の例

水環境の変化	影響を評価するための項目	モニタリング項目	モニタリング内容・手法の例
冬季全循環の不全	① 底層水の貧酸素化、底層利用種の酸欠	水温、D0測定 底層利用魚種調査	湖沼内最深地点および底層利用魚生息域での、水温鉛直分布測定、底層D0の連続・定期測定 定期的な底生魚の生息状況調査
	② 底泥からの窒素、リンの溶出	水温、D0測定 栄養塩濃度測定	湖沼内最深地点および底層利用魚生息域での、水温鉛直分布測定、底層D0連続・定期測定 定期的に底層水の採水・分析により栄養塩濃度（窒素、リン）の調査
水温の上昇	③ 冷水性魚類等の生息適水温とのずれ	水温測定 魚類相・漁獲量調査	湖沼内での魚類生息域等を踏まえて、水温連続・定期測定（湖心や沿岸部など） 測定水深は魚類の生息水深に応じて設定 定期的な魚類の生息状況調査、漁獲量の調査
	④ 植物プランクトン量の変化	植物プランクトン種、量（Chl. a）調査	湖沼内代表地点および植物プランクトンの集積状況を踏まえて複数地点において、クロロフィルaの連続・定期測定
	⑤ 魚類等の生息水深の変化	水温測定 魚類相・漁獲量調査	湖沼内での魚類生息域等を踏まえて、魚類の生息水深を踏まえ、水温の連続・定期測定 定期的な魚類の生息状況調査、漁獲量の調査
	⑥ 底泥からの窒素、リンの溶出	栄養塩濃度測定 D0測定	定期的に底層水の採水・分析により栄養塩濃度（窒素、リン）の調査およびD0測定
湖面結氷の変化	⑦ 湖面結氷の短期化	結氷の開始・終了時期、面積・厚さ、水温	定点における継続的な観測 目視や測定機器による現地観測
融雪時期の変化による栄養塩供給時期の変化	⑧ 植物プランクトン（Chl. a）の変化（時期、量）	植物プランクトン種、量（Chl. a測定） （⑨での項目）	湖沼内代表地点および植物プランクトンの集積状況を踏まえて複数地点において、クロロフィルaの連続・定期測定
融雪時期の変化による河川流量変化、湖内流動・循環の変化	⑨ 春先の栄養塩供給量の減少	河川流量、負荷量	河川流量（水位）の連続測定 自動採水器による河川水の採水、分析による河川水質（COD、窒素、リン）の調査 湖沼への代表的な流入河川において実施
	⑩ 春先融雪水量の減少	河川流量、水温	河川流量（水位）の連続測定 水温の連続・定期測定 融雪出水が生じている河川において実施
降雨強度の変化による出水時流入栄養塩量の増加	⑪ 浮遊物質量、透明度の変化	SS（濁度）、透明度	流入河川（流末）、湖内代表地点での採水、分析によるSSの分析、透明度観測
	⑫ 植物プランクトン量の変化	④と同じ	④と同じ
降水量の減少による平常時流量の減少	⑬ 植物プランクトン量の変化	④と同じ	④と同じ

※表層はおおよそ水面下 0.5m、底層はおおよそ湖底上 0.5m 等が望ましい。

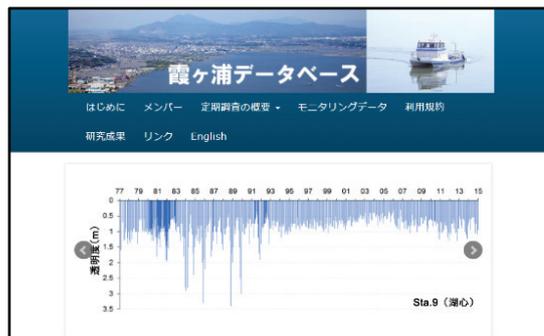
## <コラム 湖沼における長期的なモニタリングの事例>

### 事例1. 霞ヶ浦における長期モニタリング(国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター)

関東平野の北東に位置する霞ヶ浦は、最大水深6m、平均水深4mと浅く、日本で2番目に大きな面積を有する湖沼です。平地に位置する浅い湖沼という特徴と、広い集水域(流域)をもち、生物相は極めて豊かで、かつ、人間活動の影響を大きく受けているという特徴があります。

水質汚濁や富栄養化などに関する総合的な調査・研究として、1976年に霞ヶ浦では水質や底泥、植物プランクトン、動物プランクトン、生物群集などのモニタリングが開始されました。現在は生物・生態系環境研究センターが実施主体となり、毎月10か所で水質調査を、毎月1か所で魚類調査を行っています。

