

気候変動による湖沼の水環境に係る  
将来予測・影響評価検討

調査報告書

令和3年3月

環境省 水・大気環境局 水環境課



## はじめに

湖沼は古来よりその地域の人々と密接に関わり、地域の文化を育くむとともに、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、利用面からその影響は人々の生活に直結するものです。

しかし、湖沼の水環境に対する気候変動による影響はこれまでに経験していないため、検討にあたっての技術的知見、資料が十分でない状況にありました。

本資料「気候変動による湖沼の水環境に係る将来予測・影響評価検討 調査報告書（以下「調査報告書」という。）」は、環境省において、平成25年度～令和2年度にかけて湖沼の水環境に関連して、気候変動による将来予測や影響評価について検討した成果を、技術的な資料としてとりまとめたものです。また、学識者、関係機関、自治体職員で構成された検討会を設立して、議論し、常に最新の情報・知見を得ながら検討を進めてきました。

本調査報告書が、今後、各地の湖沼において気候変動の将来予測や影響評価の検討にあたって、有意義な技術資料として活用されることを期待します。

なお、本調査報告書で記載した将来予測結果、及び影響評価結果については、「気候変動による湖沼の水環境に係る影響評価・適応策検討の手引き（令和3年3月）※」の作成にあたっての基礎資料となっているとともに、その手引きの資料編にこの一部を記載しています。

※[https://www.env.go.jp/water/kosyou/post\\_88.html](https://www.env.go.jp/water/kosyou/post_88.html)



目次

1. 本調査の目的と実施手順	1-1
1.1 調査の目的	1-1
1.2 検討の経緯	1-1
1.3 調査報告書の作成について	1-3
1.3.1 目的	1-3
1.3.2 対象者	1-3
1.3.3 想定する活用方法	1-3
1.4 調査報告書の構成	1-4
1.5 気候変動による影響評価の検討	1-5
2. モデル湖沼の選定	2-1
2.1 モデル湖沼選定方法	2-1
2.2 モデル湖沼の選定結果	2-2
2.3 モデル湖沼・流域の概要・諸元	2-4
3. モデル湖沼での水質予測モデルの構築	3-1
3.1 モデル湖沼における気候変動による将来予測と影響評価の検討の流れ	3-1
3.2 八郎湖における水質予測モデルの構築	3-2
3.3 琵琶湖における水質予測モデルの構築	3-9
3.4 池田湖における水質予測モデルの構築	3-17
3.5 水質予測モデル構築のための資料・データの収集	3-25
3.6 水質予測モデルの課題	3-26
4. 将来予測における将来気象条件の設定	4-1
4.1 将来気象条件の設定の考え方	4-1
4.2 将来予測に用いる気候モデルの選定	4-3
4.2.1 将来予測ケース設定のための気候モデルデータセットの情報収集	4-3
4.2.2 気候モデルの選定	4-3
4.3 将来予測ケースの設定	4-10
4.3.1 気候モデルデータの収集	4-10
4.3.2 将来予測期間の設定	4-10
4.3.3 バイアス補正	4-11
4.3.4 気象条件以外のモデル入力条件	4-12
4.4 将来気象条件の設定結果	4-13
5. 影響評価の方法	5-1
5.1 影響評価の考え方	5-1
5.2 影響評価の指標	5-2
6. 八郎湖における将来予測・影響評価	6-1
6.1 将来気象条件	6-1
6.2 将来水質予測結果	6-6
6.3 影響評価	6-34
6.4 将来予測・影響評価とりまとめ（八郎湖）	6-51
6.4.1 将来の気象変化	6-51
6.4.2 将来の気候変動によって想定される影響	6-52
7. 琵琶湖における将来予測・影響評価	7-1
7.1 将来気象条件	7-1
7.2 将来水質予測結果	7-6
7.3 影響評価	7-31
7.4 将来予測・影響評価とりまとめ（琵琶湖）	7-51

7.4.1 将来の気象変化 .....	7-51
7.4.2 将来の気候変動によって想定される影響.....	7-52
<b>8. 池田湖における将来予測・影響評価 .....</b>	<b>8-1</b>
8.1 将来気象条件.....	8-1
8.2 将来水質予測結果.....	8-6
8.3 影響評価.....	8-14
8.4 将来予測・影響評価とりまとめ（池田湖） .....	8-20
8.4.1 将来の気象変化 .....	8-20
8.4.2 将来の気候変動によって想定される影響.....	8-21
<b>9. 調査結果のとりまとめ及び今後の課題.....</b>	<b>9-1</b>
9.1 検討結果のとりまとめ.....	9-1
9.2 気候変動による影響評価の今後の課題について .....	9-3
<b>10. 参考資料.....</b>	<b>10-1</b>
10.1 気候モデルの空間解像度の違いについて .....	10-2
10.2 将来予測における予測期間と予測結果について（八郎湖での試算） .....	10-8
10.2.1 設定した将来気象条件.....	10-9
10.2.2 将来水質予測結果 .....	10-12
10.2.3 まとめ .....	10-23
10.3 気候モデルデータのバイアス補正.....	10-24
10.3.1 MRI-NHRCM20.....	10-24
10.3.2 MIROC5、GFDL.....	10-27
10.3.3 d4PDF .....	10-29
<b>11. 用語集 .....</b>	<b>11-1</b>

# 1. 本調査の目的と実施手順

---

## 1.1 調査の目的

本調査は、気候変動等により引き起こされる湖沼の水環境への影響に関する定量的な将来予測、および影響評価の検討を行うことを目的とする。

湖沼は、閉鎖的な水理特性をもち、水が滞留し、汚濁物質が蓄積しやすいという特徴を持っている。また、気象変化に対して湖沼の水質等は複雑に変化することから、水質等の変化メカニズムを可能な限り反映した解析モデルを用いて、定量的に影響評価の検討を行う。

## 1.2 検討の経緯

本調査の検討の経緯を図 1.1 に示す。

本調査は、既往検討として、環境省により平成 21～24 年度にかけて実施された「気候変動による水質等への影響解明調査」での成果を踏まえて、平成 25～令和 2 年度の 8 ヶ年にわたり調査を実施し、気候変動による湖沼への影響について検討を行ってきた。図 1.1 に示すように、調査期間の前半では、気候モデルのシナリオとして A1B を用いた予測と検討を行ってきたが、平成 26 年 10 月に公表された「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次評価報告書（AR5）」において用いられているとともに、研究等が進み、提供される将来気象予測データでも RCP シナリオが主流となったことを受けて、用いる排出シナリオを変更した。

気候変動やその適応に関する世の中の動きは常に変化している状況であったことから、本調査の実施期間中でも最新の知見や情報を取り入れつつ、検討を進めた。

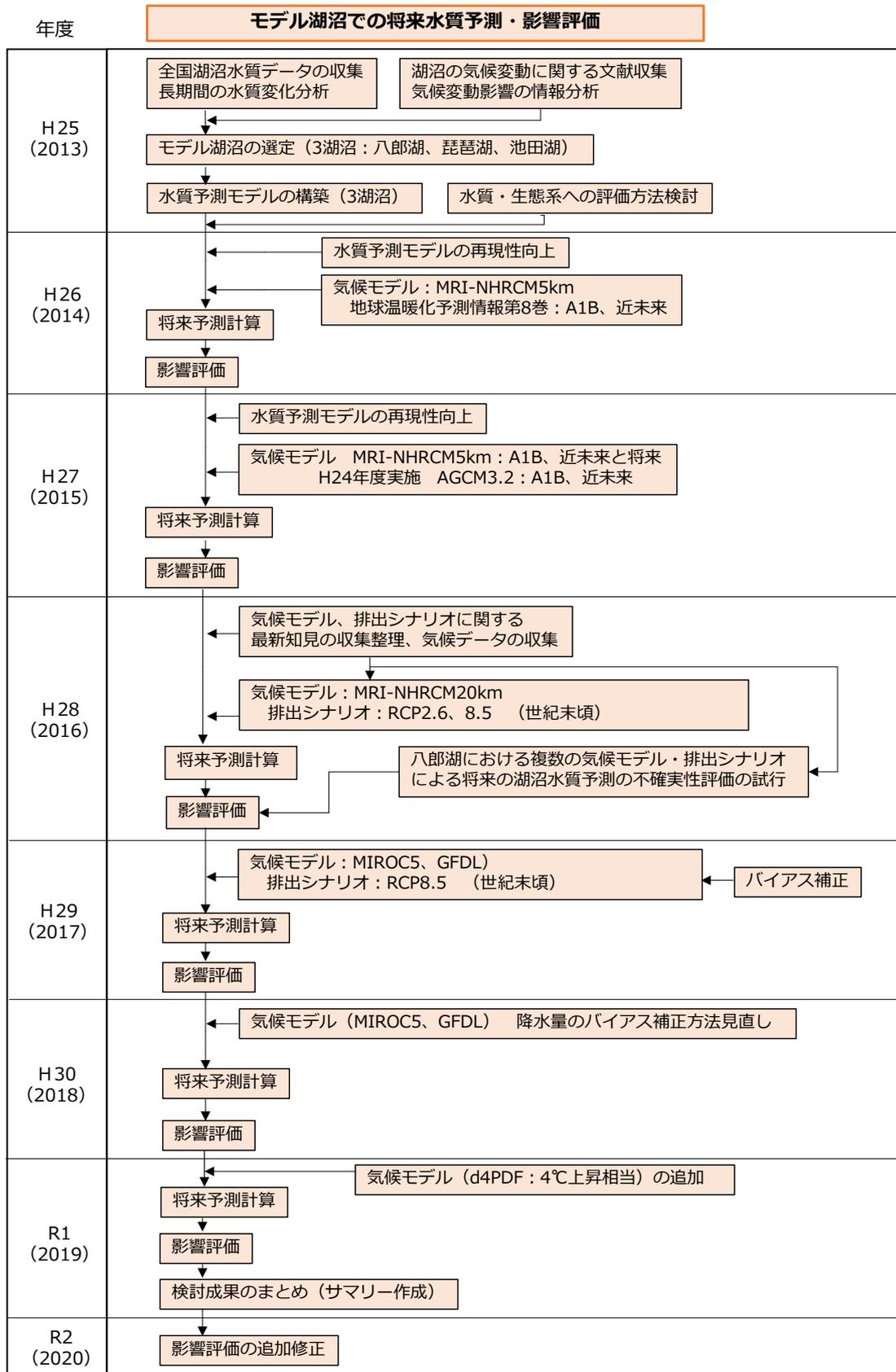


図 1.1 検討の経緯

## 1.3 調査報告書の作成について

### 1.3.1 目的

本調査では、3つのモデル湖沼を選定し、気候モデルデータを使用して数値シミュレーションモデルにより、可能な限り定量的、かつ具体的に気候変動影響評価、および適応策の検討を実施してきた。また、それらの成果を踏まえ、「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」を作成したところである（令和3年3月に公開）。

その検討の中で、得られた知見、見出された課題は多くある。

そこで、今後の全国の湖沼での気候変動による将来予測、影響評価に関する検討に活用してもらおうとともに、検討成果を広く参照しやすくするために、これまでの8年間の検討成果をまとめた「調査報告書」を作成した。

### 1.3.2 対象者

作成する調査報告書の対象（読み手）は、行政やコンサルタント等実務担当者、大学や行政等の研究機関の研究者等を想定している。

### 1.3.3 想定する活用方法

本調査報告書は次のような活用を想定して作成している。

- ・ 全国湖沼でシミュレーションモデルを用いた気候変動影響、適応策の検討を行うにあたっての参考資料
- ・ 気候変動将来予測、影響評価に係る研究等の参考資料

## 1.4 調査報告書の構成

調査報告書の目次構成を、表 1.1 に示す。

モデル湖沼における気候変動の影響評価において、予測モデルの設定・構築や、将来気象条件の設定、将来予測計算と影響評価について、それぞれの設定の考え方やそれに沿って実施した検討結果、および得られた課題を示している。

表 1.1 調査報告書の構成

章	見出し	内容
—	はじめに	背景、社会情勢、必要性、湖沼の価値 等
1	本調査の目的と実施手順	目的、検討経緯・フロー、検討会
2	モデル湖沼の選定	湖沼での水質変件事象例、水温・水質の長期の変化傾向、モデル湖沼選定
3	モデル湖沼での水質予測モデルの構築	各モデル湖沼での水質予測モデルの概要と再現性
4	将来予測における将来気象条件の設定	気候モデルの情報整理、予測ケース設定、将来気象データ整理
5	影響評価の方法	影響評価項目、評価の指標
6 7 8	八郎湖・琵琶湖・池田湖における将来予測計算、影響評価	設定した気象条件、将来予測計算結果 将来予測結果を用いて、影響評価項目とその指標により影響を定量的に評価
9	調査結果のとりまとめ及び今後の課題	検討会等で得られた課題を整理：調査データ充実、モデル精度向上、気候モデルデータ、影響評価の手法
10	参考資料	検討会で議論となる等、検討の中で得られた、将来予測、影響評価にあたって参考となる知見 ・気候モデルの空間解像度の違いについて ・将来予測における予測期間と予測結果について ・気候モデルデータのバイアス補正

## 1.5 気候変動による影響評価の検討

本調査報告書は、湖沼の水質および気候変動に関する学識経験者や関係する研究機関の研究者、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）」（以降、本検討会と記す）において議論した結果を取りまとめたものである。本検討会のメンバーを表 1.2 に示す。

**表 1.2 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
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
坂元 克行	鹿児島県 環境林務部 環境保全課 技術補佐
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



## 2. モデル湖沼の選定

### 2.1 モデル湖沼選定方法

湖沼の水質変化は気象や地形条件等によって特性が異なるため、本来は、湖沼毎に検討を行う必要があるが、全国の湖沼で同様の検討を行うことは困難である。

そこで、モデル湖沼での気候変動影響評価の検討結果を、全国湖沼での今後の検討に活用していくことを想定し、検討に普遍性・汎用性を持たせることを考慮して、全国湖沼からモデル湖沼を選定した。図 2.1 のフローに従って、全国湖沼の中からモデル湖沼として3湖沼を選定した。

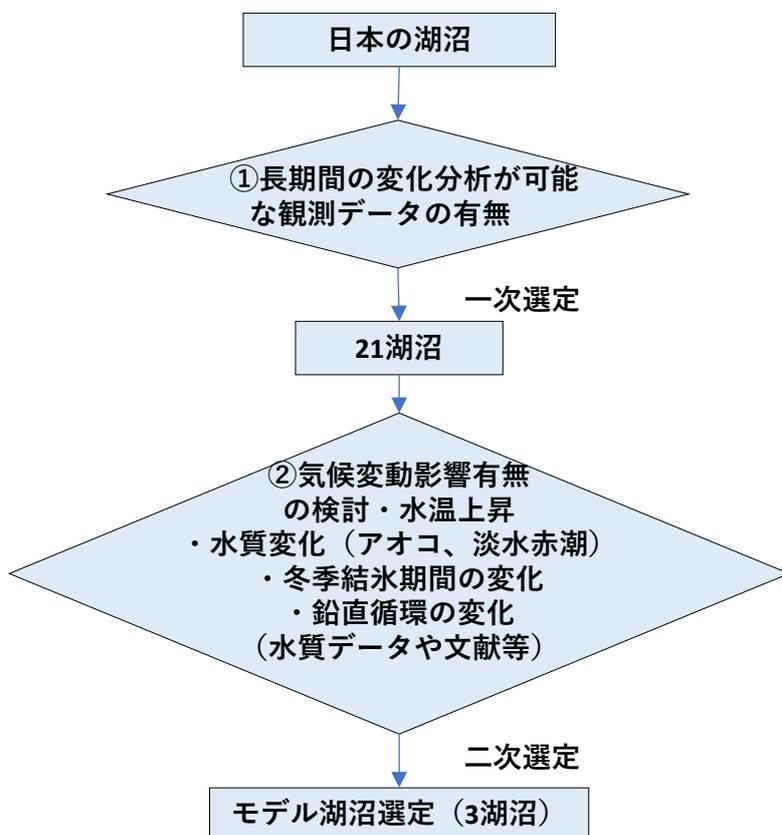


図 2.1 モデル湖沼の選定フロー

※一次選定、二次選定では 1981～2010 年度の 30 年間のデータを使用して検討した。

## 2.2 モデル湖沼の選定結果

モデル湖沼の選定は、以下の選定基準により、3つの湖沼を選定した。

- ・ モデル湖沼に求められる要件（気候変動影響が顕在化、データ・知見等が蓄積、全国湖沼への一般化が可能）を満たす湖沼
- ・ 全国湖沼において気候変動影響により生じる水環境の変化として、水温上昇、結氷短期化、アオコ等の発生、全循環不全、融雪出水変化等が想定される、これらが、現状で生じている、または今後顕在化することが想定される湖沼

これらの基準について、21湖沼での気象や、水質データ、資料の整理・分析を行い、それらの結果を取りまとめると、表 2.1 の通りとなった。

表 2.1 により、我が国の湖沼における気候変動影響（水温上昇、結氷短期化、アオコ等の発生、全循環不全、融雪出水変化）を検討するモデル湖沼として、八郎湖、琵琶湖、池田湖の3湖沼を選定した。

なお、本調査では淡水湖のみを検討対象とした。汽水湖は、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て、塩分や海面水位等も考慮した検討が必要となり、より複雑な水環境の変化が想定される。また、ダム等の人造湖について、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と考えられる。人造湖における将来影響を検討する際には、このような人為的操作等の考慮が必要となる。

このため、本調査ではまず淡水湖を対象として検討することとした。ただし、汽水湖や人造湖については本調査で得られた考え方を参考とすることはできると考えられる。

表 2.1 モデル湖沼の選定

地域	No.	湖沼	気候変動影響						汽水湖	(二次選定) モデル湖沼
			過去水温上昇		結氷 短期化	アオコ・淡水赤潮発生	循環不全	融雪出水		
			夏季	冬季						
北海道	1	屈斜路湖	○	—	○			○		
	2	阿寒湖		—	○			○		
	3	洞爺湖		—	○			○		
東北	4	小川原湖			○	○		○	○	
	5	十和田湖	○	—	○			○		
	6	田沢湖		—	○			○		
	7	八郎湖	○	—	○	○		○	○	
関東	9	中禅寺湖		—	○					
	10	霞ヶ浦	○	○		○				
	11	手賀沼	○	○		○				
	12	印旛沼	○			○				
中部	13	野尻湖	○	○	○			○		
	14	諏訪湖			○	○				
	15	佐鳴湖				○			○	
	16	河口湖								
近畿	17	琵琶湖北湖	○	○		○	○	○	○	
		琵琶湖南湖	○			○				
中国	18	中海		○		○			○	
	19	宍道湖		○		○			○	
	20	児島湖				○				
九州	21	池田湖	○	○		○	○		○	

※過去水温上昇での「—」は冬季に結氷するため水温測定無し

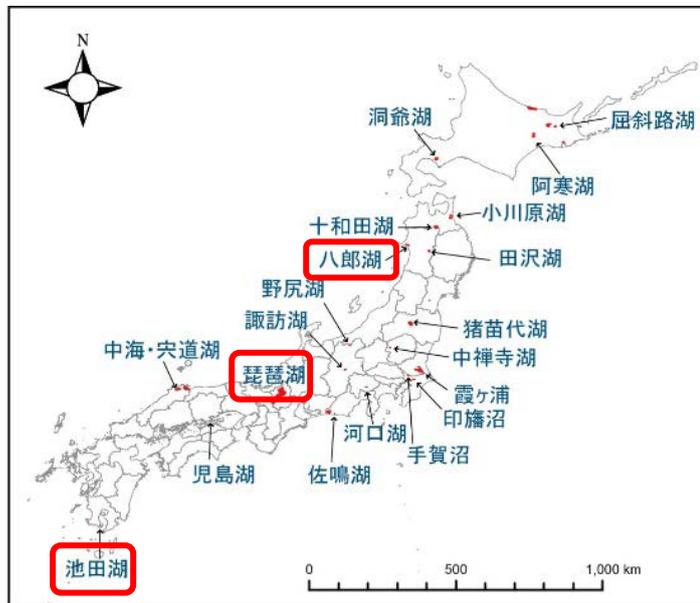


図 2.2 モデル湖沼の位置

## 2.3 モデル湖沼・流域の概要・諸元

### (1) 八郎湖

#### A) 諸元等

八郎湖は、図 2.3 に示すように、秋田県の中央西部、男鹿半島の付け根に位置し、昭和 32 年から始まった八郎潟干拓事業によって残された 3 つの水域（八郎潟調整池、東部承水路及び西部承水路）を合わせた総称である。干拓後の八郎潟は、面積 47.32km<sup>2</sup>、総容量 132.6 百万 m<sup>3</sup>、集水面積 894.34km<sup>2</sup> で、東部流域から流入する中小 20 あまりの河川や水路を主要な水源としている。干拓事業により船越水道に設置された防潮水門で日本海と遮断して淡水化された。八郎湖の水は大潟村や周辺の水田等に農業用水として利用され、地域の重要な水がめである。またワカサギやシラウオなどを主な魚種とする漁業も営まれており、地域の人々にとって重要な産業資源である。一方、八郎湖の水質は干拓後、流域からの流入負荷等により、徐々に富栄養化が進行し、近年はアオコが大量に発生するなど水質汚濁の問題が顕在化している。

八郎湖では、平成 19 年 12 月に湖沼水質保全特別措法に基づく指定湖沼の指定を受け、平成 20 年 3 月に「八郎湖に係る湖沼水質保全計画（第 1 期）」が策定された。以降、継続した取組が実施され、令和 2 年 3 月に「八郎湖に係る湖沼水質保全計画（第 3 期）」が策定されたところである。

また、八郎湖は冬季に湖面が結氷する湖である。結氷すると氷上でワカサギ釣りをする人が見られる。しかし、近年では、結氷しない、あるいは部分的な結氷にとどまる年もある。



諸元

	単位	調整池	東部承水路	西部承水路	全体
湖面積	km <sup>2</sup>	31.5	10.7	5.1	47.3
貯水量	百万m <sup>3</sup>	103.8	20.0	8.8	132.6
平均水深	m	3.3	1.9	1.7	
管理水位	T.P.m	かんがい期 :1.0 非かんがい期:0.5		0.35 0.25	
流域面積	km <sup>2</sup>	894.3			
流域人口	人	69,700 (平成30年度)			
下水道等普及率*	%	94.8 (平成30年度)			