40年以上にわたるモニタリングデータは、「霞ヶ浦データベース」で公表され、湖沼研究のプラットフォームとして国内外の研究者に広く利用されています。



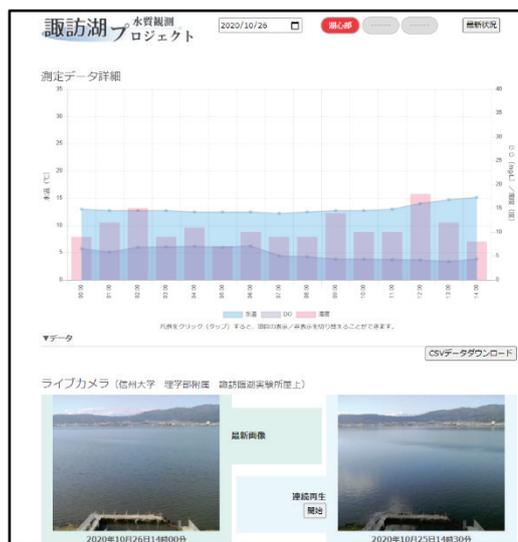
出典：国立環境研究所(2016)霞ヶ浦データベース, 国立環境研究所

<http://db.cger.nies.go.jp/gem/inter/GEMS/database/kasumi/index.html> (2020年10月26日閲覧)

### 事例2. 諏訪湖における水質観測プロジェクト(産学官連携プロジェクト)

諏訪湖は長野県中央に位置し、産業、観光、農業等に利用される重要な水域です。また、環境省の水質保全を検討するモデル湖沼への選定や諏訪湖環境研究センター(仮称、長野県)の設置が検討されており、水環境への注目度が高い水域でもあります。

産学官が連携して行う諏訪湖水質観測プロジェクトは、Suwa Smart Society 5.0の一環として始まりました。2018年8月から、IOTを利用した諏訪湖水質(水温、溶存酸素量(DO)、濁度(ホルマジン度))のリアルタイム観測・配信を実施しています。プロジェクトのホームページでは過去の水質データだけではなく、リアルタイムの諏訪湖の様子や水質データを確認できます。



今後は中長期的にデータを収集、解析を行うことで、将来の環境予測に繋げていくことを目標としています。

出典：諏訪湖水質観測プロジェクト <https://sss50.harmonia-cloud.com/> (2020年10月26日閲覧)

### 3.6 数値解析モデルを用いた気候変動影響と適応策の検討方法

#### 3.6.1 数値解析モデルを用いた検討

様々な要因から影響を受け複雑な水質変化となる湖沼においては、前述したような簡易的手法では整理できる内容に限界があり、将来の水質変化を定量的な予測まではできません。このため、気候変動による影響を定量的に評価し、適応策を検討しようとする場合には、数値解析モデルを用いた検討が必要です。以降、数値解析モデル（ここでは水質予測モデルを例として紹介）を用いた基本的な検討の流れは、図 3.27 に示すとおりです。

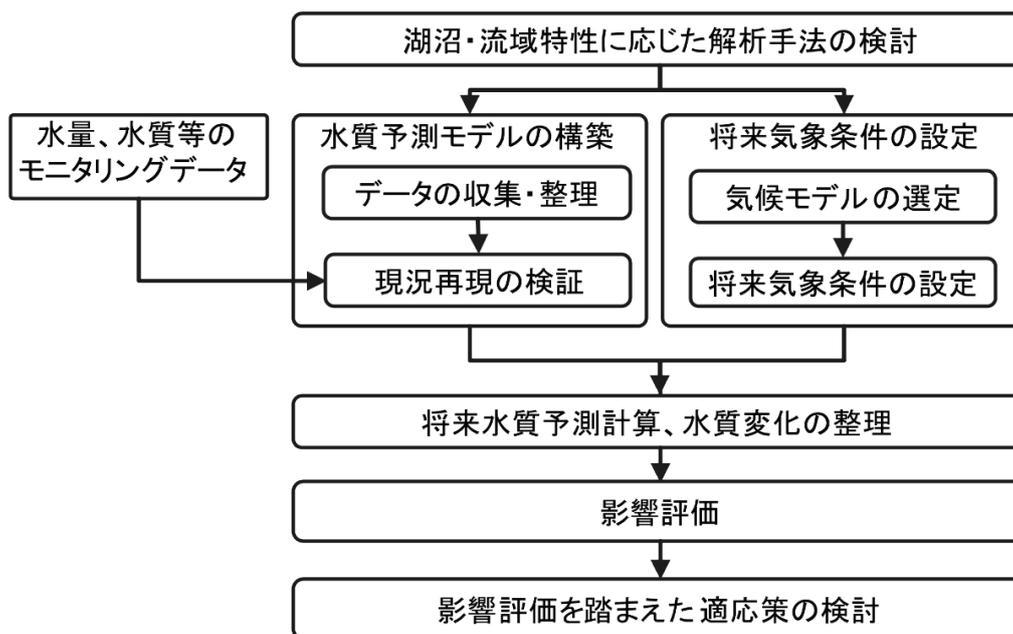


図 3.27 数値解析モデルを用いた気候変動による湖沼の影響予測・評価の実施フロー

#### 3.6.2 湖沼流域特性に応じた解析手法の検討

地域性や将来の気象変化の程度、その湖沼の特性（面積・容量・水深等）などは、湖沼ごとに異なるため、全国の湖沼において同じ方法で気候変動影響および適応策を見出すことは困難です。そのため、具体的な適応策を検討するためには、湖沼ごとに水質等の予測モデルを構築して、将来の水質等の予測と影響評価を行い、適応策の検討を行うことが必要です。

水質予測モデルを用いた気候変動影響の検討は、図 3.27 に示したように、気候モデルから得られる将来気象条件を入力条件として、水質予測モデルにより解析を行います。また、解析の実施には、通常、専門知識を持つ研究者や技術者が必要になります。