※指定地域内の集計値

環境基準

項目	類型	基準値 *1	平成30年度 年平均値
COD	湖沼・A	3mg/L	7.3mg/L <sup>※2</sup>
T-N	湖沼・IV	0.6mg/L	0.95mg/L
T-P	湖沼・IV	0.05mg/L	0.068mg/L

※1：水質汚濁に係る環境基準値

※2：全層平均75%値

図 2.3 八郎湖・流域の概要

## B) 気候

年平均気温はかつて 10℃前後であったが、近年は 12℃前後であり、約 2℃の上昇、年最低気温はかつて-10~-20℃であったのに対し、近年は、-10℃前後となっている。降水量や日照時間では顕著な変化は見られない。流域は日本海側に位置するため、流域上流の山地域では降雪・積雪がある。総降雪量について、過去に比べて近年ではやや少ない傾向が見られる。

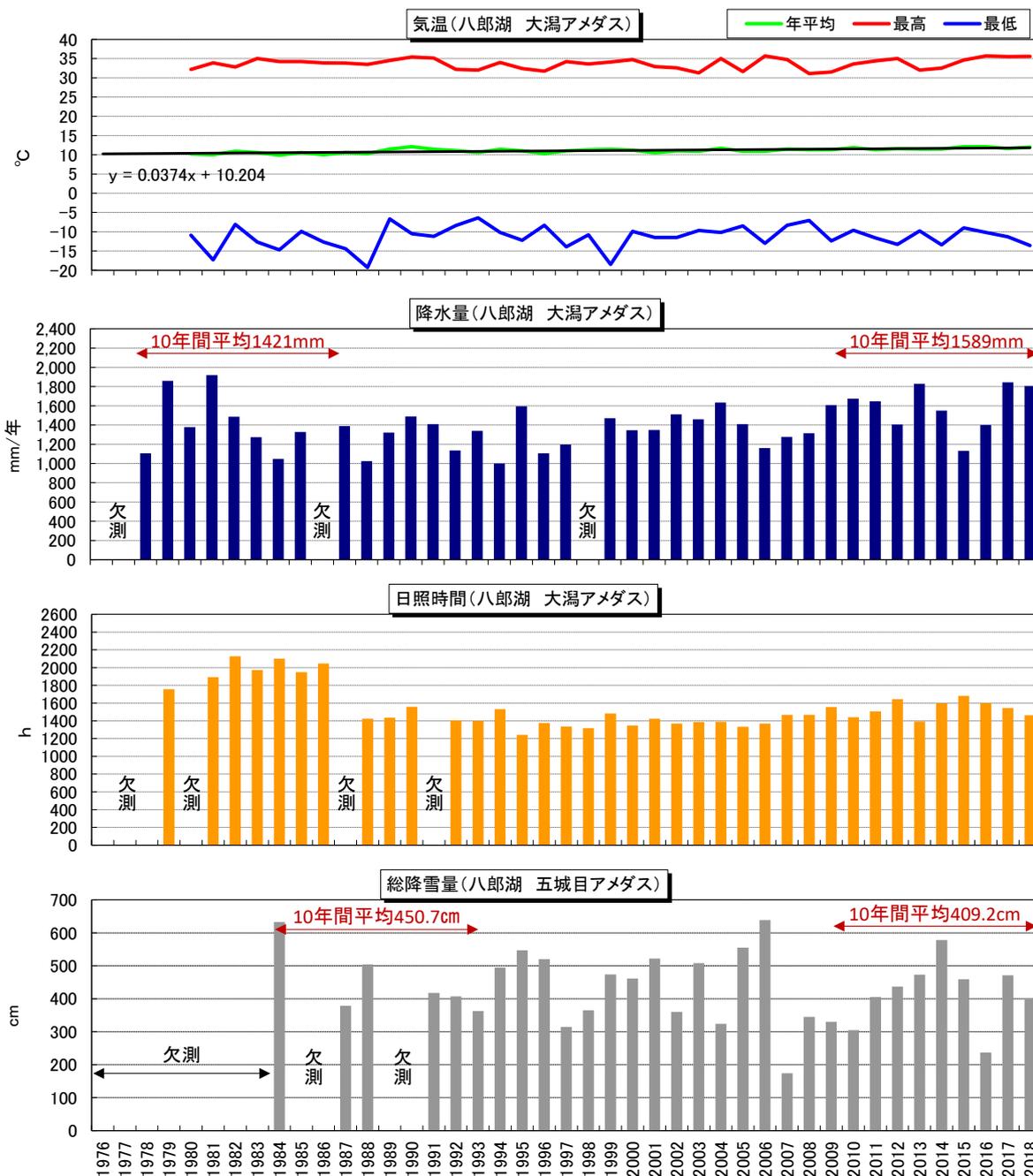


図 2.4 八郎湖・流域の気象(大湊、阿仁合アメダス)

### ③ 湖水質の経年変化

表層と底層の水温に差が生じる（成層化）のは一時期であり、ほぼ毎年成層化しており、経年的な変化傾向はない。1990年代頃には夏の水温は、表層で30℃を超えることはなかったが、2000年代では30℃を超える年が見られる。また、植物プランクトンの消長と関連するCODについて過去よりも夏の変動が大きくなっている。全窒素（T-N）や全りん（T-P）については顕著な経年変化はない。

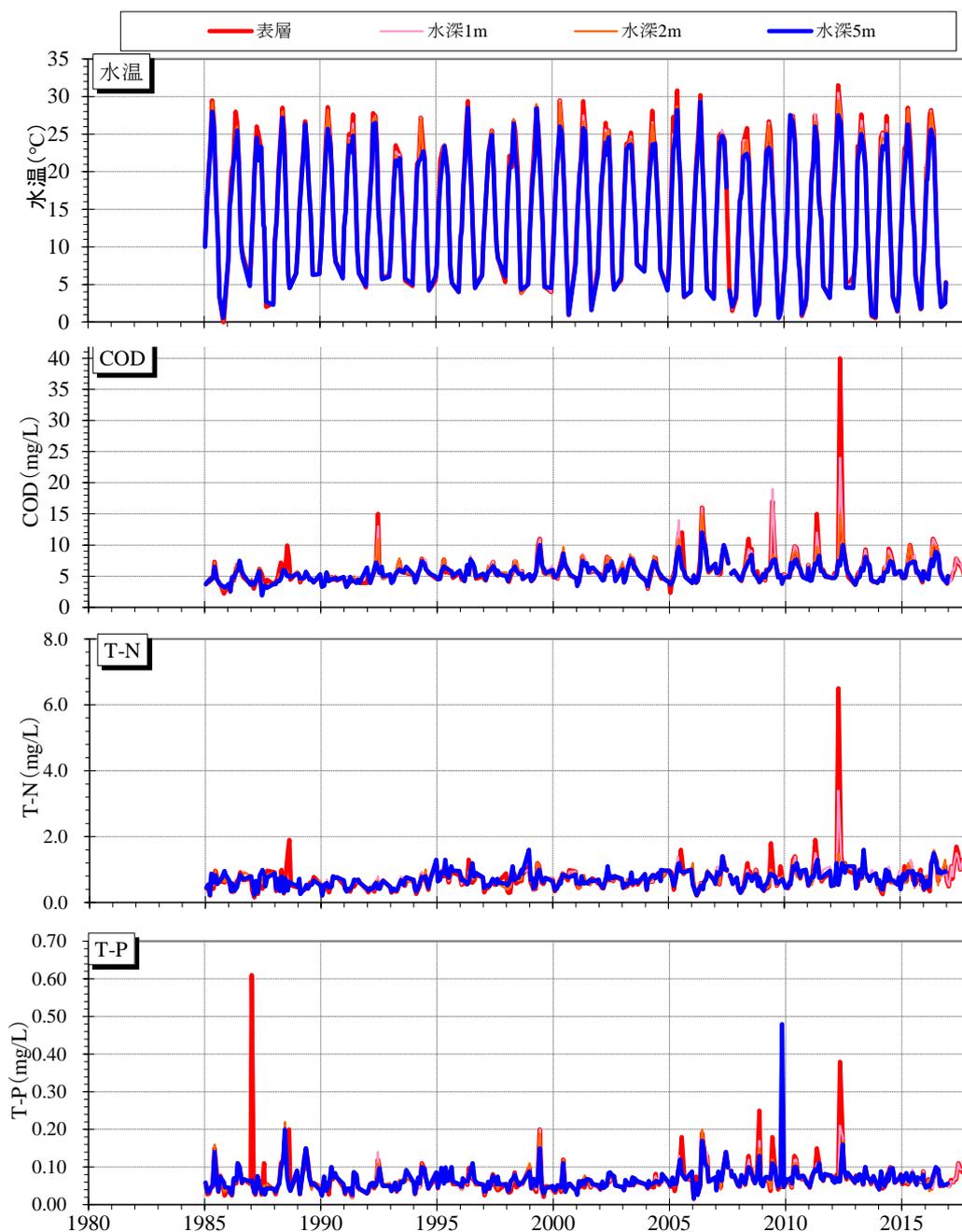


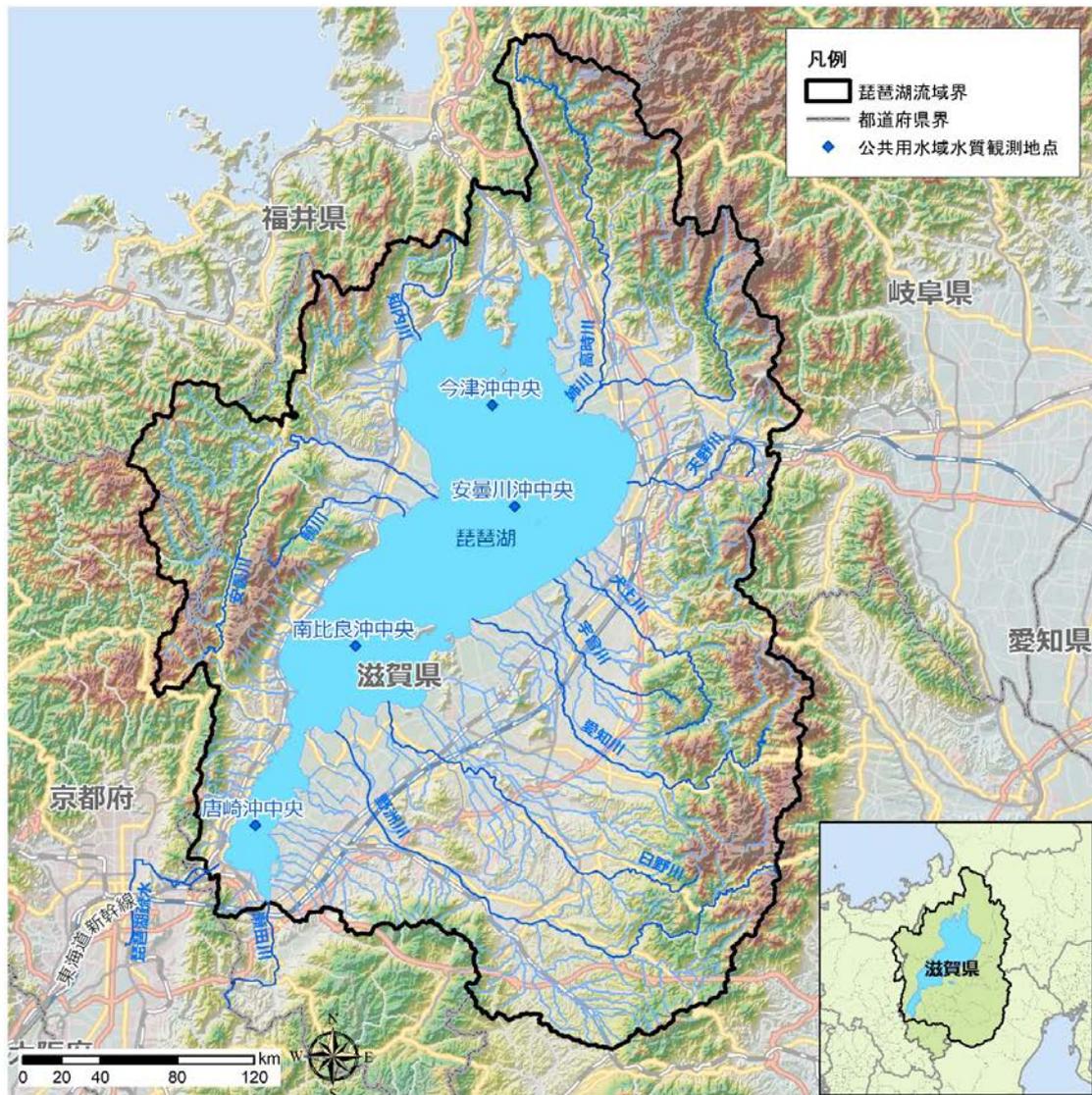
図 2.5 水質の経年変化(八郎湖 調整池-湖心)

## (2) 琵琶湖

### A) 諸元等

琵琶湖は図 2.6 に示すように、滋賀県に位置し、面積 670km<sup>2</sup>、貯水量 275 億 m<sup>3</sup> の日本最大の湖である。流域面積は 3,174km<sup>2</sup>、約 460 の大小の河川から流入した水は、瀬田川と琵琶湖疏水から流下し、滋賀県および近畿圏の 1,450 万人の生活と産業活動を支える水源となっている。400 万年の歴史をもつ世界有数の古代湖であり、また、多様な生物相に恵まれ、ラムサール条約に基づく重要湿地に登録されている。

1977 年に、淡水赤潮が大発生したことを契機として、滋賀県では 1980 年に「滋賀県琵琶湖の富栄養化の防止に関する条例」を施行した。しかし、閉鎖性が強く、水質改善が進まないことから、1985 年に湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼の指定を受け、滋賀県と京都府は、1986 年に湖沼水質保全計画を策定した。また、2015 年に「琵琶湖の保全及び再生に関する法律」が公布、施行され、滋賀県は「琵琶湖保全再生施策に関する計画」を策定し、琵琶湖を健全で恵み豊かな湖として保全および再生するために施策を総合的に推進している。



【諸元】

標高	O.P.B. 85.614m
湖面積	670km <sup>2</sup>
最大水深	103.58m
湖容積	275億m <sup>3</sup>
流域面積	3,174kkm <sup>2</sup>
流域人口 (H27)	132.5万人※1
下水道普及率 (H27)	88.8%※1

〈図面出典〉

- ・背景地図: @Esriジャパン
- ・流域界: 国土数値情報(流域界・非集水域)より作成
- ・流入河川: 国土数値情報(河川)より作成

【環境基準】

項目	類型	基準値(mg/L)※2		令和元年度水質状況 (単位: mg/L) ※3	
		北湖	南湖	北湖	南湖
COD	湖沼・AA	1	1	2.9	4.1
T-N	湖沼・II	0.2	0.2	0.20	0.22
T-P	湖沼・II	0.01	0.01	0.006	0.011

※2 水質汚濁に関わる環境基準値

備考: 基準値の評価方法

COD: 各基準点における表層の年間75%値の最大値。

T-N、T-P: 各基準点における表層の年間平均値の平均値。

〈データ出典〉

※1 滋賀県、第7期琵琶湖に係る湖沼水質保全計画(R1.3)より

※3 滋賀県 滋賀の環境2019(令和元年版環境白書)

図 2.6 琵琶湖・流域の概要

## B) 気候

過去と比べて最高気温は近年ではほぼ毎年のように 35℃を超え、最低気温は-5℃を下回る年の出現が少なくなっている。年降水量、年日照時間については顕著な変化傾向は見られない。降雪量については日本海側に近い流域の北側の山地域で降雪・積雪が多いが、過去に比べて近年減少傾向が見られる。

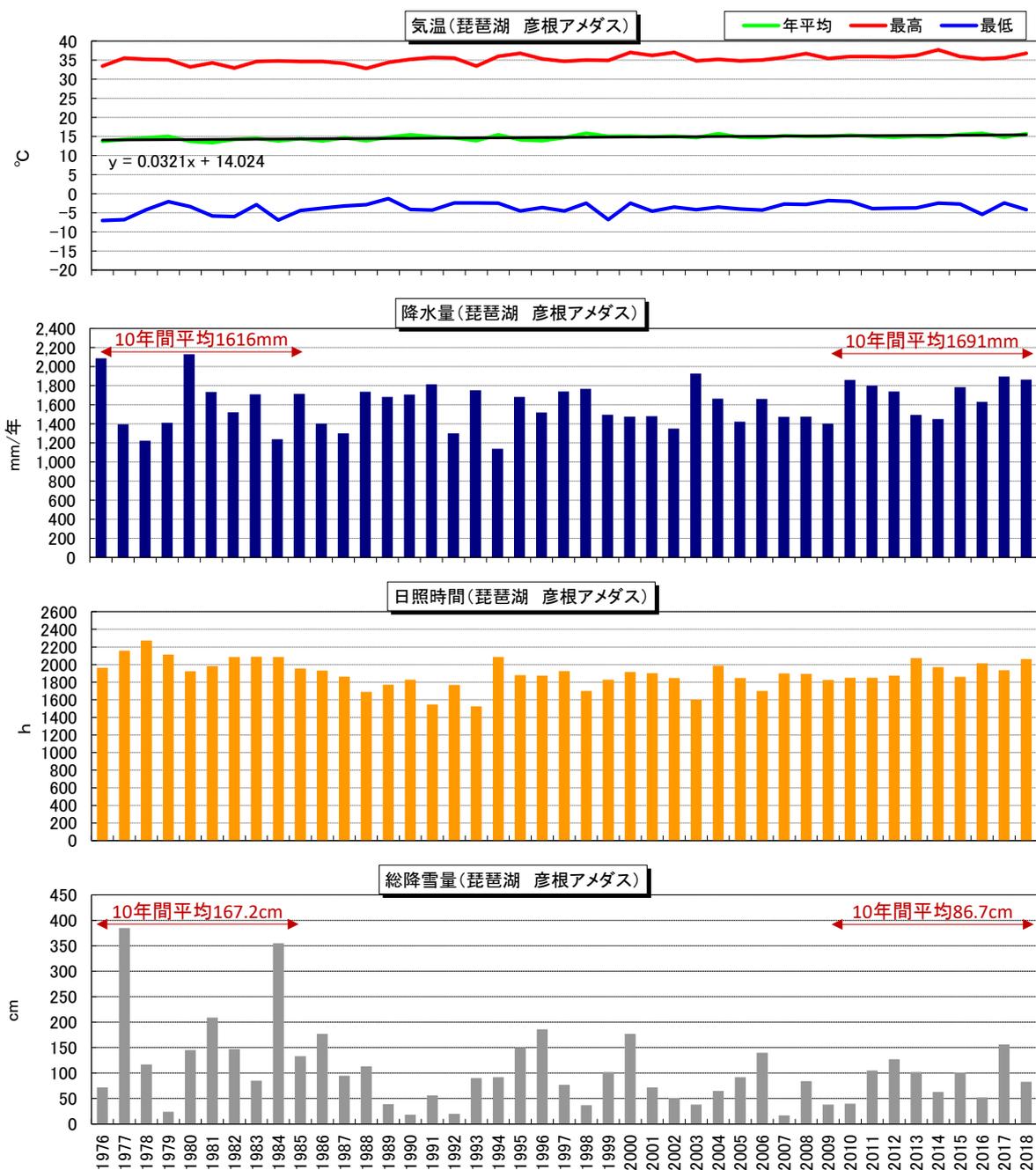


図 2.7 琵琶湖・流域の気象(彦根)

### ③ 湖水質の経年変化

図 2.8 に北湖の観測地点における長期的な水質変化を示す。表層水温について、最高水温が 30℃を超える年が近年生じていることが分かる。北湖では水深が大きく表層と底層の水温差が生じ、水温躍層が形成され、その時期には底層 DO の低下が見られるが、冬の全循環時に回復している。しかし、近年の 2019 年や 2020 年等では全循環の完了が確認されない年があった。なお、南湖は水深が浅い等、北湖とは特性が異なるため、本検討では対象としなかった。

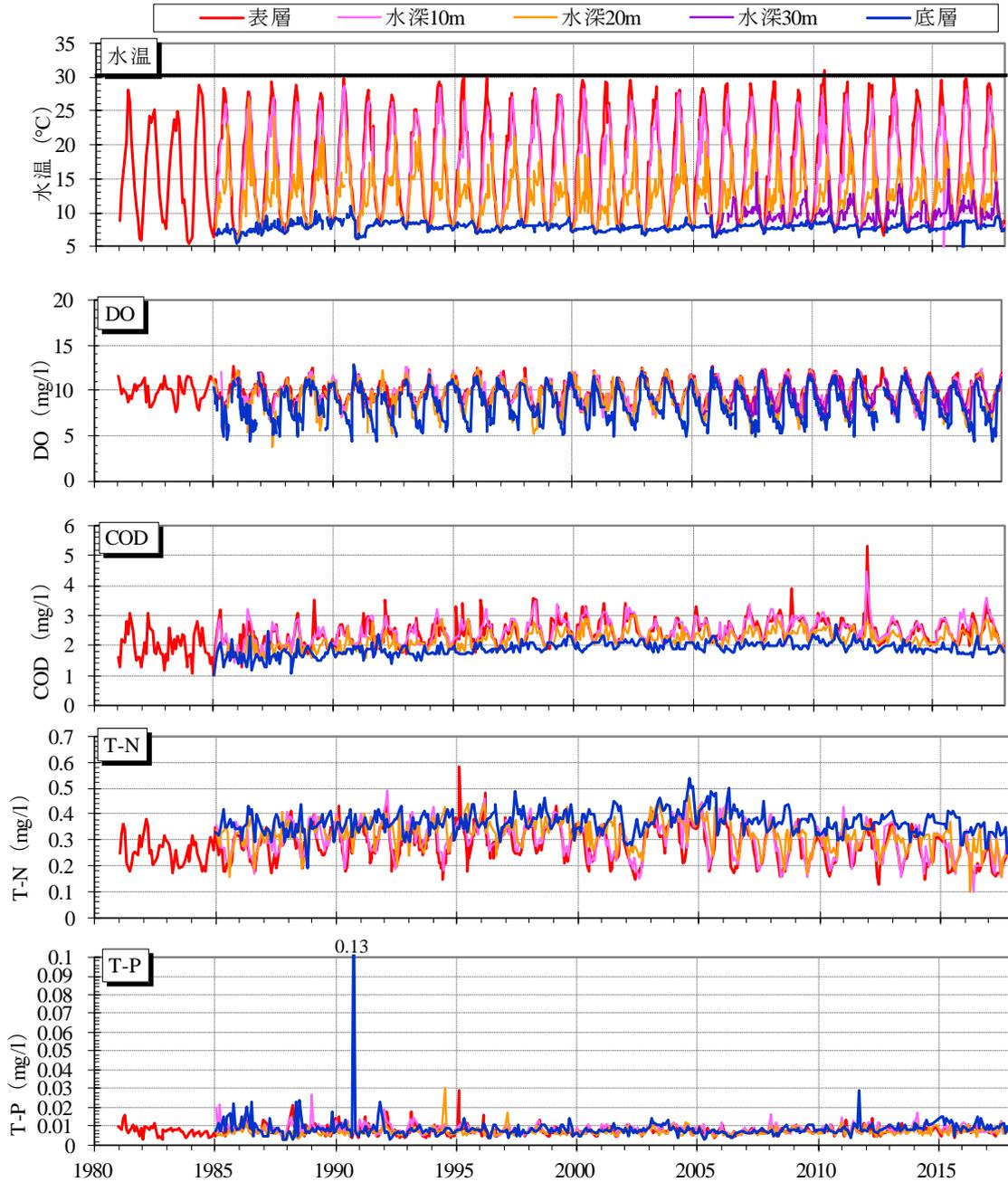


図 2.8 水質の経年変化(琵琶湖北湖 南比良沖中央)

### (3) 池田湖

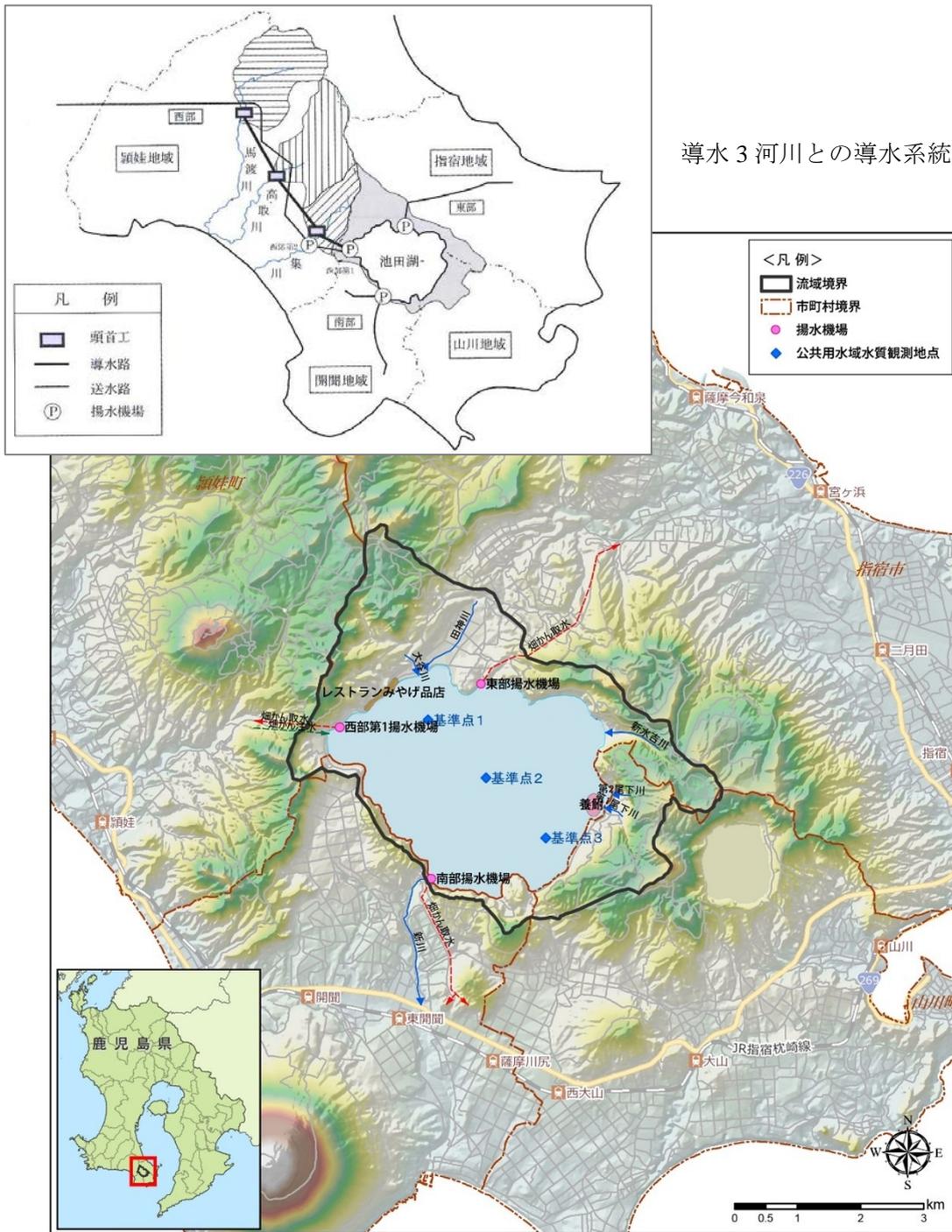
#### A) 諸元等

池田湖は図 2.9 に示すように、鹿児島県薩摩半島の南端に位置し、湖面積 10.95km<sup>2</sup>、集水面積 12.34km<sup>2</sup>、最大水深 233m の九州最大の湖である。薩摩半島南部一帯において、薩摩富士の別称を持つ開聞岳とともに、霧島錦江湾国立公園を形成する代表的な景勝地の一つである。

水質は、昭和 4 年の調査によると、透明度は 26.8m で、当時としては摩周湖、田沢湖、猪苗代湖に次いで国内第 4 位であったが、昭和 30 年代以降、周辺地域における社会活動等に伴い水質汚濁が進行し、透明度は 5m 前後まで低下した。

閉鎖性の高い水域である池田湖は、流域での社会・経済活動の伸展に伴い汚濁物質の流入が増大し、1981 年には淡水赤潮の発生など水質の悪化がみられた。このため、鹿児島県では、1983 年に池田湖の水質環境保全のための基本計画として、「池田湖水質環境管理計画」が策定され、以降、これまでに 4 回の改定が行われ、総合的な水質環境保全対策が講じられてきている。

一方で、近年、湖水の全循環が生じず長期にわたり循環不全が継続し、底層水では 1990～2010 年まではほぼ無酸素状態が継続したが、2011 年に全循環が生じて底層の DO が回復した。また、この無酸素状態の継続により底層の全窒素、全りん濃度の上昇が見られたが、全循環に伴う表層水質への影響（COD 等の急激な上昇など）は見られなかった。



【諸元】

湖面積	10.95 km <sup>2</sup>
周囲	15 km
海拔高度	66 m
最大水深	233 m
平均水深	125.5 m
容積	14.7 億m <sup>3</sup>
直接集水域面積	12.34 km <sup>2</sup>

※流域面積を除き国土地理院昭和47年測定の地図に基づく。

- (出典)  
 < 図面 >  
 ・背景地図: @ESRIジャパン  
 ・流域境界: 基礎地図情報「数値標高モデル10m」より作成  
 ・揚水機場、細かん取水など: 第4期池田湖水質環境管理計画 平成23年3月 鹿児島県

【環境基準】

項目	類型	水質環境 保全目標	平成30年度水質状況 (単位: mg/L)		
			基準点1	基準点2	基準点3
COD	湖沼・A	3 mg/L 以下	1.6	1.7	1.5
T-N	-	0.2 mg/L 以下	0.15	0.15	0.15
T-P	湖沼・II	0.01 mg/L 以下	0.003	0.004	0.003

備考: 水質環境保全目標の評価方法  
 COD: 各基準点における全層平均の年間75%値。<sup>注)</sup>  
 T-N、T-P: 各基準点における表層の年間平均値。

注) 75%値: 年間の調査結果のうち、濃度が低い方から並べて75%番目の値をいう。年間6回の調査の場合は、濃度が低い方から5番目の値となる。

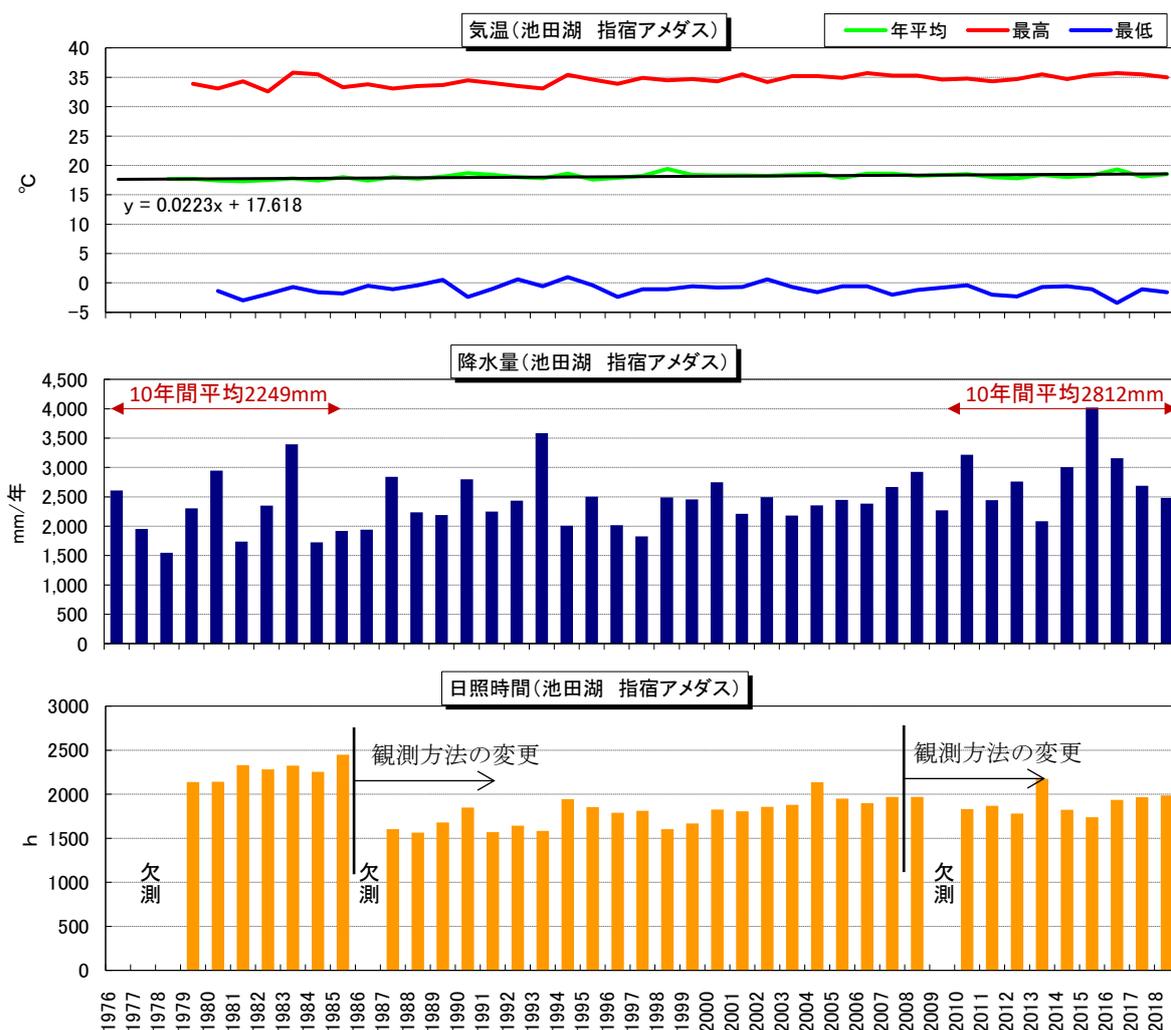
< 諸元・環境基準 >  
 第4期池田湖水質環境管理計画 平成23年3月 鹿児島県  
 (類型は、平成24年版 環境白書 鹿児島県)

図 2.9 池田湖・流域の概要

## B) 気候

年最高気温は 35℃以上になる年が増え、近年はほぼ毎年越えている。年平均気温としては緩やかな上昇傾向が見られ、直線回帰線から推定すると 1970 年代（約 50 年前）と比較すると近年では約 1℃の上昇が見られる。

年降水量は 1980 年頃の 10 年間平均と比較すると近年では 30%程度増加している。年総日照時間は 1,700～2,200 時間の範囲で推移している。



※日照時間は、1986年に観測装置あるいは観測方法に変更があったため前後のデータは均質でない。

図 2.10 池田湖・流域の気象(指宿)

### C) 湖水質の経年変化

表層水温は2000年以降、30°Cを超える年が増えている。底層DOについては、1990～2010年まではほぼ無酸素状態が継続したが、2011年の全循環により増加した。また、この無酸素状態の継続により底層の全窒素、全りん濃度の上昇が見られたが、全循環に伴う表層水質への影響（COD等の急激な上昇など）は見られなかった。

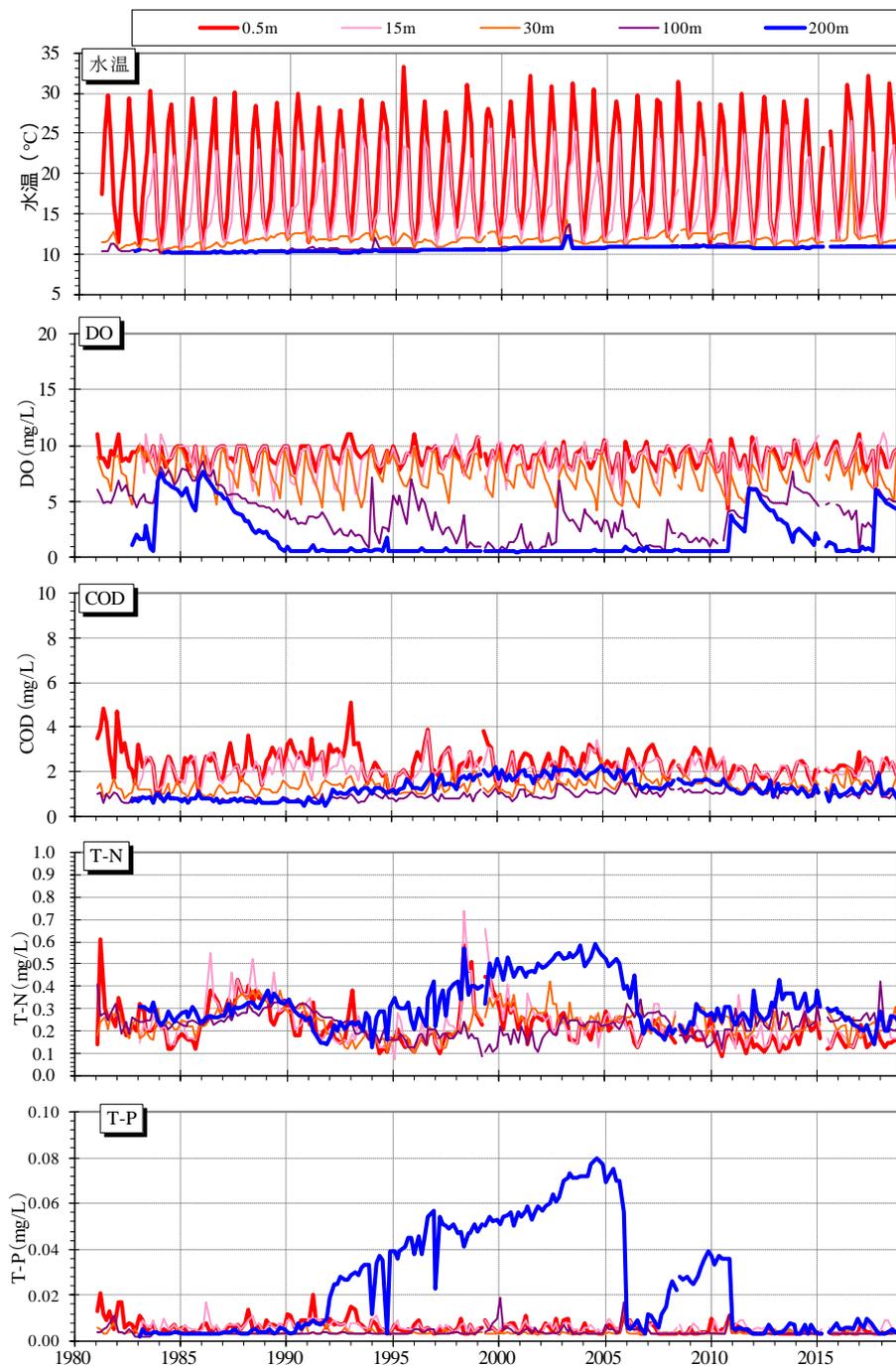


図 2.11 水質の経年変化(池田湖 基準点 2)



### 3. モデル湖沼での水質予測モデルの構築

#### 3.1 モデル湖沼における気候変動による将来予測と影響評価の検討の流れ

湖沼では、様々な要因により影響を受け、複雑な水質変化となるため、気候変動による湖沼の水質変化、影響を定量的に評価する場合には、数値解析モデル（以降、水質予測モデル）を用いた検討が必要である。

水質予測モデルを用いた、気候変動による影響予測、評価の検討の流れは、図 3.1 に示す通りである。この検討フローに従い、2章で選定したモデル湖沼を対象として、検討を行った。

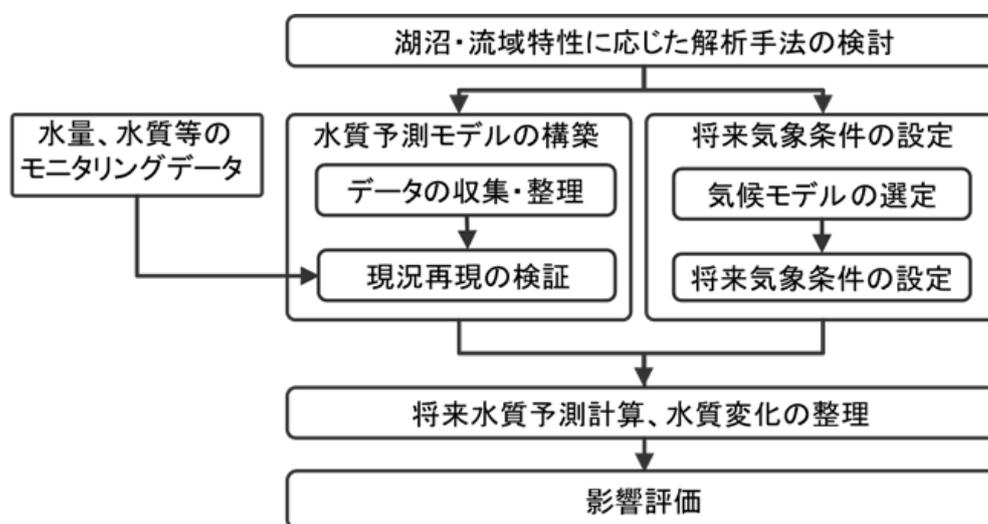


図 3.1 気候変動による湖沼での将来予測・影響評価の検討フロー

### 3.2 八郎湖における水質予測モデルの構築

#### (1) 水質予測モデルの概要

八郎湖での水質予測モデルは、秋田県が第2期湖沼水質保全計画の策定に使用した水温・水質等の予測モデル（流域モデル・湖内モデル）を用いた。なお、ここで使用している流域の排出負荷量のデータや八郎湖における取水・排水量等の諸条件は、秋田県より提供を受けた。

#### 1) 流域モデル

流域モデルは、図 3.2 に示す流域水物質循環モデルを用いた。このモデルは、流域における特徴的な流出現象（融雪出水、干拓地内等の水田からの流出）を再現できるモデルであることから、これを採用した。また、流域モデルのメッシュサイズは 200m とした。

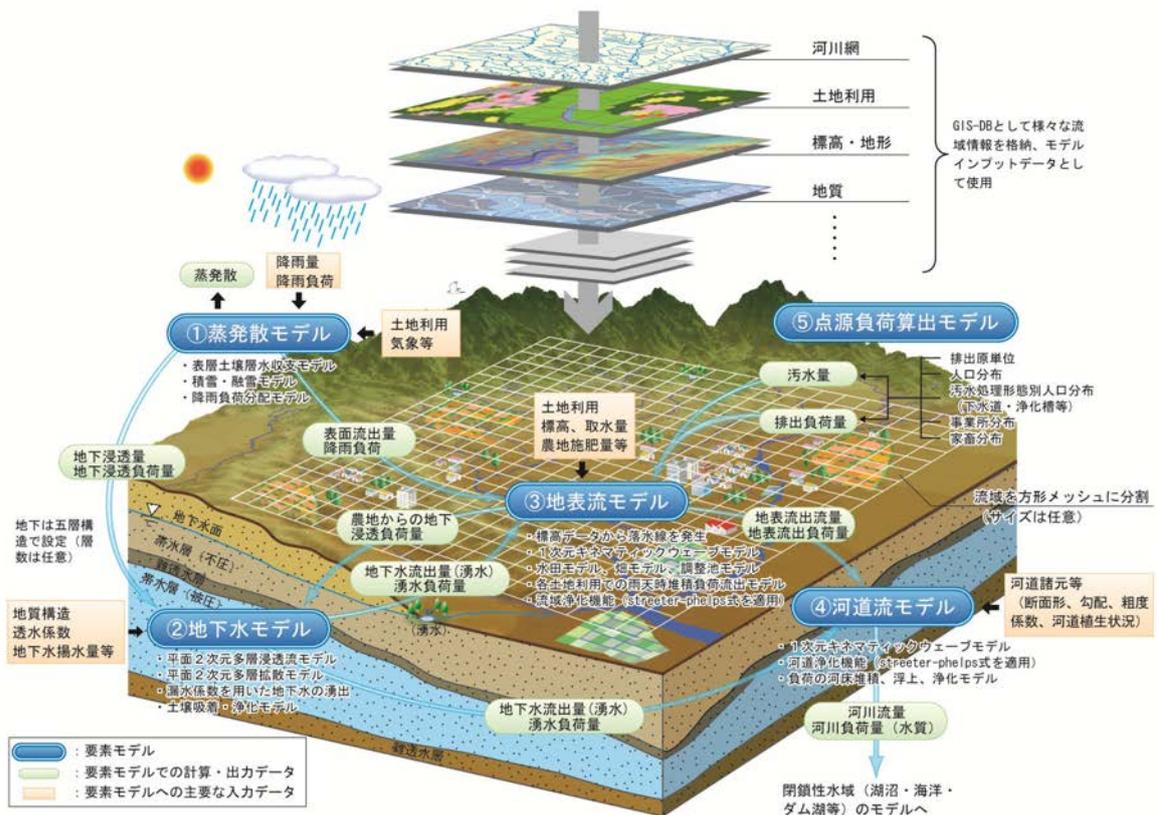


図 3.2 流域モデル(流域水物質循環モデル)の概要

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) 湖内モデル

湖内モデルは、水理（流動）モデルと水質モデルで構成される。

空間分割としては、湖は広いことから水平方向に二次元とし、鉛直方向に水温躍層が生じる時期もあることから層分割を行い、平面二次元多層とする。メッシュサイズは、水域の広さ、及び深さ方向での分割数を考慮して、水平方向に 200m、鉛直方向に 2m とした。