なお、本手引きを作成した検討会においては、具体的な検討事例として示すために、3つのモデル湖沼を選定して、水質予測モデルを用いて将来予測、影響評価の検討を行いました。巻末の資料編に、詳細の検討結果を示していますので、参考ください。

### 3.6.3 水質予測モデルの構築

#### (1) モデルの構成

将来予測を行うための水質予測モデルとして、流域からの流入量や負荷量も変化することから、湖沼内の流れや水質の解析モデルとともに、流域の解析モデルを連成させたモデルとすることが望ましいと考えます(図 3.28)。ただし、湖沼の面積・容量に対して流域規模が小さい場合には流域モデルを省略したり、予測する項目に応じて解析モデルを選択したりする等、湖沼・流域の特徴や解析する目的に応じて水質予測モデルを構築することが必要です。

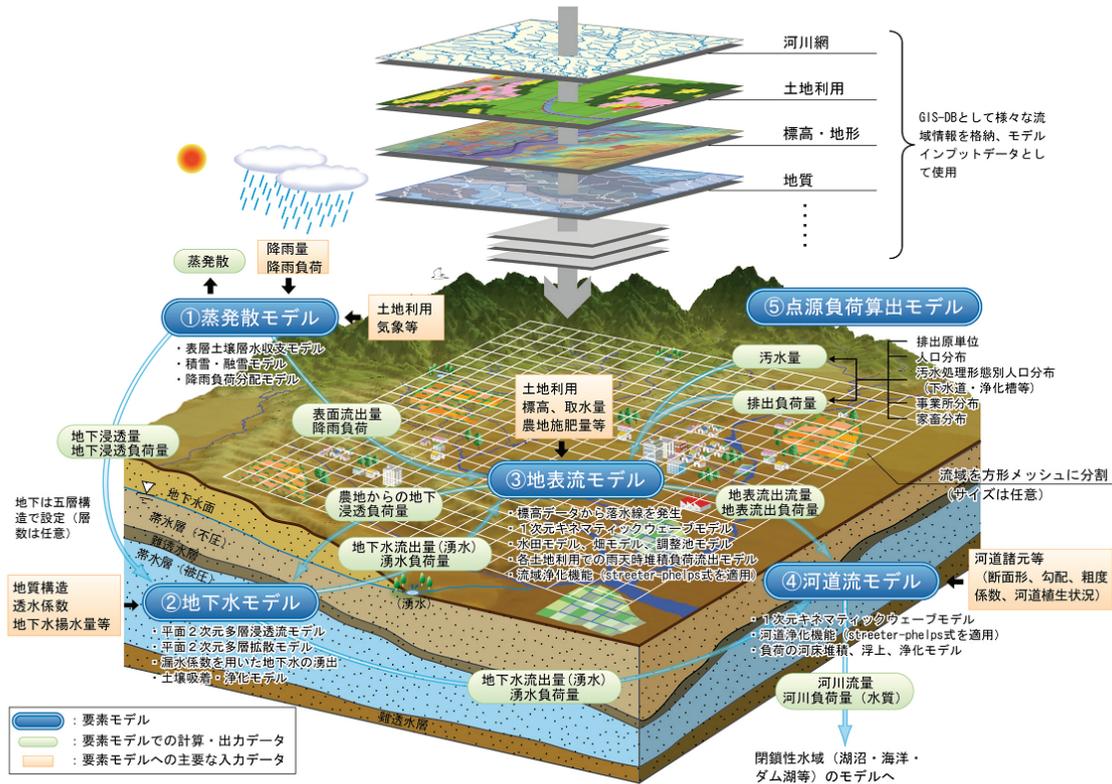


図 3.28 水質予測モデルの例(上図:流域流出モデル、下図:湖沼内水質予測モデル)

出典: 佐藤ら「陸域-湖内流動-湖内生態系を結合した琵琶湖流域水物質循環モデルの構築とその検証」、水環境学会誌、2011年34巻9号 p.125-141

## (2) 水質予測モデルの構築の留意点

水質予測モデルの構築には、観測データを用いて解析モデルの計算値を検証することが必要です。例えば、毎月の観測データと計算値の比較や、年間統計値での比較、および観測データと計算値の相対的な違いが何%あるかという整理を行うことで検証します。

また、検討しようとする影響に応じて水質予測モデルでの解析項目を設定することが必要です。例えば、水温の変化のみを検討する場合には生態系モデルを含まない簡易な水質予測モデルとすることができます。また、富栄養化の検討など湖内生態系を考慮する必要がある場合には、植物プランクトン、動物プランクトン、水生植物、魚類等が解析項目となります。ただし、魚類等高次生態系までを含めた水質予測モデルは、再現性の検証により多くの観測データが必要であるため、難しい場合が多いです。このため、水質予測モデルの構築にあたっては、必要に応じて専門家や地域の研究者からの助言等を踏まえることも重要です。

### 3.6.4 将来気象条件の設定

#### (1) 将来シナリオ

提供されている気候モデルのデータセットでは、排出シナリオ「RCP2.6～8.5」や将来の時期（21世紀中頃、21世紀末）があります。気候モデルのデータの提供状況や、検討対象の湖沼における水質保全計画や地域の総合計画等の将来ビジョンを考慮して、「将来」のシナリオを設定します。

#### (2) 使用する将来気象のデータセット設定の考え方

将来水質予測を行うためには、将来気象条件（気温や降水量等）の設定が必要です。将来の気象条件としては、国や研究機関等から、多くのデータセットの提供がなされています。これらは、研究が進行中であり、年々、新しいデータセットが出てきている状況です。

DIAS や A-PLAT 等のサイトから最新のデータセットの提供状況を確認して、データを収集します。なお、今後、掲載される WEB サイトやデータの入手方法は変わる可能性があり、最新の状況を把握してデータを入手します。

DIAS : <https://diasjp.net/> (データ統合・解析システム)

A-PLAT : <https://adaptation-platform.nies.go.jp/> (気候変動適応情報プラットフォーム)

また、使用する水質予測モデルの構造にもよりますが、データセットには、様々な時間解像度（時間～月単位等）、空間解像度（1km～数百 km）があります。対象とする湖沼・流域の規模や、モデルの構造、解析しようとする目的（水質項目）に応じて、適切な解像度のデータセットを選定する必要があるります。

巻末の資料編でのモデル湖沼での検討例を参考にすることもできます。

### 3.6.5 将来水質予測計算、水質変化の整理

構築した水質予測モデルに設定した将来気象条件を入力して、将来の水質予測計算を実施します。水質予測モデルでの計算結果を出力し、現況と将来の水質変化を整理します。整理にあたっては、図 3.2 に示している関連を踏まえて、気象変化と予測結果の水質変化をグラフ化する等により整理して、どのような気象変化によって予測結果の水質変化が生じたのか、因果関係を考察します。その上で、以降に示す方法により影響の評価を行います。

### 3.6.6 影響評価

#### (1) 影響評価の考え方

水質予測モデルの解析により得られる予測結果はあくまで将来の水質変化です。そのため、予測結果を用いて湖沼の生物・生態系や、人、社会に対してどのような影響が生じるのかを評価することが必要です。ポイントとして、湖沼の水質変化によって何が問題になるのかを整理しておくことです。例えば、水温が上昇（いつ？、どのくらい？）する予測結果は、その湖沼で何（漁獲対象魚種等）に影響を及ぼすのか、ということです。

このため、各湖沼の特徴（水利用状況や漁業等）に応じて、水質等の変化によって何が問題になるのかということをあらかじめ整理しておくことが、影響評価を行う場合には重要です。表 3.11 に示すように、評価する影響を設定し、水質予測モデルの予測結果から影響を評価するための指標の変化を整理して影響を評価します。

評価は、水質変化による影響の有無を判断するための基準値・しきい値を用いて行うことが必要です。例えば、図 3.29 は現況と将来でのクロロフィル a の予測結果を用いてアオコ（植物プランクトンの増殖）による影響の評価を行うイメージです。この場合、クロロフィル a 濃度について、将来、ピーク濃度は増加しますが、知見や過去の実績等から、植物プランクトン増殖による被害等が生じるしきい値を設定します。現況では 10 年間のうちしきい値を上回るのは 1 回ですが、将来では 5 回上回る結果です。つまり、被害等が生じる頻度が将来増える可能性があるという評価となります。

なお、このようなしきい値の設定には既往知見等が難しい場合には、必要に応じて地域の研究者、専門家にヒアリングにより情報を収集します。

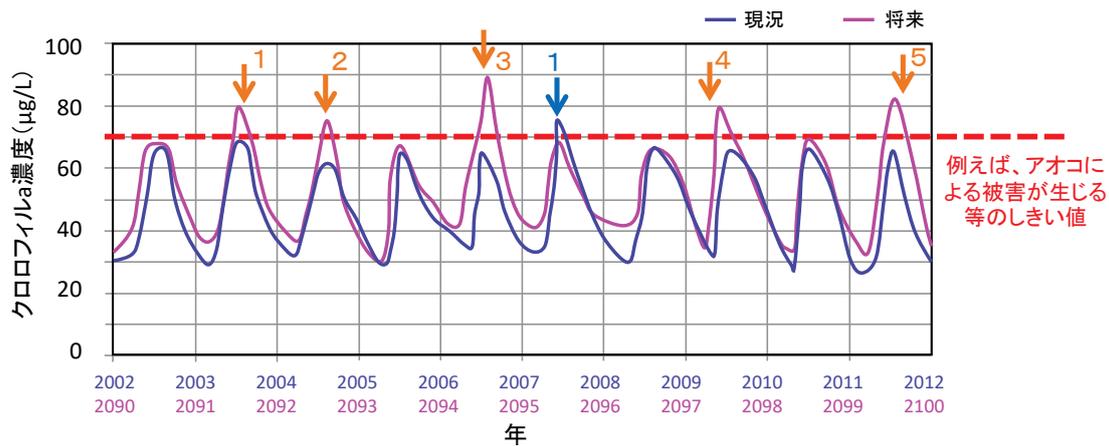


図 3.29 クロロフィル a の将来予測結果を用いたアオコ(植物プランクトン増殖)による被害に対する影響評価のイメージ  
(将来は 1 ケースでの予測結果であるため、複数ケースの結果による評価が必要)