水理モデルとしては、連続式、運動方程式（運動量保存則）、熱収支式（水温・エネルギーに関する移流拡散方程式）、物質収支式（水質物質に関する移流拡散方程式）で構成されるモデルを用いる。水を非圧縮性粘性流体とし、静水圧近似、ブシネスク近似のもとで連続式、運動方程式を表現する。また、本モデルでは、水平・鉛直の渦動拡散係数の設定には、SGC 乱流モデルおよび成層化関数を用いる。

水質モデルは、図 3.3 に示すような低次生態系モデルを用いる。本モデルで取り扱う水質項目は 15 項目であり、全窒素、全りん、TOC については、他の水質項目の解析結果から算出する。

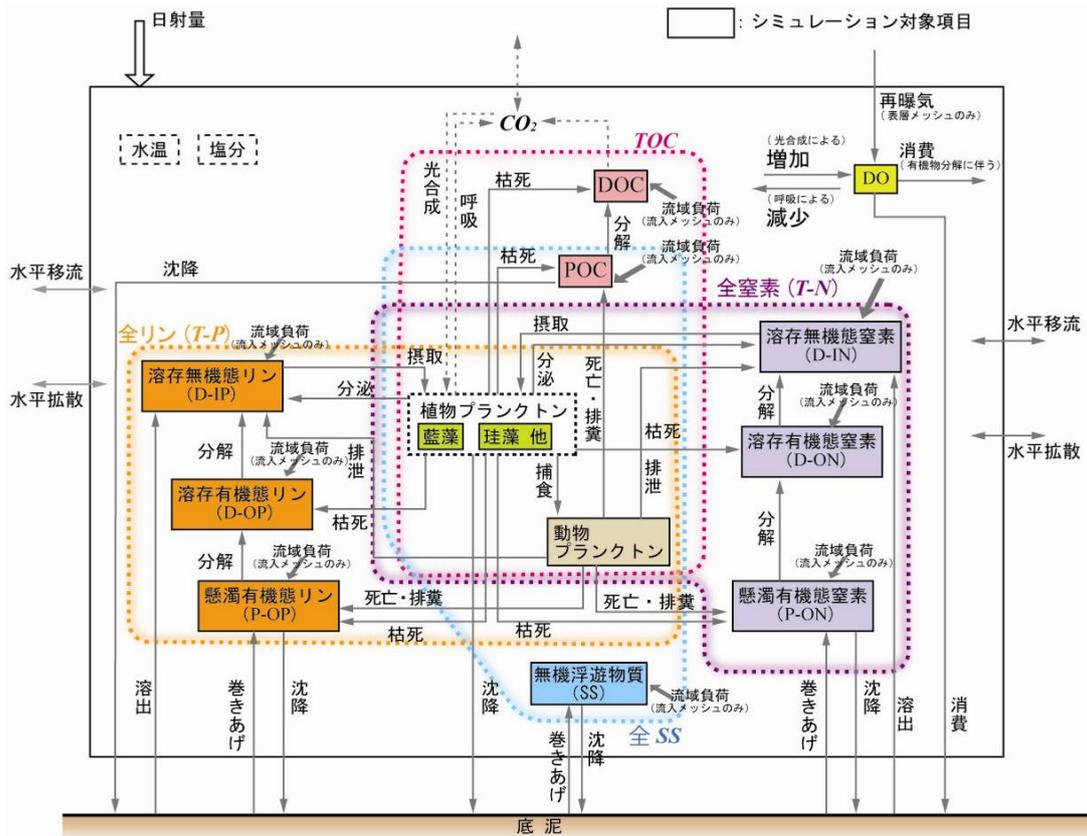


図 3.3 八郎湖における湖内水質予測モデルの概要

出典：秋田県「八郎湖に係る湖沼水質保全計画（第2期）策定業務 報告書」（平成 25 年 3 月）

P6-11 図 6.1.1

## (2) 水質予測モデルの現況再現性

### 1) 河川流量

八郎湖の流入河川で観測されている河川流量データは、精度に疑問（湖水位の背水影響等に起因する等）があるため使用しないこととした。このため、八郎湖の水収支から逆算された「流域流入量」を用いて、河川流量の検証を行った。

図 3.4 より、流域流入量の計算値は、実績（逆算）に対して年ごとには違いが出ているものの、5 ヶ年平均ではほぼ同じであることから、流域水収支の再現性は良いと考えられる。

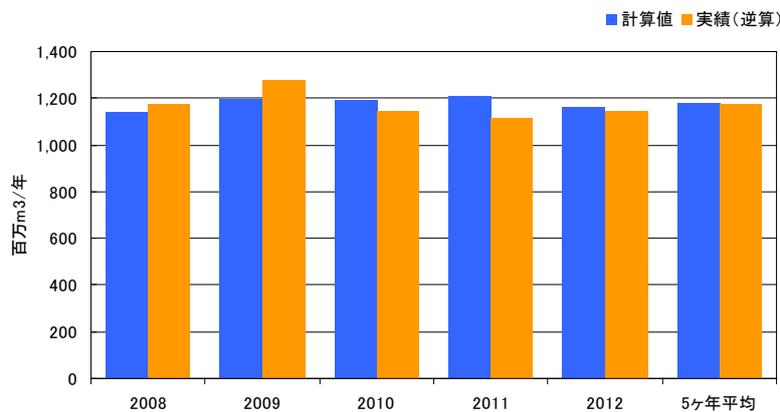


図 3.4 流域流入量再現結果(2008(H20)～2012(H24)年度)

流域で最大の流域面積であり、その流域には冬に積雪がある山地を抱える、馬場目川における河川流量の再現計算結果を図 3.5 に示す。

降雨による流量増加とは別に、3～5 月にかけて流量の増加が認められ、融雪出水による流量増加であると考えられる。

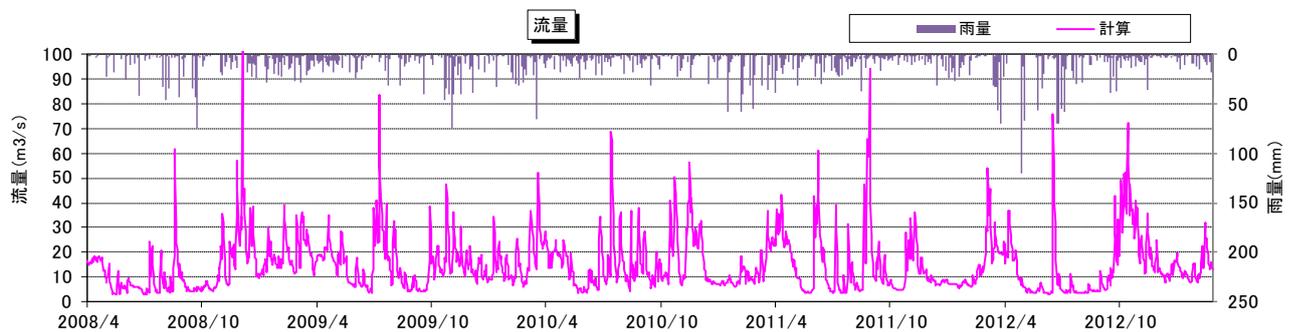


図 3.5 流域モデルによる計算結果(河川流量:馬場目川一竜馬橋)

## 2) 流域の水収支

図 3.6 に、八郎湖流域の水収支を示す。大潟村を除く流域では、降水量 1,466mm に対して、八郎湖への流出水量は、降雨による表面流出量や地下水からの湧水量、及び流域外導水、かんがい用水と人工系汚水量を合わせて、約 1,690mm となっている。また、大潟村からの流出水量は 2,870mm となっている。

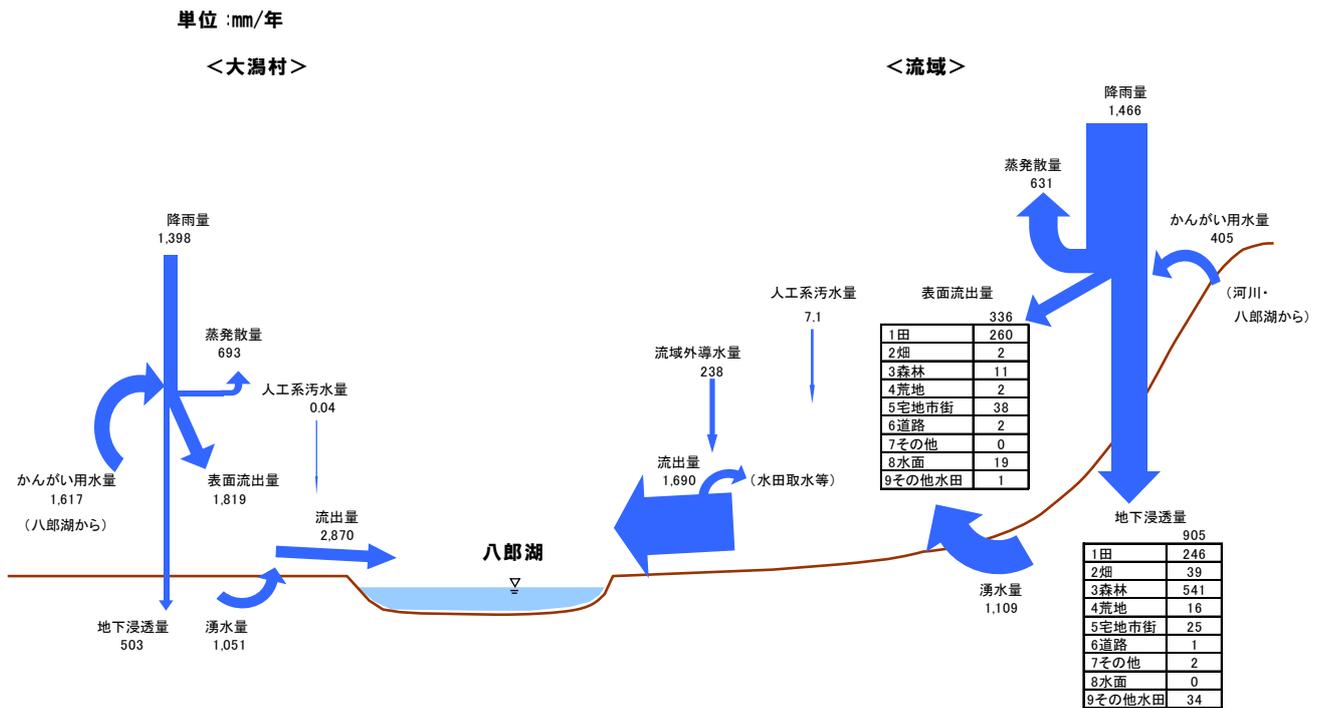


図 3.6 八郎湖流域の水収支(2012(平成 24)年度の年収支)  
流域モデルによる計算値

出典：秋田県、平成 25 年度八郎湖に係る湖沼水質保全計画（第 2 期）策定業務委託報告書

### 3) 河川水温

河川水温の再現性については、図 3.7 の通りである。夏の最高水温、冬の最低水温、及び季節変化について計算値は実測値と合致しており、河川水温を再現できていると考えられる。相関関係も傾きが 1.0 に近く、切片も 0 に近く相関性も高い。(図 3.9、左図)

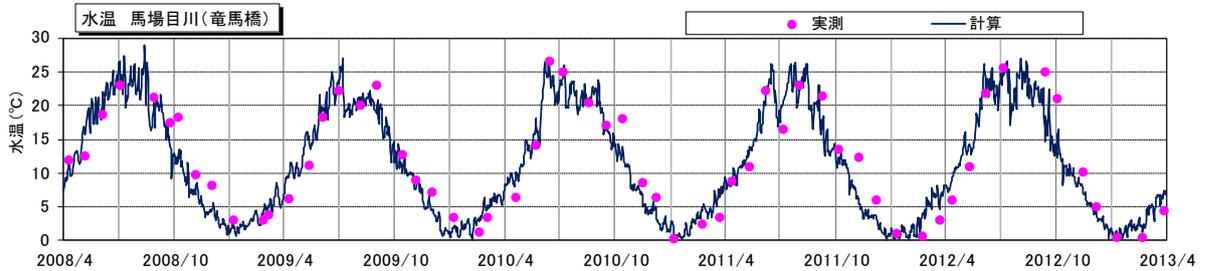


図 3.7 流域モデル 現況再現計算結果(河川水温:馬場目川)

### 4) 湖水温

湖水温の再現性は図 3.8 の通りである。環境基準点である調整池湖心においては、夏の最高・冬の最低値や季節変化の傾向は、計算値と合致しており、再現性が得られていると考えられる。また、相関性も高いことが分かる(図 3.9、右図)。

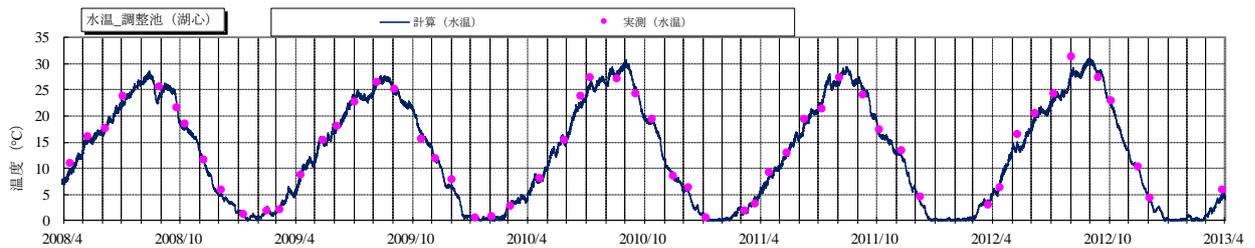


図 3.8 湖内モデル 現況再現計算結果(湖水温(表層):調整池湖心)

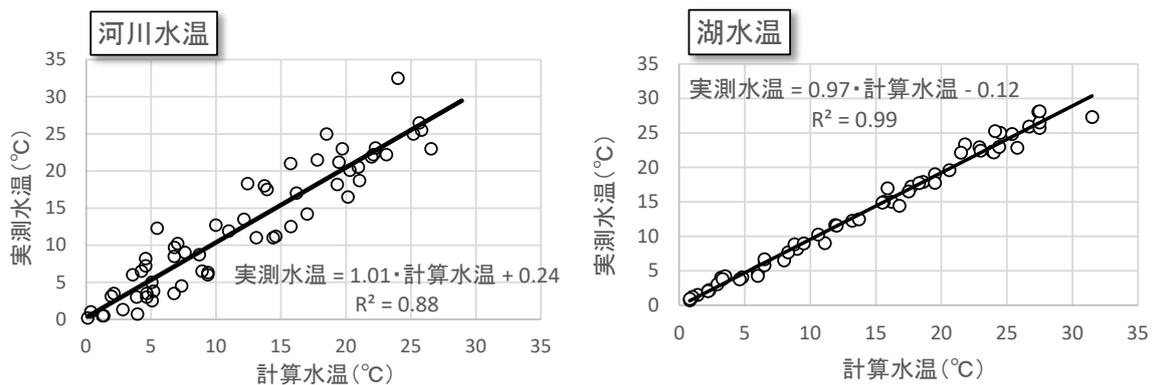


図 3.9 実測値と計算値の相関(左:河川水温、右:湖水温(表層))

## 5) 湖水質

八郎湖において着目している気候変動による影響を受ける水質現象として、植物プランクトンの変化に関連するクロロフィル a の再現性は、図 3.10 の通りであり、実測値 (●) に対して計算値 (実線) を比較すると、2009 年夏の特異的に高くなった時期を除いて、夏の増加やそのピーク濃度、および秋から冬への濃度の低下は再現できていると考えられる。

一方、2009 年 1 月など計算では珪藻類が増加するが、計算値が高く、冬の濃度は再現できていない。なお、結氷時にあたるため実測データが欠測となることが多い。

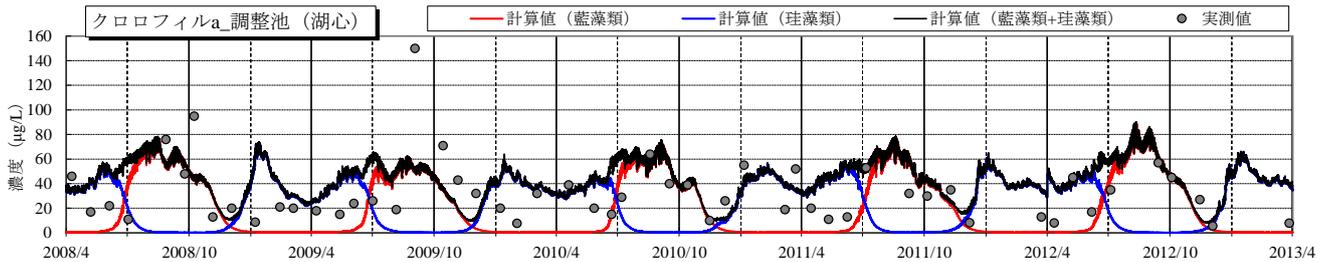


図 3.10 湖内モデル 現況再現計算結果(クロロフィル a:調整池湖心表層)

植物プランクトンの増殖に関連する窒素・リンの再現性は図 3.11 の通りである。窒素について、毎年 10 月頃から植物プランクトンの減少に伴って ON (有機態窒素) が減少し、DIN (溶存態・無機態窒素) が増加するが、この現象を再現できている。また、リンについては急激に高い観測値を除いて計算値は観測値に合っているが、DIP (溶存態りん) について大潟村干拓地からの流入負荷量の設定に課題があり、夏に計算値が大きくなる傾向が見られるが、クロロフィル a 濃度は再現できており、影響は小さいと考えられる。

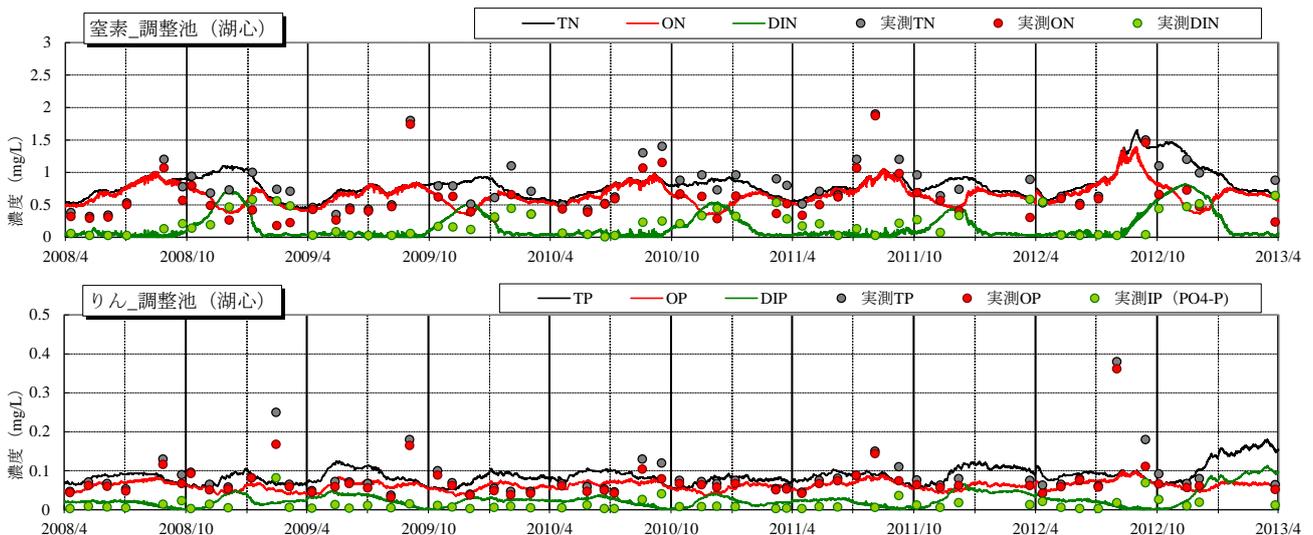


図 3.11 湖内モデル 現況再現計算結果(上:各態窒素、下:各態 P 調整池湖心表層)

SS の現況再現計算結果を示す。SS の解析では、実測 LQ 式により流入負荷量を与えている。平均的な濃度レベル (15~20mg/L) は再現しているものの、実測値の低下など合っていない時期がある。クロロフィル a も SS に関連するため、合わせて課題である。

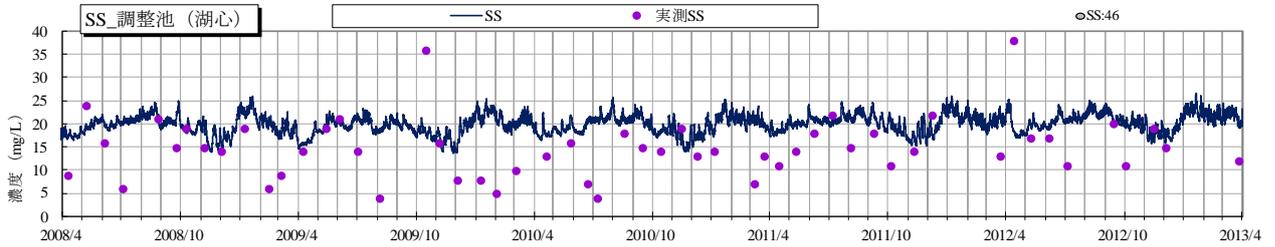


図 3.12 湖内モデル 現況再現計算結果(SS、調整池湖心表層)