## (2) 極端な水質変化での影響評価と予測期間

湖沼に生息する生物等にとっては、極端な気象により生じる極端な水質変化によって受ける影響が重要です。

例えば、魚類の生息について、将来年平均水温が 3 度上昇することよりも、生息適水温を超える高水温が一時的でも発生するとその魚類の生息に影響します。また、植物プランクトンの増殖について、指標である Chl.a 濃度が何倍になるのか（現状より悪化）だけでなく、異常増殖と判断される濃度上昇（しきい値を超える）がどのくらいの頻度で発生するようになるのかも、景観悪化という視点で捉えると重要です。

このように、極端な気象に伴う水質変化を評価する場合には、将来予測期間の長さの設定も重要です。予測期間の長さは評価する事象に応じて設定することが必要です。例えば、10 年に一度生じるような気象変化による影響を予測しようとする場合には、少なくとも 10 年間での予測が必要になると考えられます。

また、極端な水質変化が生じるような気象（豪雨等）をできるだけ多く含んだデータとするためには、なるべく長期間の予測を行うことが望ましいです。近年、数 10 年～数 100 年分の将来気象予測データが提供される気候モデルのデータセットも公表されており、これらを活用することが考えられます。

表 3.11 気候変動による湖沼の水環境への影響を評価するための指標と予測手法の例

水環境の変化	評価するための指標	生活や社会への影響 (生態系サービス)	予測手法の例 (主として水温・水質の予測)
冬季全循環の不全	①底層水の貧酸素化、底層利用種の酸欠	イサザ等の湖底利用種の漁獲量	定量 湖内水質予測モデルにより「溶存酸素量」の鉛直分布を解析し、その影響範囲を整理する。そのうえで、生物に影響がある濃度や深度、範囲等を検討する。
	②底泥からの窒素、リンの溶出	利水、景観、臭気	定量 湖内水質予測モデルにより「溶存酸素量、底泥からの溶出量」を解析して、溶出量の変化を解析するとともに、Chl. aの変化等を解析する。
水温の上昇	③冷水性魚類等の生息適水温とのずれ	冷水性魚類の漁獲量、遊漁人口	定量 湖内水質予測モデルにより水温の変化を解析する。
	④植物プランクトンの変化(量・組成)	利水、景観、臭気	定量 湖内水質予測モデルによりChl. aの変化等を解析する。
	⑤魚類等の生息水深の変化	漁獲量、漁法変化	定量 湖内水温予測モデルにより水温の鉛直分布の変化を解析する。
	⑥底泥からの窒素、リンの溶出	利水、景観、臭気	定量 湖内水質予測モデルにより「溶存酸素量、底泥溶出量」を解析して、溶出量の変化を解析する。
湖面結氷の変化	⑦湖面結氷の短期化	景観、イベント(地域資源)	定性 文献・ヒアリング等により情報整理・分析結果を用いて、将来の気象データから将来の結氷の変化を推定する。(モデルによる解析も可能である)
融雪時期の変化による栄養塩供給時期の変化	⑧植物プランクトン発生時期、量の変化	漁獲量、漁業時期変化、利水、景観、臭気、漁業ブランド	定量 湖内水質予測モデルによりChl. aの変化を解析する。
河川流量変化による湖内流動・循環の変化	⑨春先の栄養塩供給量の減少	漁獲量、漁業時期変化	定量 積雪・融雪量モデルにより融雪量を解析し、流域流出モデルにより河川流量・水質の変化を解析する。
	⑩春先の融雪水量の減少	(⑨と同じ)	定量 流域流出モデルにより解析した積雪融雪および河川流量をインプットとして湖内水質予測モデルで流動や水温を解析する。
降雨強度の変化による出水時流入栄養塩量の増加	⑪浮遊物質量の増加、透明度の変化	漁獲量、利水、景観	定量 湖内水質予測モデルによりSSの変化を解析する。SSの変化から透明度を算出する。
	⑫植物プランクトンの変化(量・組成)	利水、景観、臭気、漁業ブランド	定量 湖内水質予測モデルによりChl. aの変化を解析する。
降水量の減少による平常時流量の減少	(⑫と同じ)	(⑫と同じ)	定量 (⑫と同じ)

※①～⑦、⑧、⑩、⑫について、湖内水質予測モデルによる解析を行うためには、流域からの流量、負荷量の算定が必要であることから、流域流出モデル等を利用する必要がある。

### (3) 将来予測結果の不確実性の考慮

気候モデルでの将来の気象予測データは、必ず将来そのような気象が生じるという予測データではなく、将来生じる可能性があるというデータであるため、不確実性を持っています。このため、将来の気象予測データを用いて将来水質予測を行うにあたっては、不確実性を踏まえた検討とするため、可能な限り複数の気候モデルでのデータを使用する、あるいは、1つの気候モデルでも、なるべく長期間のデータを使用した予測とすることが必要です。つまり、色々なケースを想定して色々な将来の予測結果を得ることで、将来予測結果の振れ幅（不確実性）を把握します。