ここで、クロロフィル a および窒素、りんについて、実測値と計算値の相関性を整理すると図 3.13 の通りであり、水温に比べると相関性は低く、また回帰線は 1:1 に対してずれがある。これらの水質項目は水温とは異なり、分布にばらつきが大きい。これは、観測値はポイントでの採水・分析での値であることと、計算値はメッシュ内の平均的な値であることから、完全に一致させることは難しいことがある。

しかし、図 3.10、図 3.11 で示すように、プランクトンの増殖 (内部生産) や窒素、りん濃度の季節変化の傾向は再現できていると考えられるため、本検討での予測に用いるモデルとしては問題ないが、課題があることを認識しておく必要がある。

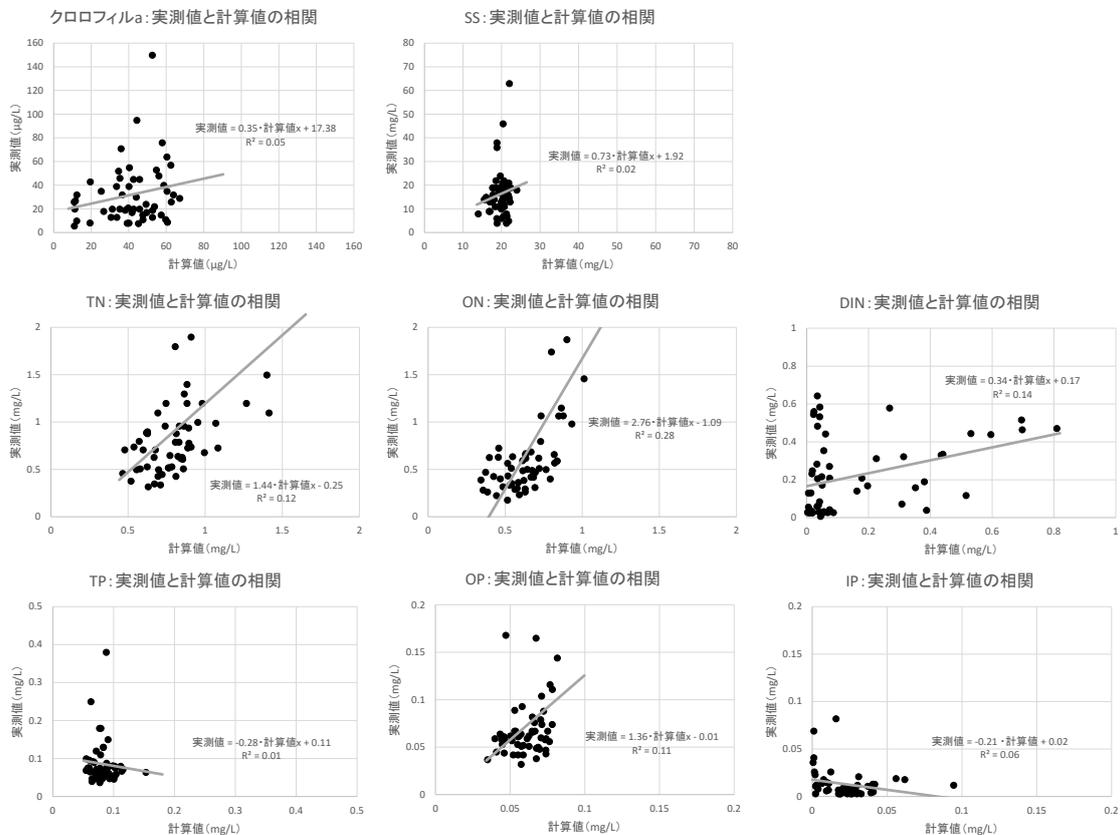


図 3.13 湖内モデル 現況再現計算結果

### 3.3 琵琶湖における水質予測モデルの構築

#### (1) 水質予測モデルの概要

琵琶湖での水質予測モデルは、琵琶湖に係る湖沼水質保全計画の策定に使用した水温・水質等の予測モデル（流域モデル・湖内モデル）を用いた。なお、ここで使用している流域の排出負荷量のデータ等の諸条件は、滋賀県より提供を受けた。

#### 1) 流域モデル

流域モデルは、図 3.14 に示すように、前述の八郎湖流域で示した流域水物質循環モデル（図 3.2）と同じモデルを用いた。流域モデルのメッシュ分割は 500m とした。

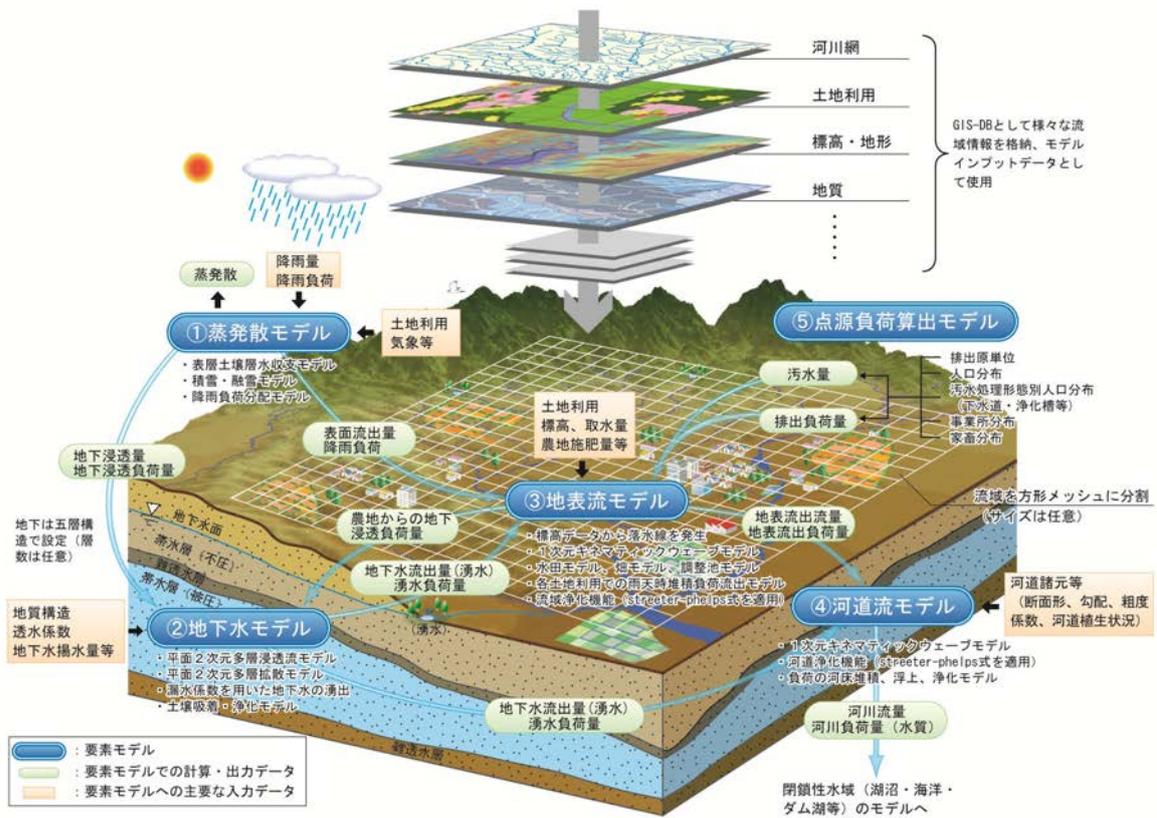


図 3.14 流域モデル(流域水物質循環モデル)の概要

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) 湖内モデル

湖内モデルは、湖内流動モデルと水質モデルで構成され、空間分割として、水平方向二次元、鉛直多層の構造とした。メッシュ分割について、水平方向は1 kmとし、鉛直方向は図3.15に示すように、深さと分割数を勘案して、水温等の水質変化の程度から表層では密に、下層では粗となるよう設定した。

湖内流動モデルはX、Y、Z方向の運動方程式、水温収支式、連続の式を元に、静水圧近似、ブシネスク近似を仮定し、陸域や地下からの流入水量を受けて、流向や流速、水温、水位等を差分法により計算する。

湖内生態系モデルは、物質の移流・拡散過程、水-底質相互作用を含む湖内の生化学反応過程を基盤とする生態系モデルである。本モデルでは水相は6つ、底質は3つのコンパートメントより構成され、陸域や底質からの負荷量や湖内流動の結果を受け、システム・ダイナミクスにより湖内の生態系や水質等を解析する。

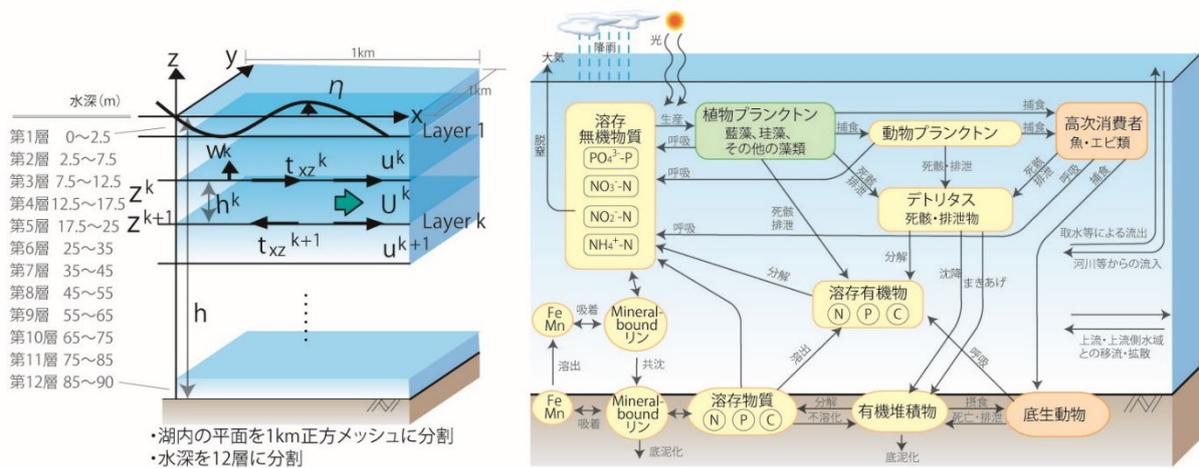


図 3.15 琵琶湖における湖内水質予測モデルの概要

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) 水質予測モデルの現況再現性

### 1) 河川流量

国土交通省による流量観測データが存在する姉川（野寺橋地点）、野洲川（野洲地点）において、流量は両地点で良好な再現性を示している。また、姉川においては、融雪期（毎年3～5月、その他時期より基底流量の増加が見られる）には、実測値と同様に計算値も増加しており、融雪による流量の増加を再現している。

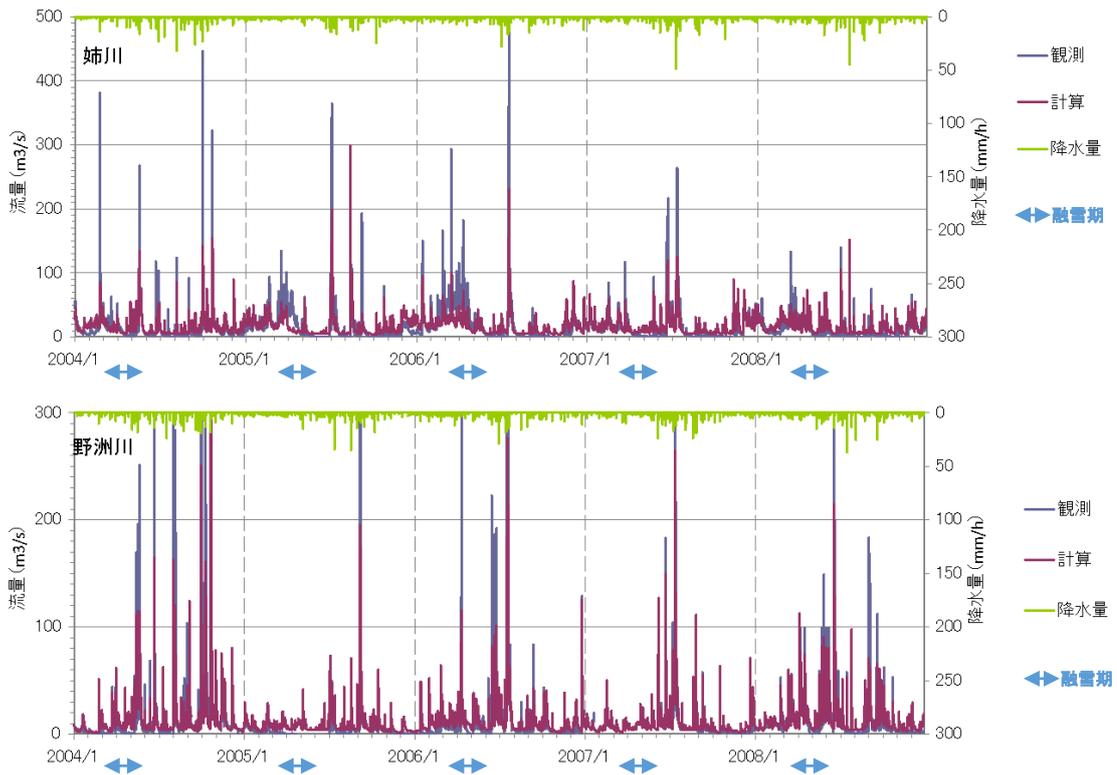


図 3.16 流域モデル 現況再現計算結果(毎時河川流量:姉川、野洲川)

月平均流量で実測値と計算値の相関を図 3.17 に示す。姉川では相関はあるものの、計算値が  $30\text{m}^3/\text{s}$  程度以下では実測値に近いが、流量が大きくなると計算値の方が小さくなる傾向にあり、特に融雪期の3～5月で差が大きくなっている。野洲川では相関性は高いが、流量が大きいとやや計算値が小さくなる傾向がある。

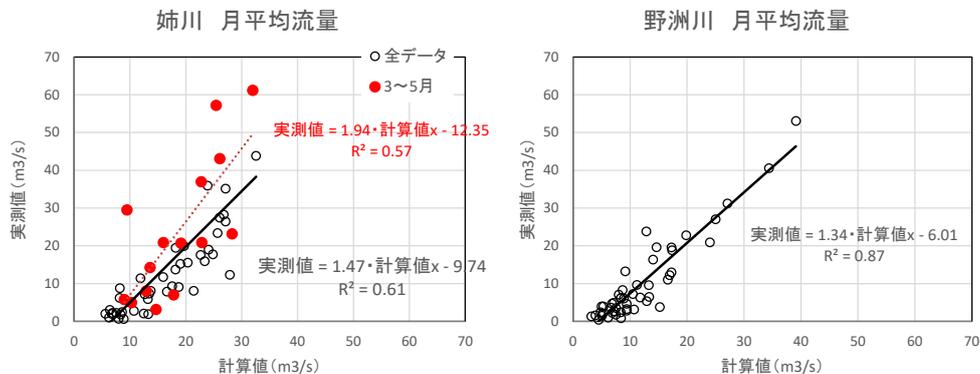


図 3.17 流域モデル 実測値と計算値の相関(月平均流量:姉川、野洲川)

また、流況の再現性を見るため、時間流量での流況曲線（毎時、5ヶ年）を比較した。姉川については  $30\text{m}^3/\text{s}$  程度で観測値と計算値が交差しており、流量が大きいところでは計算値は低く、流量が小さいところは大きくでる。なお、姉川では伏流水が多い特徴があるが、モデルでは伏流を考慮していない。野洲川も流量が小さいところで計算値が高い傾向がある。

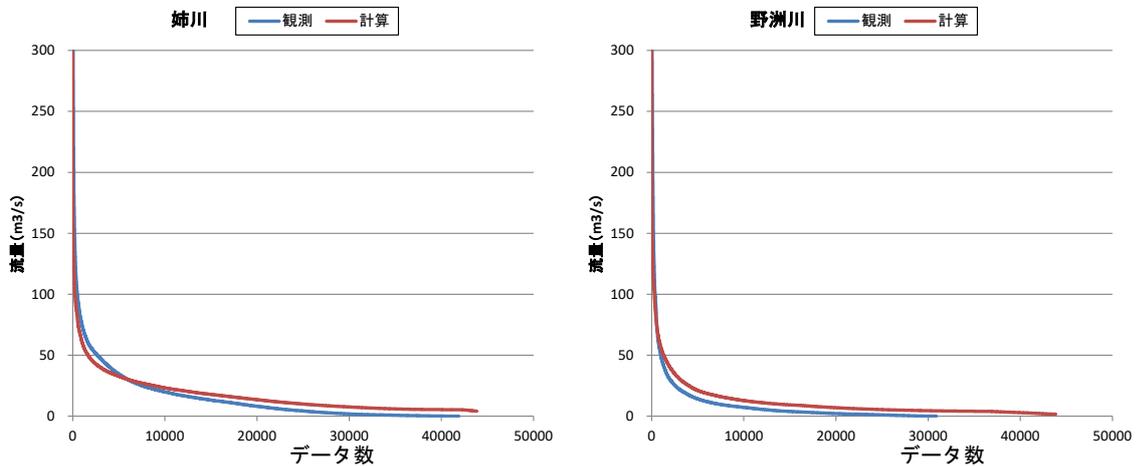


図 3.18 流域モデル 現況再現計算結果(流況曲線の比較<時間流量>:姉川、野洲川)

(5年間の時間データを整理)

## 2) 流域の水収支

モデル計算結果から整理した琵琶湖流域全体の水収支を図 3.19 に示す。

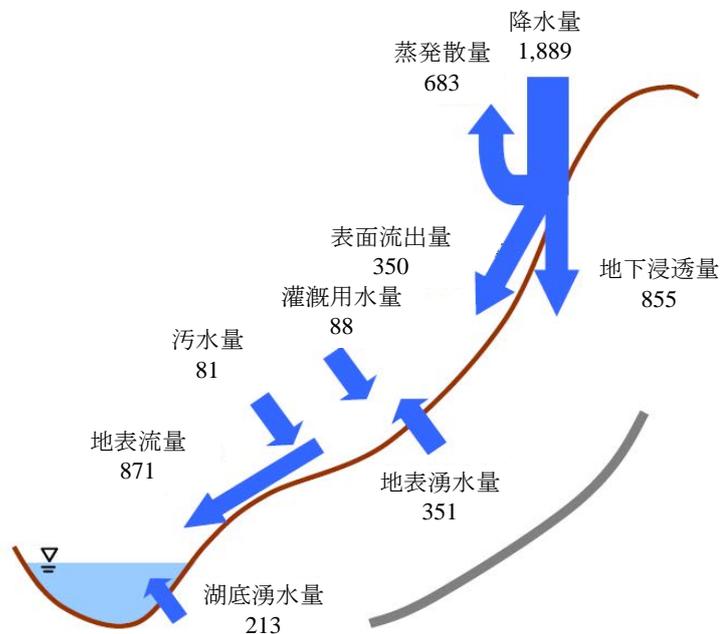


図 3.19 琵琶湖流域全体の水収支(モデル計算結果から整理、2008年、単位:mm/年)

### 3) 河川水温

姉川（野寺橋地点）において、河川水温の再現性を検証した。夏や冬の水温、水温上昇時期、低下時期の傾向は合っており、相関についても傾きがほぼ 1、切片もほぼゼロであり、再現性は高いと考えられる。

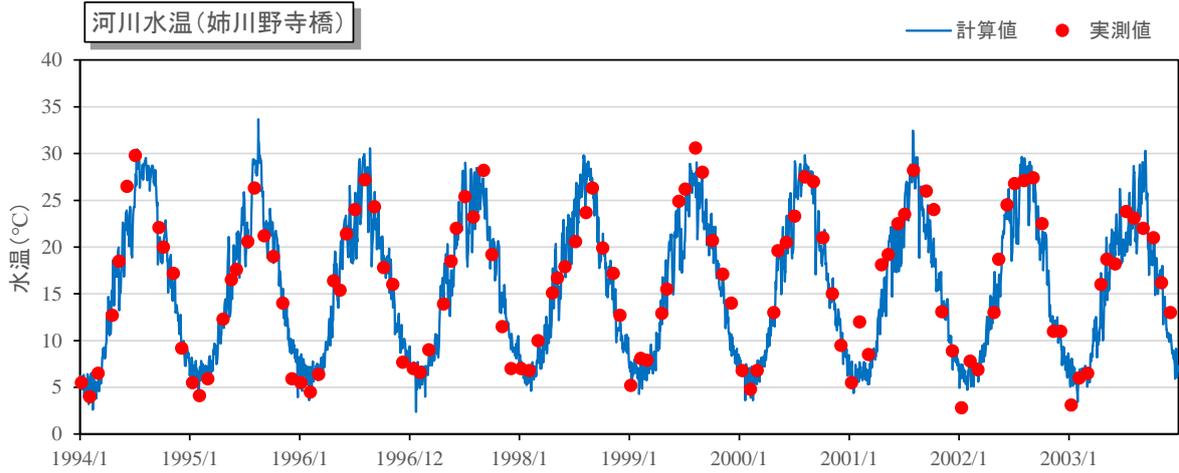


図 3.20 流域モデル 現況再現計算結果(河川水温:姉川)

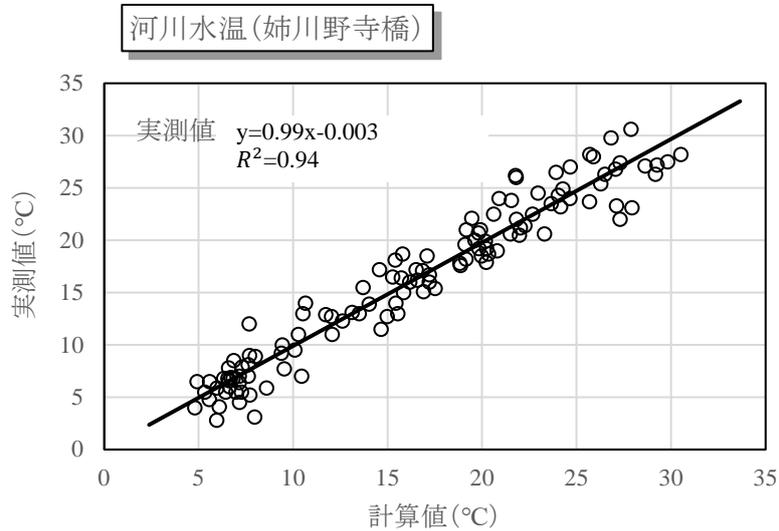


図 3.21 流域モデル 実測値と計算値の相関(河川水温:姉川)