例えば、植物プランクトン（Chl.a 濃度）について、複数の気候モデル、排出シナリオでの予測結果を示します（図 3.30）。将来の予測 Chl.a 濃度の結果は一様でなく、気候モデルによって違い（振れ幅）があることが分かります。将来の予測結果の考察では、排出シナリオケースにより結果が異なり予測値には幅があると認識することが重要です。

巻末資料編のモデル湖沼における将来予測・影響評価の検討事例もご参考ください。

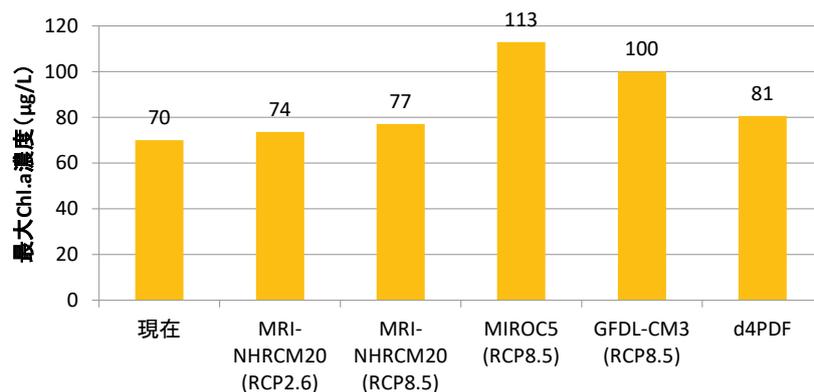


図 3.30 不確実性を考慮するための複数のケース設定による将来予測結果の例

※各ケースとも計算期間 10 年間で最大値で比較している。

### 3.6.7 適応策の検討

水質予測モデルを用いた将来予測計算結果による影響評価を踏まえ、次のような考え方により適応策の検討を行います。基本的には、「3.4.1(3)2)適応策の検討」で示した簡易的な手法での適応策の検討での考え方、手法と同じです。異なるのは、定量的な水質の変化が得られるため、具体的な影響やその程度、頻度を把握することができるということです。

#### (1) 適応策メニューの抽出

表 2.1 で示している適応策メニューを参考として、影響があると評価された項目に対して、必要な適応策メニューを抽出します。

また、図 3.2 に示す要因関連も参考として抽出することもできます。例えば、植物プランクトンの増殖により利水等へ影響が生じると評価されれば、植物プランクトンの増加に関連する要素（栄養塩や湖底堆積物：底泥、水温）に対して、表 2.1 を参考に適応策メニューを抽出します。

#### (2) 適応策による効果の予測

予測モデルにより解析が可能な適応策についてはその対策量を設定して予測解析を実施することにより、適応策による効果（水質改善等）を定量的に把握します。図 3.31 は対策内容や実施量の異なる 3 つのケースにおける予測結果の整理イメージです。複数の適応策を予測することにより、達成しようとする水質（例えば、現況の水質程度）に対してどの程度の改善効果が得られるのか把握することができます。

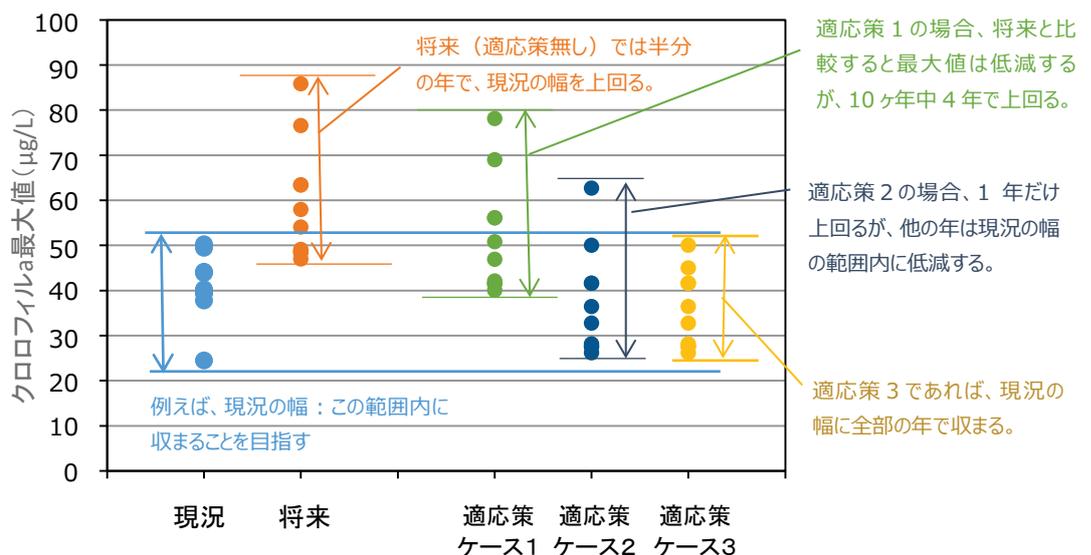


図 3.31 水質予測モデルによる適応策による効果予測の例  
10年間計算での各年のクロロフィル a 最大値をプロットしている。

※この例では将来予測は1ケースだけであるが、実際は複数ケースでの予測が必要。

### (3) 総合的な評価

適応策メニューに対して、各対策の重要度や優先順位を付け、効果的、効率的に実施していくために、総合的に評価を行います。

具体的には、各適応策の予測解析結果から効果の量や、実施にかかるコストの整理、地域での実施可能性やその他社会や環境等への影響、また副次的な効果など、総合的に検討を行って、評価します。

ここで、検討にあたっては、効果に比べてコストが高いと整理された対策についても、地域社会への副次的な波及効果や環境への影響、また他の実施主体との連携可能性等、様々な視点からも検討することが必要です（P2-25、「2.3.2 適応の考え方」を参照）。

例えば、図 3.31 より植物プランクトンの増殖による影響（アオコによる被害）に対する適応策を検討する場合、現況の変動の幅に抑えようとする、適応策 3 の対策量が必要ですが、適応策 3 のコストが大きい場合があります。それに対して、適応策 2 では、10 ヶ年中 1 ヶ年だけ現況の幅を上回り、その他 9 ヶ年は現況の変動幅内であることから、地域として許容できるという判断ができるのであれば、適応策 2 を選定することが考えられます。一方で、1 ヶ年だったとしても、その超過によって地域に及ぼす影響が大きい、また回復に長い時間がかかるような場合には、コストがかかったとしても適応策 3 を検討の対象とすることが必要です。

このような判断（例えば、上記のように超過を許容できるのか、否か等）は、地域における湖沼の重要性や、生息する生物等の特性によって異なります。判断するための技術的な根拠や、多くの関係者との合意形成等が必要になります。



## 4. 気候変動による影響評価と適応策の実施に向けたアプローチ

---

### 4.1 影響評価と適応策の実施に向けて

我が国の湖沼は、地域の自然や、人間生活・社会経済活動の基盤となるものであり、地域にとってかけがえのない存在であるとともに将来にわたって、その恵沢を享受することができるように、良好な状態でこれを保全していく必要があります。これまで、湖沼水質保全特別措置法による取組推進等、湖沼の水環境を保全するため、多くの取組が実施されてきました。

しかし、今、我が国では気候変動に伴う異常高温や豪雨等によって全国各地で影響は徐々に現れてきています。令和元年東日本台風（台風第19号）による各地での豪雨や氾濫被害等は記憶に新しいところです。湖沼の水環境についても、例えば琵琶湖では、平成30年、令和元年度の2ヶ年連続で全層循環の完了が確認されなかった等、観測史上、経験したことのない水環境の変化等が見られています。

このため、湖沼の水環境を保全し、将来にわたって湖沼と人が共生していくためには、気候変動による影響を予測・評価し、これまでの取組と合わせて、適応策を講じていくことが不可欠です。

本手引きでは、気候変動適応法において努力目標としている「地域気候変動適応計画」の策定にあたって、湖沼の水環境を対象として気候変動による影響評価・適応策検討を行うための考え方を示しました。地方自治体においては、「地域気候変動適応計画」に湖沼の水環境への適応策を組み込み、計画に従って適応策を実施していくとともに、順応的なアプローチ※により柔軟に対応していくことが重要です。

※順応的なアプローチ：目標を設定し、モニタリングと並行しながら、人為的に管理し得る範囲において手法を実施し、その後、モニタリング結果に基づく検証・学習によって随時手法の変更を加え、目標を達成していくという順応的な考え方にに基づく管理の方法

## 4.2 適応策の実施に向けたアプローチ

### 4.2.1 適応策の実施に対する現状・課題

我が国では、これまで富栄養化等の水質問題が発生した湖沼に対して、各地域において様々な対策が講じられてきました（既存対策）。

しかし、本手引きで述べているように、気候変動による影響に対する適応策は、現状では水環境変化や影響は生じていない（一部で生じている）が、将来、生じるであろうと想定される影響に対応していくものもあります。しかし、いつ、どの程度の問題が生じるかの想定が難しい（不確実性が高い）場合が多くあります。

### 4.2.2 適応策の実施に向けた進め方（順応的管理・共有・連携による取組）

まず、既存対策について、一定の効果が認められるものについては、その継続又は強化を検討します。一方で、現状で水環境の変化は見られないが、変化した場合に地域への影響が大きいものについては、予め十分に備えておくことが重要です。

具体的には、発生した場合に地域への影響が大きい事象に対し、考えられる対策のうち、湖沼の特性や地域の特性を踏まえて、効果的な対策がどのようなものか、技術的な検討を含めどの程度の準備期間が必要か、費用はどの程度必要かといった点について、基本的な検討（粗々の検討）をしておくことが重要です。

それらの対策については、数年単位で実行に移せるものもあれば、10年単位で実行に移していくようなものもあります。どのタイミングでそれらの対策をより詳細かつ具体的に検討していくのかについて判断していくことになりますが、その判断を適切に適時行うためには、平素から水環境の変化を確実に捉えるためのモニタリングが重要になります。

モニタリングにより湖沼の状態・水質等の変化を継続的に把握するとともに、変化の兆しや、変化が確認されれば速やかに対応できるように準備しておきます。また、変化が生じた後では取り返しがつかないような影響に対しては、事前にその影響を回避・抑制できるような対応を取っておくことも必要です。（例えば、魚類の大量死等の影響が想定されるなら、魚類種の保存、代替生息地の創出等）。