#### 4) 湖水温・全循環

湖水温、琵琶湖において着目している現象である鉛直循環（全循環）に関する再現性について、各層別水温の再現性を図 3.22 に、循環総厚を指標とした全循環の再現性を図 3.23 に示す。図 3.22 より、中層付近での水温について観測値と計算値にややずれが見られ、再現性に課題が残るが、図 3.23 より、循環層厚が深くなり始める時期や水深 90m まで達したときの期間は再現できていると考えられる。

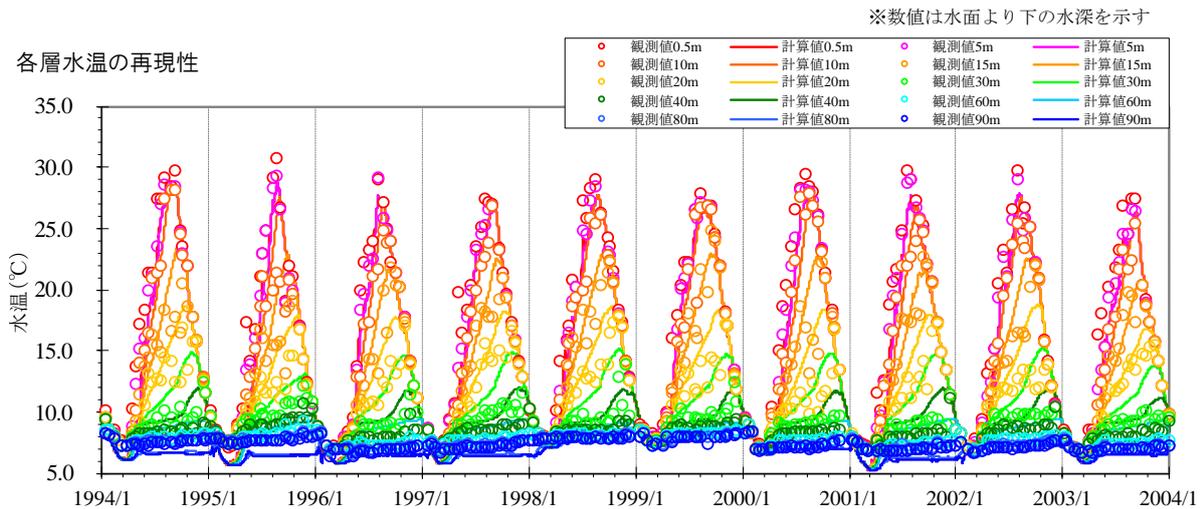


図 3.22 湖内水質モデル 現況再現計算結果(各層別水温:今津沖中央地点)

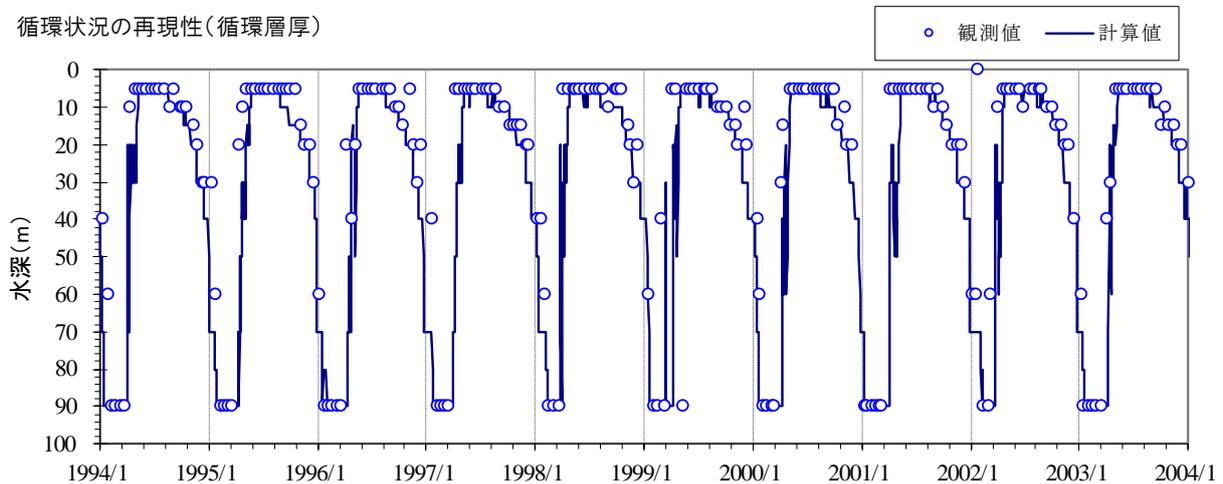


図 3.23 湖内水質モデル 現況再現計算結果(全循環の再現性:今津沖中央地点)

※循環層厚：水深 5m での密度との差が 0.03g/L 以内となる水深を循環層とした。

## 5) 湖水質

### A) DO

将来予測では、全循環が停止する可能性があるとして予測され、底層の無酸素層の発達に伴い、底層の全りん濃度が増加すると考えられることから、底層での再現性の向上は重要である。

そこで、季節的な底層 DO の変化に伴う底質の有機物分解及び地化学反応過程や、水-底質相互作用の変化により SOD 及び溶出量の変化、および長期間の底質の変化を考慮できるように底質モデルを改良した。溶存酸素の再現結果は、図 3.24 の通りである。年によって最小 DO 濃度を再現できていない年もあるが、DO の低下傾向（減少速度）や鉛直循環により DO の回復（上昇）を再現することができたと考える。

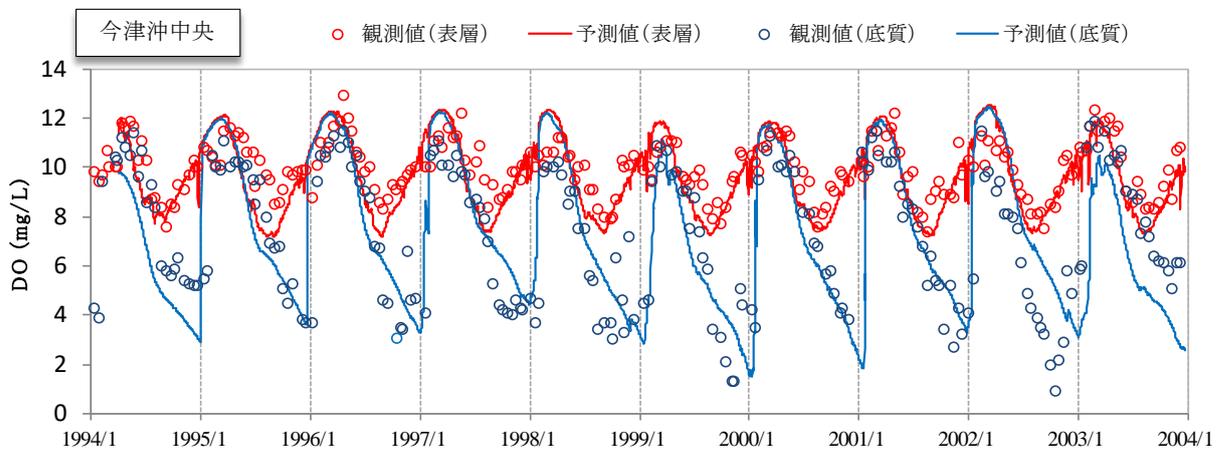


図 3.24 琵琶湖 現況再現計算結果(DO:今津沖中央)

### B) COD 等

琵琶湖北湖における COD 等の再現計算結果を図 3.25 に示す。

COD や全窒素 (T-N) について、年によって COD 表層での夏のピークや、T-N 表層での夏の低下に対してずれがあるものの、全体を通して計算値は観測値を再現していると考えられる、

全りん (T-P) について、観測値では夏に徐々に増加し、1~2 月頃に鉛直循環による表層水との混合に伴って濃度が急激に低下するが、計算値はその変化傾向と合致している。ただし、年によって、DO が再現されない年（例えば 1999 年秋~2000 年冬）で再現性が悪くなることもある。

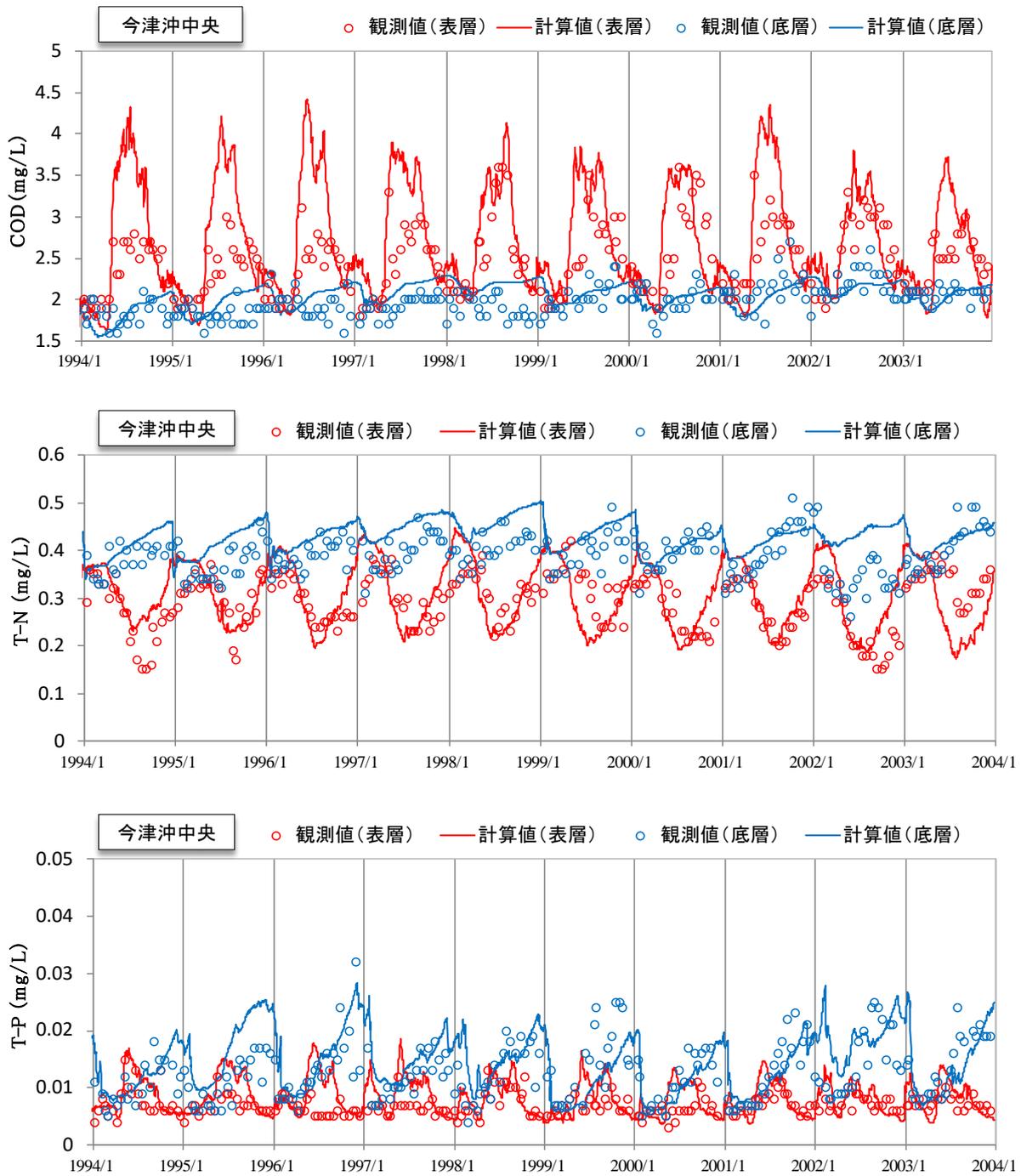


図 3.25 琵琶湖 現況再現計算結果(COD、T-N、T-P:今津沖中央)

### 3.4 池田湖における水質予測モデルの構築

#### (1) 水質予測モデル

池田湖での水質予測モデルは、流域モデル・湖内モデルでの構成とした。池田湖のモデル構築に関して、池田湖での取水量、放流量等のデータについて、鹿児島県および南薩土地改良区中央管理所より提供を受けた。

#### 1) 流域モデル

流域モデルは、図 3.26 に示すように、前述の八郎湖流域で示した流域水物質循環モデル（図 3.2）と同じモデルを用いた。メッシュ分割は流域の広さ、及び湖内モデルのメッシュ分割サイズから、正方メッシュのサイズを 100m として設定した。なお、流入流量・水質の実測値がないため、検証は行っていない。

なお、池田湖は湖面積（約 10.95km<sup>2</sup>）に対して、流域面積（直接流入域）が約 12.34km<sup>2</sup>と、湖面積に対する流域面積が小さく（ほぼ、1 : 1）、流域・河川等からの流入量の影響が他湖沼と比べて小さいという特徴を持っている。（参考 八郎湖 1 : 19、琵琶湖 1 : 5）

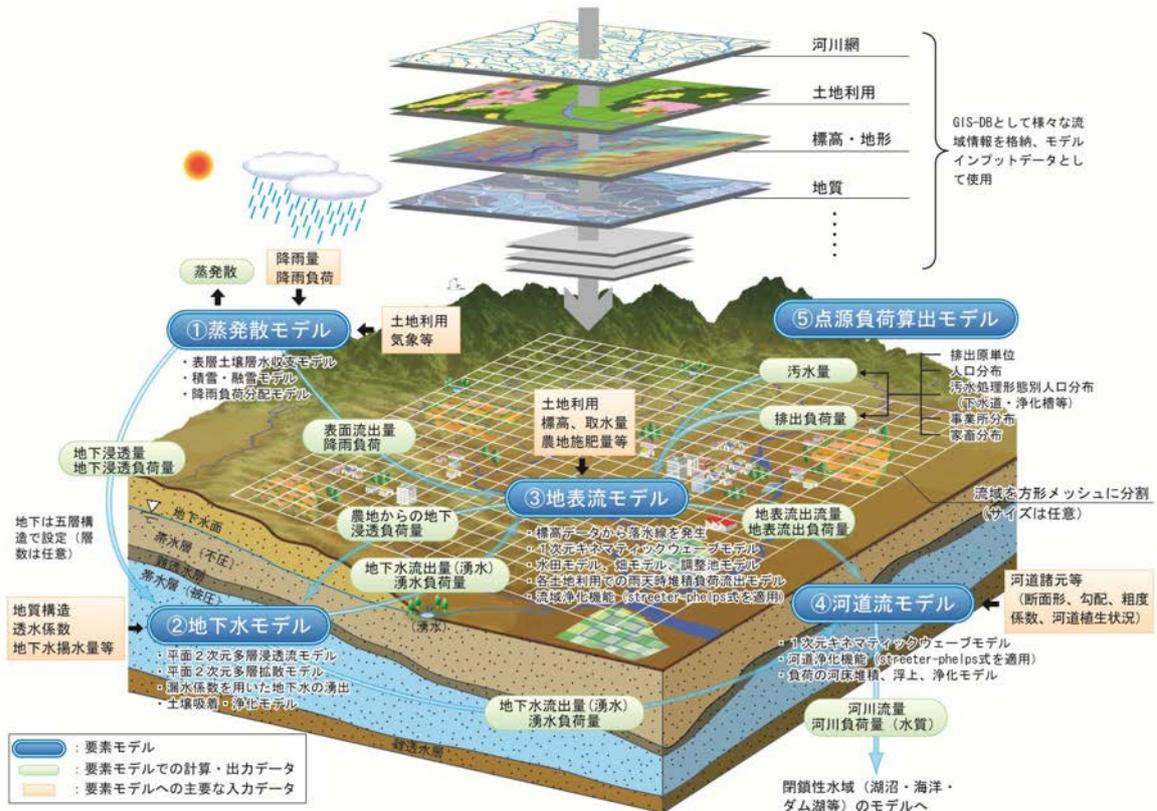


図 3.26 流域モデル(流域水物質循環モデル)の概要

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) 湖内モデル

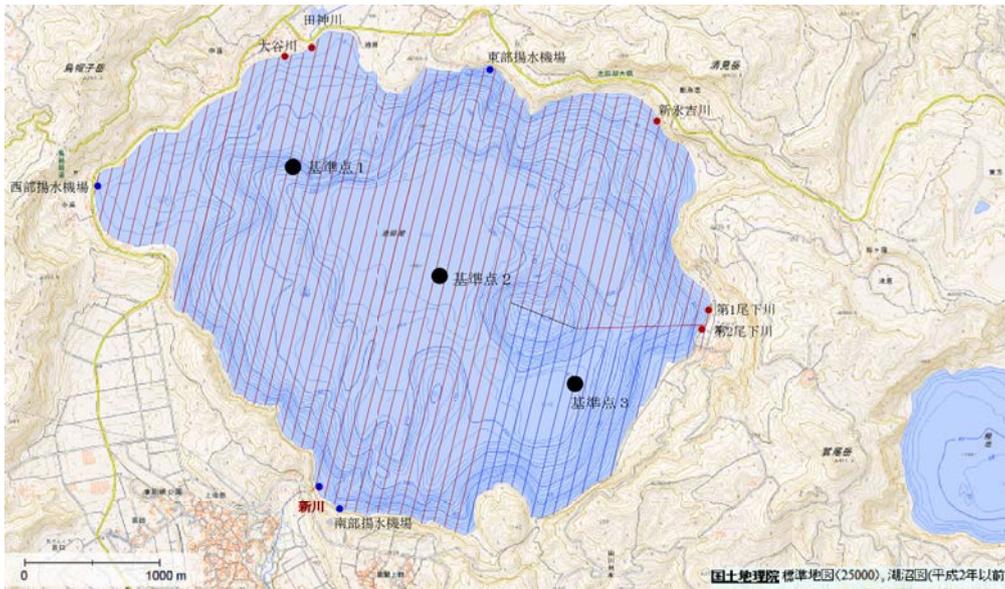
池田湖は水深が深く、沈降及び底質からの溶出過程が重要であり、かつ水温及び水質の鉛直分布の時系列的な変化が大きいことから、流動モデルとして、長期に鉛直方向の流動を再現できる「二次元乱流平均場モデル」を使用した。基礎式は、連続式、運動方程式、自由表面式、熱収支式、状態方程式で構成している。

メッシュ分割について、水平方向のメッシュは、図 3.27 に示すように、水質の水平分布はほとんどないとして、長軸方向（西部揚水機場～第2尾下川を通る東西方向）に 100m 等間隔で分割した。ただし、湖東部での水深が浅くなっているエリアではその形状が水平流動に影響を及ぼすことが考えられるため、短軸方向で2つに区分（水深が浅くなっているところを境に南北で区分）することで湖東部の流動を再現することとした。

鉛直層区分は、図 3.28 に示すように、表層から 1 次躍層まで 2m（第 1 区分：0～40m）、1 次躍層から嫌気・好気交換の発達層上限まで 5m（第 2 区分：40～150m）、それ以下から湖底までは 2.5m 間隔（第 3 区分 150m～湖底）の 75 層に分割することにより鉛直分布を再現することとした。

湖内の生態系モデルは、図 3.29 に示すように、水相では琵琶湖での生態系モデルと同様に、湖内生物の増殖、死滅、沈降、植物プランクトンの取り込みによる無機態栄養塩の有機化、あるいは分解による無機化等の過程を組み入れた生化学的プロセスを考慮した。

また、池田湖では、無循環期の底層では嫌気層が発達し、全りん濃度が上昇した。この現象を再現するため、底質の酸素要求量を計算できるように有機物分解過程及び地化学過程をモデル化した水-底質相互作用を考慮した。



黒丸：基準点、図中の赤丸：流域から流入地点，青丸：流出地点

図 3.27 池田湖における湖内モデルでのメッシュ分割(図中の赤線)

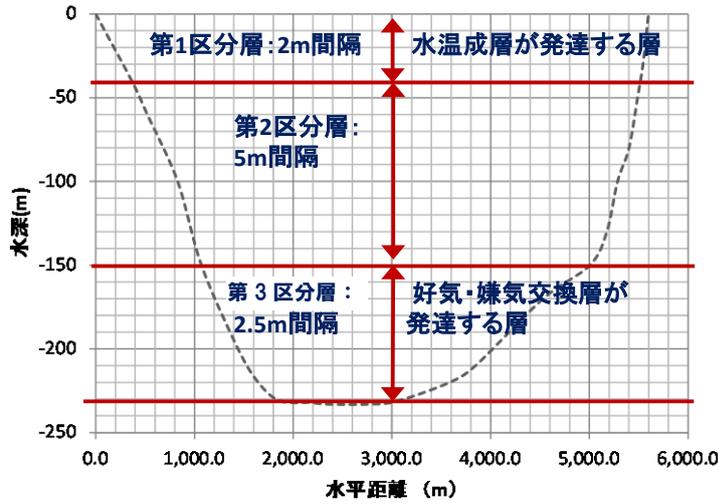
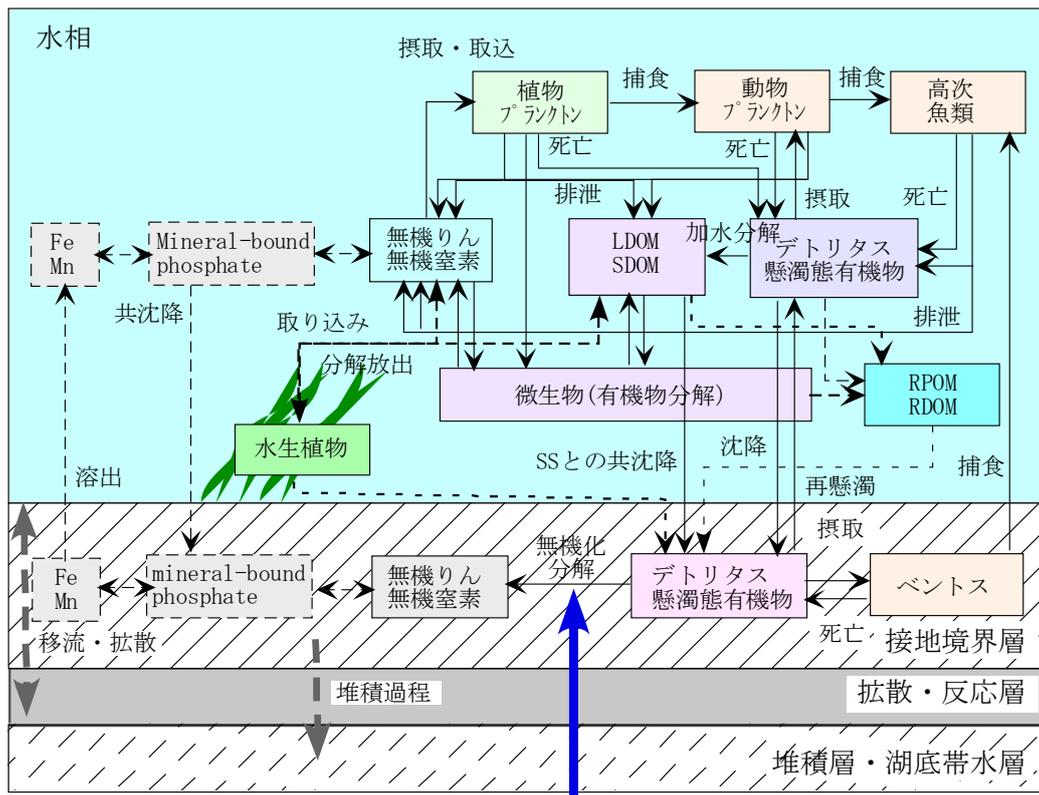