このように、湖沼における気候変動による影響への適応策の実施に向けて、現状における影響や将来想定される影響は現時点で可能な限り把握しておくとともに、現状の影響に対してすぐに対応できることは対応を実施しつつ、将来的な変化、影響への対応についてはモニタリングを継続して行いながら、中長期的な視点で取り組んで行くことが重要です。

そのためには、調査・研究の促進による知見の蓄積や、気候変動影響の予測手法の整備や各種対策の技術開発等が必要であり、地方自治体や国、研究機関、大学等が連携、協働していくことが重要です。

以上より、地方自治体等において、実際に適応策に取り組む際の段階的な検討のフローを  
 図 4.1 に示します。各検討は、本手引きに示した考え方や検討方法を踏まえて実施します。  
 すぐにできる対応や中長期的に取り組む対応を整理するとともに、モニタリングしながら、  
 継続的に取り組むことが重要です。なお、地域における湖沼の位置づけ（地域資源等）や、  
 地方自治体の状況・組織体に応じた取組とすることが必要です。

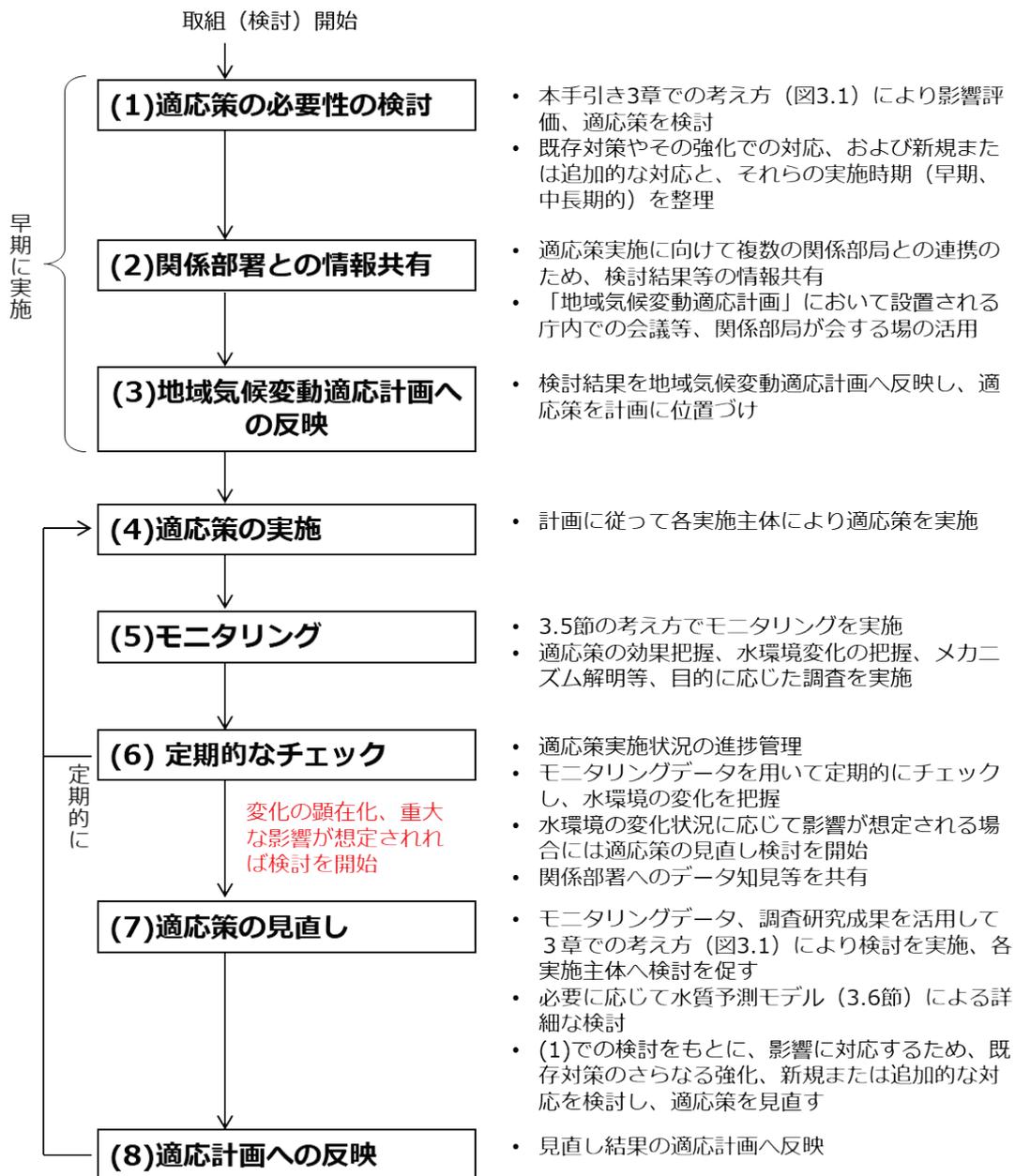


図 4.1 気候変動による影響評価・適応策の実施に向けた取組のフローと考え方

※図 3.1 で示した検討のフローは、本図の（1）および（7）での検討に該当する。



環境省

環境省 水・大気環境局 水環境課

〒100-8975 東京都千代田区霞が関 1-2-3

TEL : 03-3581-3351

ホームページ :

<https://www.env.go.jp/water/mizu.html>