図 3.28 池田湖における湖内モデルでのメッシュ分割



※Mineral-bound phosphate：リン酸塩鉱物、LDOM：易分解性溶存態有機物、SDOM：準易分解性溶存態有機物（易分解性と難分解性の中間体の物質）、RPOM：難分解性懸濁態有機物、RDOM：難分解性溶存態有機物

図 3.29 池田湖における生態系モデル

(有機物分解モデルを考慮した底質モデルによる水-底質相互作用モデルを組み込み)

出典：Modeling of P-Dynamics and Algal Growth in a Stratified Reservoir -Mechanisms of P-Cycle in Water and Interaction between Overlying Water and Sediment Ecological Modelling Volume 197, Issues 3-4, 25 August 2006, Pages 331-349

## (2) 水質予測モデルの現況再現

### 1) 流域水収支

流域モデルの解析結果により得られた流量を用いて、池田湖流域の年間水収支を整理し、以下に示す。ただし、課題として、池田湖では流入河川の流量等の観測がされていないため、実測データがなく、湖流入量等の検証は十分にできていない。ただし、池田湖の流域面積は、12.34km<sup>2</sup>であり、湖面積 10.95km<sup>2</sup>とほぼ同程度である。このため、図 3.30 流域からの湖への流入量 1,850mm/年に対して、湖面への直接降水量は 2,590mm/年となり、湖面への降水量の方が大きいという特徴がある。

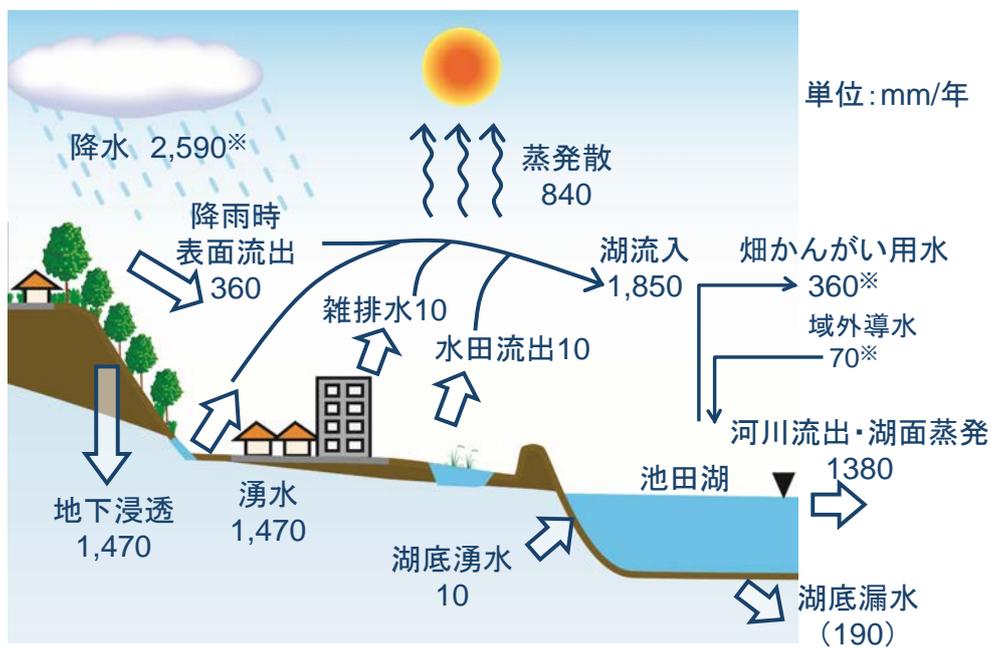


図 3.30 池田湖・流域水収支(モデル計算結果)

※は入力条件、カッコは差し引きにより算出

## 2) 湖水温・全循環

湖水温の再現計算結果を図 3.31 に示す。再現は、全循環が生じた 2011 年及び 2012 年を含めた期間で行った。表層での水温の季節変化については、観測値と予測値はよく合っていると考えられる。

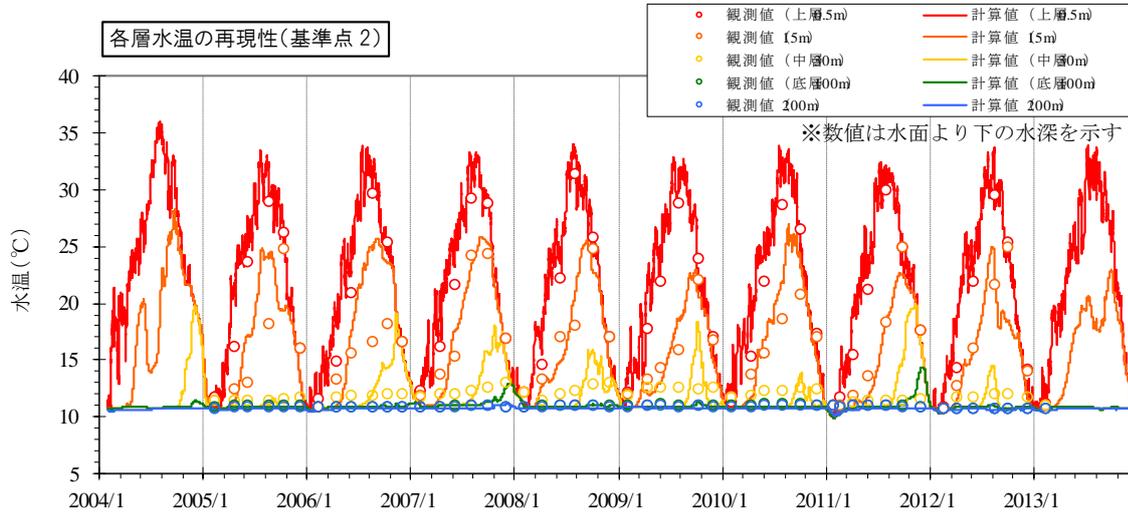


図 3.31 池田湖 現況再現計算結果(水温鉛直分布、基準点 2)

次に、全循環の再現性を確認するため、表層と最下層の水温について、予測値と観測値の比較 (図 3.32) を示す。

水温の観測値と予測値は重なっており、再現性は得られていると考えられる。また、予測値から、全循環となるのは毎年 1 月～2 月頃である。ただし、水温の観測値は 1 回/2 ヶ月の頻度であるため、2 ヶ月より短い期間での水質変化現象については検証できていない。

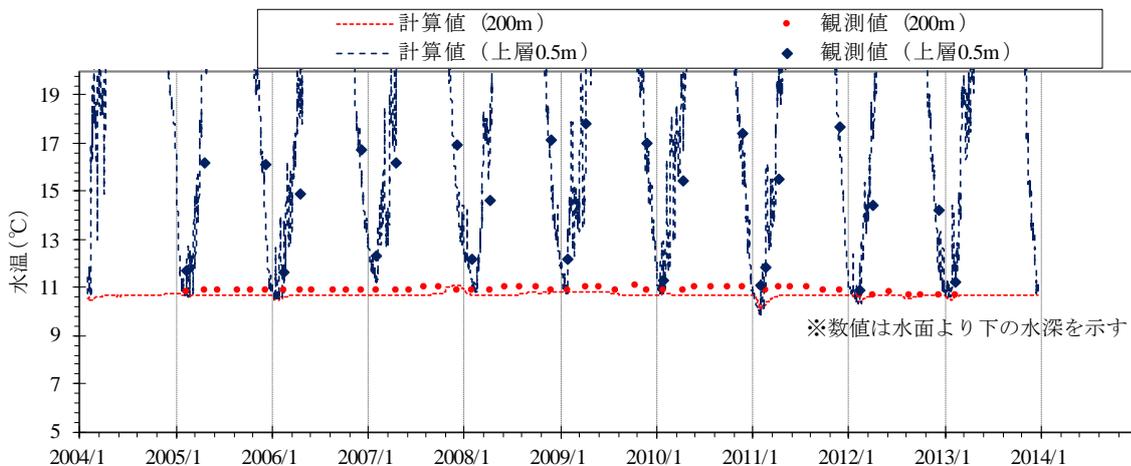


図 3.32 池田湖 現況再現計算結果(表層(0.5m)と最下層(200m)の水温、基準点 2)

そこで、データピッチが粗である水温観測値では全循環の様子が見えにくいことから、DO 濃度の観測値と予測値を用いて、全循環の有無の再現性を確認する。

実測値から、2011 年と 2012 年の冬には、底層 DO 濃度も上昇しており（図 3.33 の上）、全循環が生じていると推定される。この時、予測値から算出した「循環率※」という指標で見ると、循環率は 100%となっており（図 3.33 の下）、予測でも全循環が生じている。

一方、2007～2010 年では底層 DO は上昇していないため、全循環は生じていなかったと考えられるが、この時の予測値での循環率も 100%に達していない。このため、全循環を再現できていると考える。

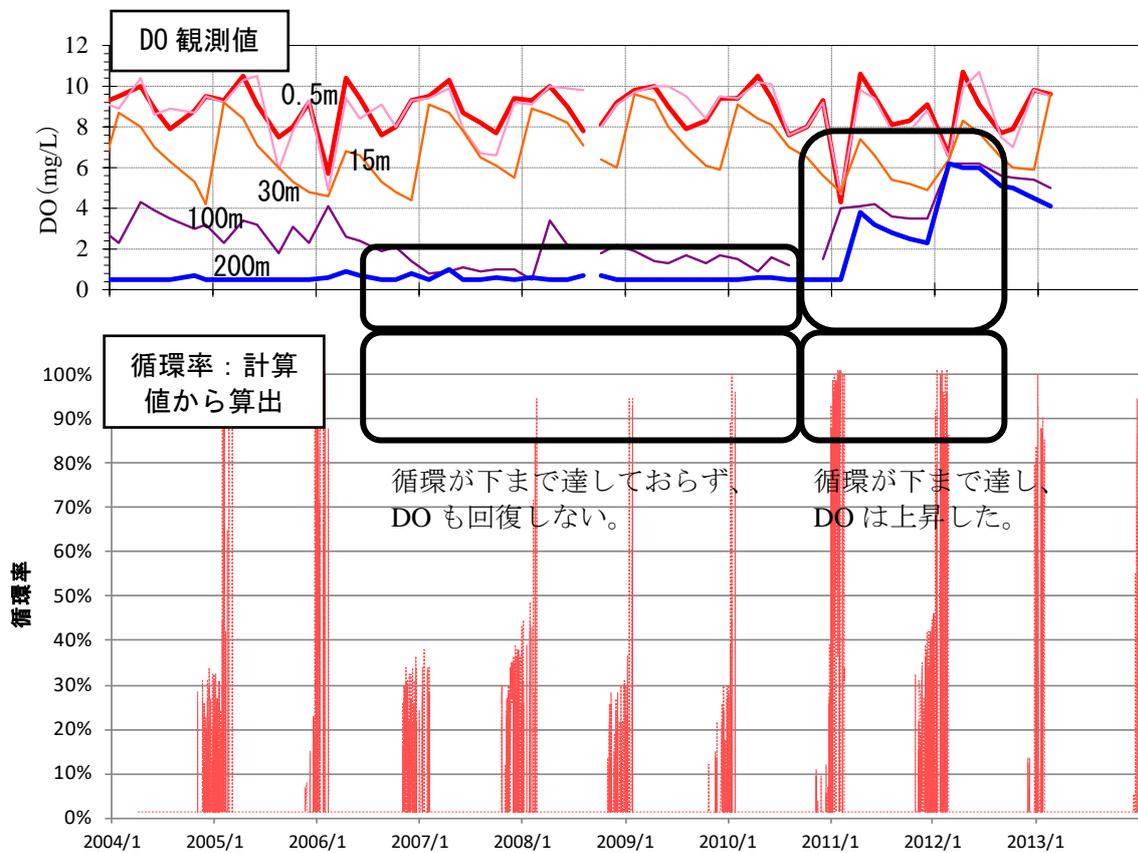


図 3.33 池田湖 冬季全循環の再現性の確認

※循環率：表層水温と比較して水深方向に同じ水温である深さと全水深との割合を示す。

100%であれば表層と最下層での水温が同じになっている状態（全循環）である。

### 3) 湖水質

#### A) DO

池田湖の湖心での観測地点である基準点 2 における、表層と底層での DO の現況再現計算結果を図 3.34 に示す。

表層ではほとんどの期間で季節変化を再現できている。2011 年 1 月に全循環が生じた際に観測値で表層 DO が一時的に低下しているが、予測値も低下する傾向は再現している。

底層では、2004～2010 年に継続して低い濃度であり、予測値はその傾向を再現している。また、2011 年と 2012 年での全循環に伴う DO 上昇とその後の低減傾向について、予測値と観測値はほぼ一致しており、再現できていると考えられる。

よって、池田湖において重要現象である全循環、およびそれに伴う DO 濃度の上昇と低減の再現性は良いと考える。

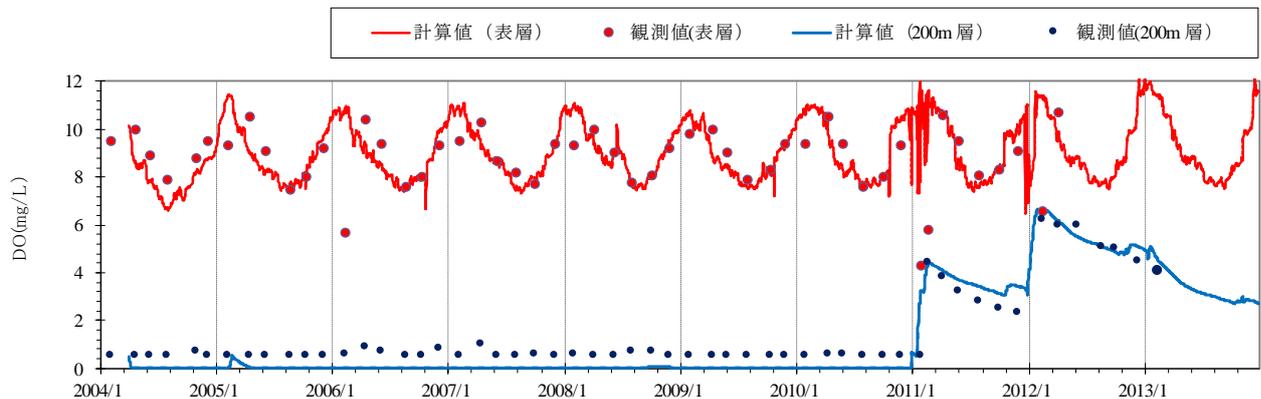


図 3.34 池田湖 現況再現計算結果(表層と底層:200m の DO、基準点 2)

## B) COD 等

基準点 2 における表層と底層での現況再現計算結果を図 3.35 に示す。

COD について、表層、底層ともに長期的には計算値は観測値と同程度の濃度での推移となっている。表層で 2008 年の夏に計算値が高くなっているが、これは気象等の影響によるものと考えられる。

全窒素 (T-N) について、表層では COD と同様に計算値が高くなっているが、長期的には観測値と同程度のレベルでの推移となっている。底層では貧酸素状態が続いた 2004～2005 年に観測値は濃度が高い状態であるが、計算値はそれを再現できていると考えられる、また、長期的にも計算値と観測値は概ね同程度の濃度となっている。

全りん (T-P) について、表層では計算値は観測値とほぼ同程度の濃度であり再現できていると考えられる。底層では、T-N と同様に、T-P 濃度が高い状態が続くが、計算値ではやや変動を伴う。また、2006 年と全循環時の 2011 年の低下、および 2008 年からの T-P 濃度の上昇傾向は再現できている。

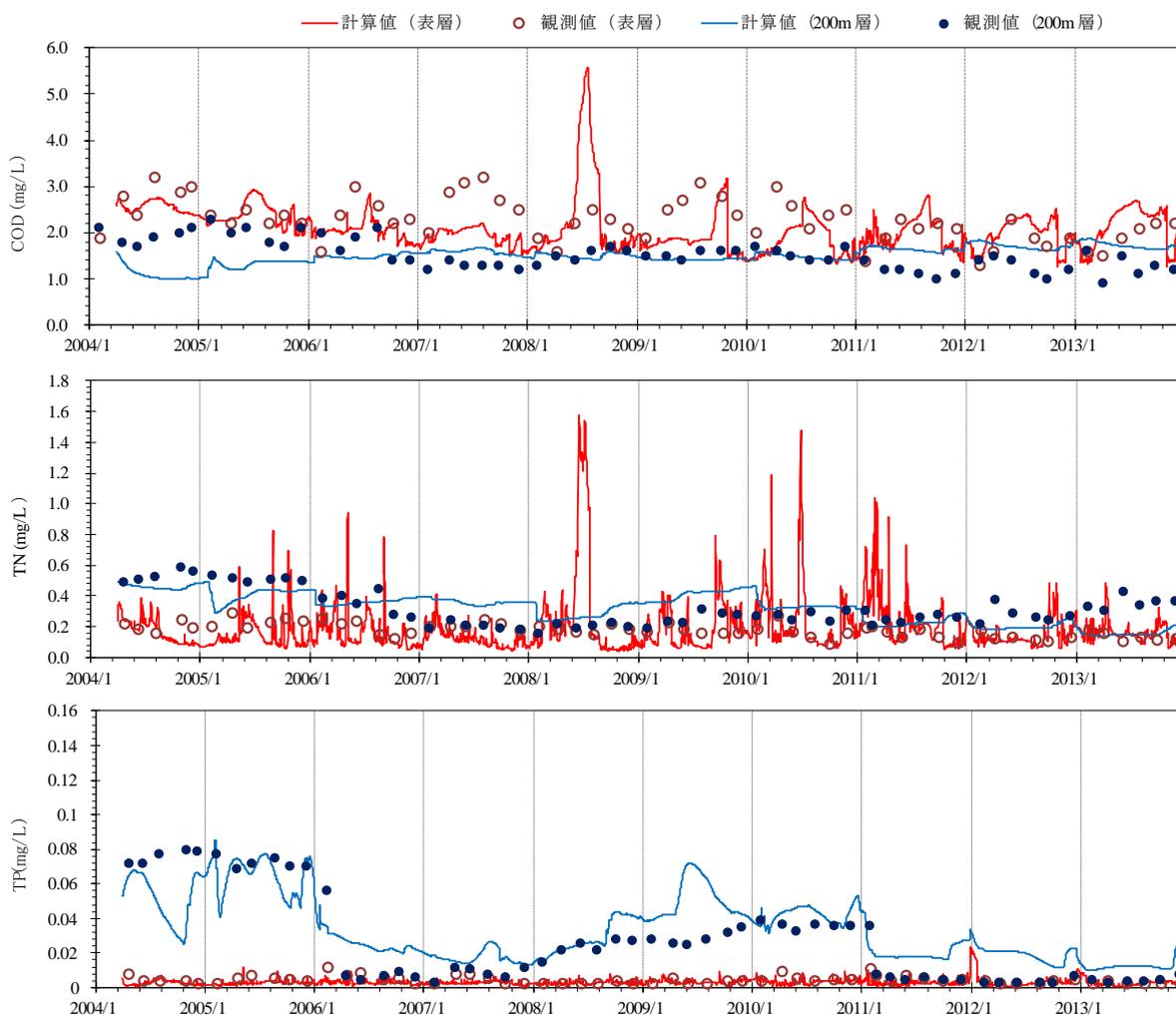


図 3.35 池田湖 現況再現計算結果(表層と底層:200m:基準点 2)

### 3.5 水質予測モデル構築のための資料・データの収集

流域、湖沼でのモデルを構築するためには、多くのデータが必要となる。表 3.1 に、収集するデータ・資料の例を示す。これらは採用するモデルによって異なる、また、国土地理院で公表されているデータ等は、随時最新データが公表される。モデル構築時点の最新情報を収集して、モデル構築を行うことが必要である。

表 3.1 水質予測モデル構築に必要な収集データ・資料の例

区分	中項目	小項目	No.	内容	時間 ピッチ	作成者の例	資料の例	
モデル構築用 (入力データ作成)	流域界	流域界	1	水系流域界、支川流域界	—	国土地理院、河川管理者	流域図	
			2	県・市町村界	—	国土地理院	国土数値情報「行政区画」	
	地形・地質	土地利用	3	土地利用区分	—	国土地理院	国土数値情報「土地利用細分メッシュ」	
		標高	4	標高データ	—	国土地理院	基礎地図情報「10mメッシュ(標高)」	
		水域	5	河川、水域ラインデータ	—	国土地理院	国土数値情報「河川」「湖沼」	
		表層地質	6	表層地質図	—	国土地理院	20万分の1土地分類基本調査「表層地質図」	
		土壌	7	土壌分類図	—	国土地理院	20万分の1土地分類基本調査「土壌図」	
		湖地形・水深	8	地形図・深淺図	—	河川管理者	深淺測量図	
		湖水位－容量	9	湖水位－容量曲線(HV)	—	河川管理者	深淺測量図	
	気象	降水量、気温、日射量等	10	気象観測データ	時間	気象庁、自治体	アメダスデータ	
	人口	人口	11	人口	—	自治体	国勢調査(市町村別、字・町丁目別)	
	生活排水処理	汚水処理形態別人口	12	汚水処理形態別人口：下水道接続、農集排、合併処理浄化槽、単独処理浄化槽、し尿処理場利用等	—	自治体	市町村別、字・町丁目別の各人口	
		農業集落排水	13	各処理施設の位置、排水量、排水水質	—	自治体	排水量・排水水質データ	
		し尿処理場	14	し尿処理場位置、排水量、排水水質	—	自治体	排水量・排水水質データ	
		生活排水処理整備区域	15	生活排水処理区域図	—	自治体	汚水処理構想	
		下水処理場	16	下水処理場放流量、放流水質	日	自治体	放流量・放流水質データ	
	利水等	排出負荷原単位	17	排出負荷原単位(COD、T-N、T-P等)	—	自治体	生活系発生源別の排出負荷原単位	
		取水	18	取水(湖沼)	日	自治体、河川管理者	湖からの取水(上水、工水、農水、発電等)	
			19	取水(河川)	日	自治体、河川管理者	河川取水(上水、工水、農水、発電等：許可)	
			20	取水(地下水)	日	自治体、水利用者	地下水取水データ(上水、工水、農水等)	
			21	水利権	—	河川管理者	水利権一覧表(許可・慣行水利権)	
		排水量、水質	22	排水機場等からの湖沼への排水量、排水水質	時間	自治体、河川管理者	管理日報(排水機場排水量等)	
		導水量、水質	23	導水量、水質	日	自治体、河川管理者	管理日報(浄化用水等)	
		放流量	24	湖沼からの放流量	時間	自治体、河川管理者	管理日報(水門放流量等)	
		農業	栽培時期	25	栽培時期(水稲、畑作)	—	自治体	農業カレンダー(水稲、畑作)
			施肥量	26	施肥基準(水稲、畑作)	—	自治体	稲作指導指針、野菜栽培技術指針等
	畜産	畜産頭数	27	畜産頭数	—	自治体	農家別家畜飼養頭数	
		畜産排出負荷原単位	28	畜産排出負荷原単位	—	自治体	畜産排出負荷原単位(牛、豚、鶏等)	
	工業	事業所排水	29	事業所位置、事業所ごと排水量、排水負荷量	—	自治体	特定事業場等の届出排水量・排水水質	
	漁業	漁獲量	30	漁獲量(魚種ごと)	毎月等	自治体、漁協等	魚種別漁獲量実績データ	
	河道	河道諸元	31	河床標高、河川幅	—	河川管理者等	河川縦断面・横断面図	
		流出調整	調整池	32	調整池位置、諸元(面積、高さ、貯留量、放流方式)	—	河川管理者等	管理台帳
			ため池	33	ため池位置、諸元(面積、高さ、貯留量、放流方式)	—	自治体、土地改良区等	ため池台帳
	ダム	34	ダム位置、諸元(面積、高さ、貯留量、放流方式)	—	河川管理者等	ダム概要資料、ダム諸量		
	底泥	底質・堆積	35	湖内底泥の含有量、溶出速度データ	—	河川管理者等	底質調査結果・底泥堆積厚調査結果	
	生物	水生植物	36	水生植物分布	—	河川管理者等	植生調査報告書	
		対策	水質保全対策	37	浄化施設や流動化施設等、水質保全に関する資料	—	自治体、河川管理者	水質保全施設に関する計画書、効果検討報告書
	38		水質保全対策以外の対策に関する資料(農業、漁業、林業、生物、観光等)	—	企業、研究機関、行政等	各種報告書等		
	モデル検証用	水位	湖水位	39	湖水位	時間	河川管理者	湖水位観測データ
		流量	河川流量	40	流入河川流量	時間	河川管理者	河川流量観測データ(河川水位、HQ式)
			河川水質	41	定期調査	毎月等	河川管理者	水質調査結果
		水質		42	出水時調査	全データ	河川管理者	水質調査結果
			湖水质	43	定期調査	毎月等	河川管理者	水質調査結果
		44	雨水の水質	全データ	自治体、研究機関等	水質調査結果		
	その他参考資料	水質汚濁メカニズム	45	湖沼の水質汚濁メカニズム	—	自治体、研究機関等	検討業務報告書、論文等	
		水質予測モデル構築	46	水質予測モデル構築	—	自治体、河川管理者	検討業務報告書、論文等	
		水質保全に関する計画	47	水質保全計画書	—	自治体、河川管理者	計画書等	
		水産資源・観光資源	48	水産・観光に関する計画書	—	自治体等	計画書等	

### 3.6 水質予測モデルの課題

前節までに示した通り、各モデル湖沼に構築した水質予測モデルの現況再現性を確認したが、各モデル湖沼の水質予測モデルは、流域での流出、湖での水質変化の現象を全て再現できているわけではなく、課題がある。しかし、その課題は現時点ですぐに解決することは難しいことから、これらの課題を認識しつつ、将来予測に用いることとした。

表 3.2 に、本調査で用いる水質予測モデルの再現性についての課題を整理した。

表 3.2 水質予測モデル再現性の課題と対応

対象	項目	No.	再現性の課題
共通	流域（流入河川）	1	流域の各土地利用からの降雨時の流出現象の検証について十分に大きい流量での検証が必要である。
	湖内流動・水温	2	底層水温の再現に対して、湖底の泥温影響が考慮と検証が必要である（特には、水深の大きい琵琶湖や池田湖）。
	湖内水質	3	濁水（SS）変化を見る場合には SS による日射量低減に伴う植物プランクトン増殖への影響の考慮と検証が必要である。 沖合での水域の代表地点で再現性を検証しており、入り江や湾など、人が湖岸から見えるような箇所での再現性の検証が必要である。
八郎湖	流域（流入河川）	4	2 河川、2 降雨での降雨時データで検証を行っているが、大規模出水や融雪出水での検証が必要である。
	湖内流動・水温	5	冬季の結氷は考慮していないため、結氷時の冬季の流動や水温の更なる精度向上にはモデル改良、及び検証が必要である。
	湖内水質	6	観測データが得られない結氷時の水質や、夏～秋季に特に植物プランクトンが多くなる時期での再現性の検証が必要である。
琵琶湖	流域（流入河川）	7	融雪や降雨による出水時の水質データが一部河川しかないため、他河川の再現性の検証が必要である。
	湖内流動・水温	8	中層付近での水温の再現性に課題があるが、全循環の再現性は確認しており、今回の予測に大きな影響はないと考える。
	湖内水質	9	魚類や水生植物等による影響を考慮できるモデルとはなっていない。
池田湖	流域	10	流域からの流入水の流量・水質の観測はされておらず、再現性の検証が必要である。（流域面積が小さいため湖水質への影響は小さいと考える。）
	湖内流動・水温	11	2 ヶ月に 1 回の水温等のデータでの検証であるため、全循環の時期等の再現性の検証が必要である。
	湖内水質	12	上記と同様に、2 ヶ月に 1 回の水質データでの検証であり、その間に生じる植物プランクトンの増加等の水質変化の検証が必要である。

## 4. 将来予測における将来気象条件の設定

---

### 4.1 将来気象条件の設定の考え方

将来予測を行うにあたっては、将来の気象条件の設定が必要であり、気候モデルによる将来気象予測データを用いる。ここで、将来気象予測データを用いた将来予測では、不確実性を考慮することが重要である。例えば、21世紀末の気温を予測する際、その結果として、「20世紀末と比べて、2.6℃～4.8℃上昇する」のような、幅を持った表現が一般的になされている。幅を持つということは、気温の予測が不確実性を持っているということを意味する。

このことを踏まえ、本調査においては、気候モデルの将来気象予測データを用いるにあたって不確実性を考慮するため、以降の考え方により設定することとした。

#### (1) 不確実性の考慮

将来予測気象データの不確実性を考慮するためには、複数の気候モデル、複数の排出シナリオを選定する必要がある。排出シナリオとしては、本調査の検討実施時点で広く活用されていた RCP シナリオを対象とした。

気候モデルの不確実性：気候モデル（気象を解析するためのシミュレーションモデル）は各国、研究機関から様々なモデルが出されている。同じ入力条件を用いても、気候モデルによって、出力される将来気象は異なる。例えば、気温が高くなる傾向のモデルや降水量が多くなるなどの特徴を持っている場合がある。このため、1つの気候モデルだとその特徴によって将来の気象条件に偏りが生じ、それを水質予測に用いると、偏った予測結果になってしまう可能性がある。そのため、複数の気候モデルを用いることで偏りをなくし、変動の幅を考慮することができるようになる。

排出シナリオの不確実性：排出シナリオ（RCP シナリオ）には、将来の温室効果ガスの削減量の大きい方から、RCP2.6、4.5、6.0、8.5 の4つのケースがある。同じ気候モデルでも排出シナリオが異なれば将来気象は異なる。RCP2.6では最も気温上昇が抑制され、RCP8.5であれば最も気温が上昇する。今後どのような温室効果ガスの削減を取るかは不明確であり、気温上昇量に幅があることから、複数の排出シナリオを用いることで、その幅を考慮することができるようになる。

また、本調査では、排出シナリオである4つのRCPについて、RCP4.5と6.0については、その予測結果は最も気温上昇するRCP8.5と最も気温上昇を抑制するRCP2.6の間に入ると考え、排出シナリオとして、RCP8.5とRCP2.6を採用することとした。

なお、この2ケースは、令和2年12月に公表された「気候変動影響評価報告書（環境省地球局）」においても影響評価で使用されているケースである。

## (2) 水質予測モデルへの入力データとして必要な精度

将来予測を行うために、各モデル湖沼で構築している水質予測モデルは、流域・湖沼での複雑な流出減少、水質変化現象を再現し、かつ将来の気象変化（時空間的データ）を入力することを考慮して、分布型の流域モデルと湖内モデルを組み合わせている。

本調査で選定したモデル湖沼・流域の空間スケールは数km～数十kmの規模であることから、水質予測モデルでは、この規模よりも小さいサイズのメッシュにより空間分割を行っている。このメッシュに気象条件を入力するためには、空間的になるべく解像度の高い（メッシュサイズの小さい）気候モデルのデータを用いる必要がある。また、降雨による出水に伴う流域において面源等からの負荷流出も解析するため、降雨量データはなるべく短い時間解像度のデータが必要である。

したがって、水質予測モデルを用いた将来水質予測を行うための将来気候予測データには、次の精度が必要であった。

- ・ 時間スケールとして、時間ピッチでの気象データ
- ・ 空間スケールとして、湖沼の流域規模（数十～数千km<sup>2</sup>）に対して、気候モデルでのメッシュが複数含まれる（例えば、数km～数十km程度のメッシュサイズ）

以上の考え方を踏まえ、将来予測に用いる気候モデルの選定を行った。

## 4.2 将来予測に用いる気候モデルの選定

### 4.2.1 将来予測ケース設定のための気候モデルデータセットの情報収集

複数の気候モデルデータセットを選定するために、検討当時に公表されている気候モデルデータセットの情報を収集し、様々な気候モデルとそのデータセットの概要、仕様等を整理した。

### 4.2.2 気候モデルの選定

整理した気候モデルのデータセットから、不確実性を考慮するため、複数の気候モデル、複数の排出シナリオとすることともに、水質予測モデルの入力データとして必要な時間・空間解像度を考慮して、4つの気候モデルデータセットを選定し、表 4.1 に示す気候モデル、データセットを用いることとした。

図 4.1～図 4.3 に、選定した4つの気候モデルにおけるメッシュと、モデル湖沼の流域の重ね合わせ図を示す。モデル湖沼の流域規模、および気候モデルのメッシュサイズによって、多数のメッシュが含まれるケースや、1つのメッシュに流域が全て含まれるケースがあることが分かる。このことは、水質予測モデルへの入力および予測の実施にあたって留意すべき点があることが分かった。詳細については巻末の参考資料（10.1 節）に示す。

なお、本調査では、平成 25 年度から検討を開始し、検討期間中で得られた最新の気候モデルでのデータを採用している。本調査での検討期間中においても、全国の研究機関等において、研究、検討が進み、多くの将来気象予測データが公表されてきた。より解像度の高いメッシュサイズ（1km 等）や時間解像度（毎時間等）、また、データ期間も数十年～数百年等、より長い期間のデータが提供されてきている。

このため、将来予測に用いる気候モデルの選定にあたっては、検討実施時点において最新の情報を収集することが重要である。例えば、次の WEB サイトにより情報を得ることができる。

A-PLAT（気候変動適応情報プラットフォーム）

URL : <https://adaptation-platform.nies.go.jp/>

DIAS（データ統合・解析システム）

URL : <https://diasjp.net/>

表 4.1 将来予測に用いる気候モデルの概要

ケース名		MRI-NHRCM20	MIROC5	GFDL-CM3	d4PDF (by SI-CAT)
気候モデル	気候モデル	MRI-NHRCM20	MIROC5	GFDL-CM3	MIROC5
	水平解像度	20km 日本周辺 (211×175)	大気：約 150km 海洋：約 100km	大気：約 200km 海洋：約 110km の三極グリッド	大気：約 150km 海洋：約 100km
	鉛直層数	鉛直 40 層	大気：40 層 海洋：49 層	大気：48 層 海洋：50 層	大気：40 層 海洋：49 層
	モデル	地域気候モデル (日本周辺)	大気海洋結合モデル (全球)	大気海洋結合モデル	大気海洋結合モデル (全球)
	開発者	気象研究所	東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構による共同開発	National Oceanic and Atmospheric Administration、Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構による共同開発
	時間解像度	1 時間	3 時間	3 時間	1 時間
	主な提供 気象データ	気温、降水量、風向風速 など	気温、降水量、地表面湿度、地上気圧、海面水温、放射量など	気温、降水量、雲量、潜熱フラックス、風速、地上気圧、放射量など	気温、降水量、地表面湿度、地上気圧、海面水温、放射量など
データセット	開発者	気候モデルと同じ	気候モデルと同じ	気候モデルと同じ	SI-CAT (気候変動適応技術社会実装プログラム：文部科学省)
	水平解像度	20km	150km	200km	5km
	時間解像度	1 時間	3 時間	3 時間	1 時間
	排出シナリオ	RCP-2.6、RCP-8.5	RCP-8.5	RCP-8.5	4°C上昇 (RCP-8.5 相当)
	使用した 気象データ	気温、降水量	気温、降水量	気温、降水量	気温、降水量
備考				気候モデルはMIROC5を用いた力学的ダウンスケーリングデータであり、4°C上昇条件での将来データ (RCP8.5 相当と捉える)	



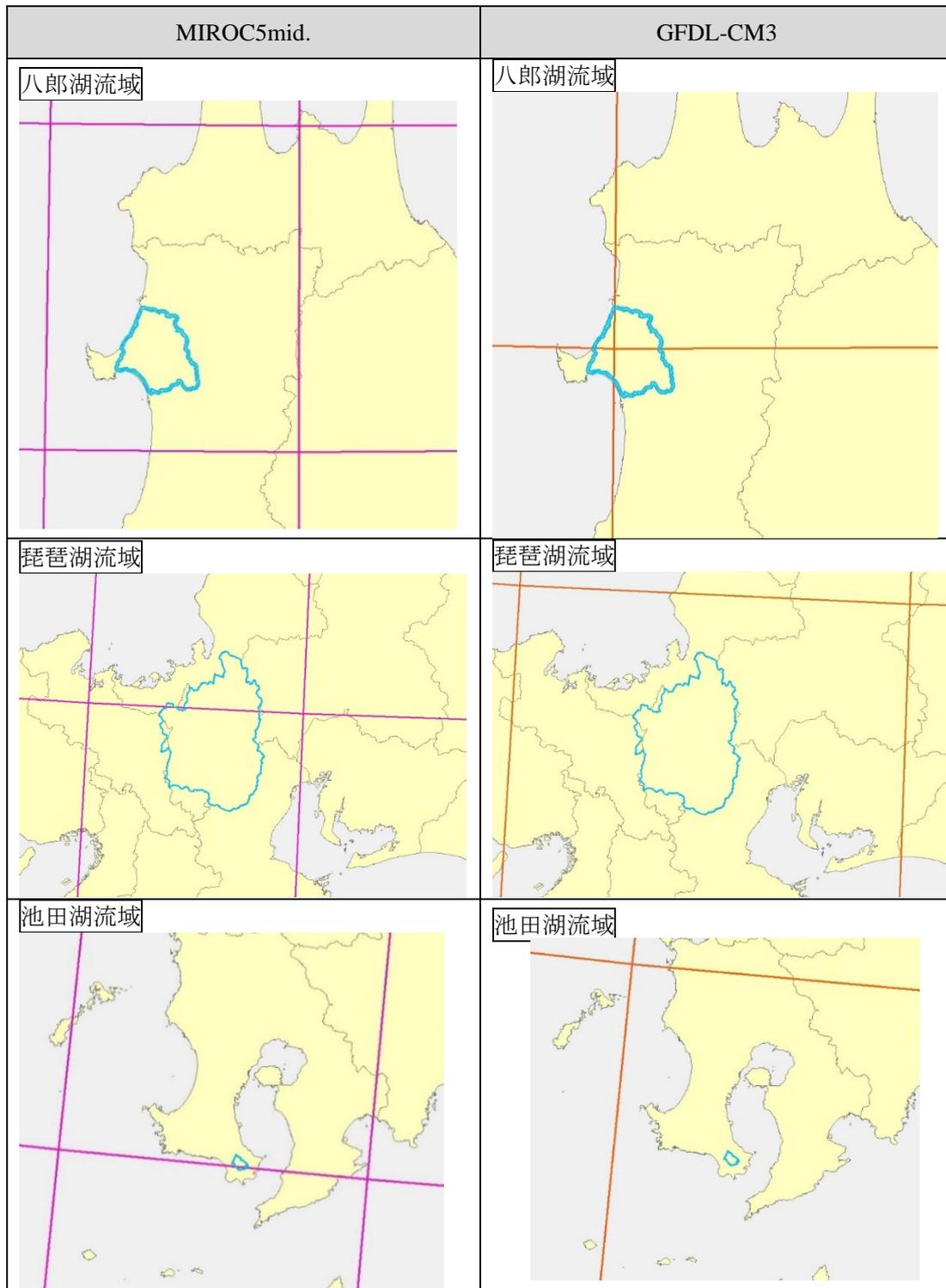
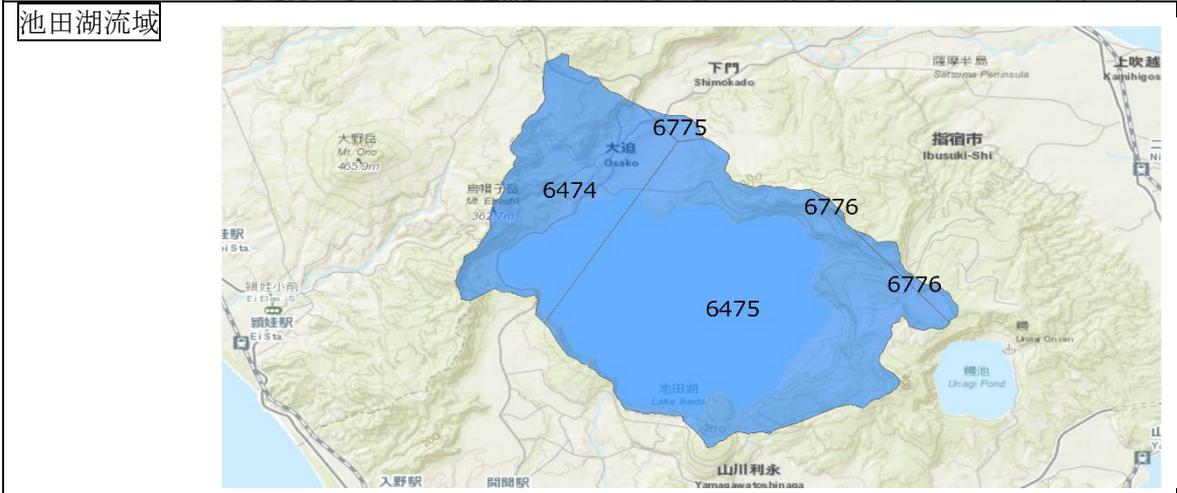
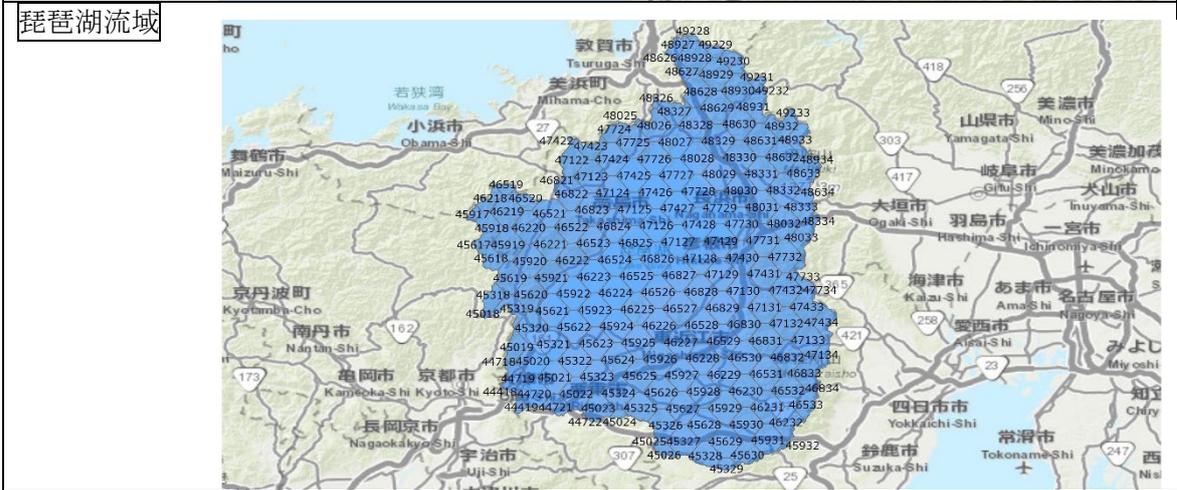
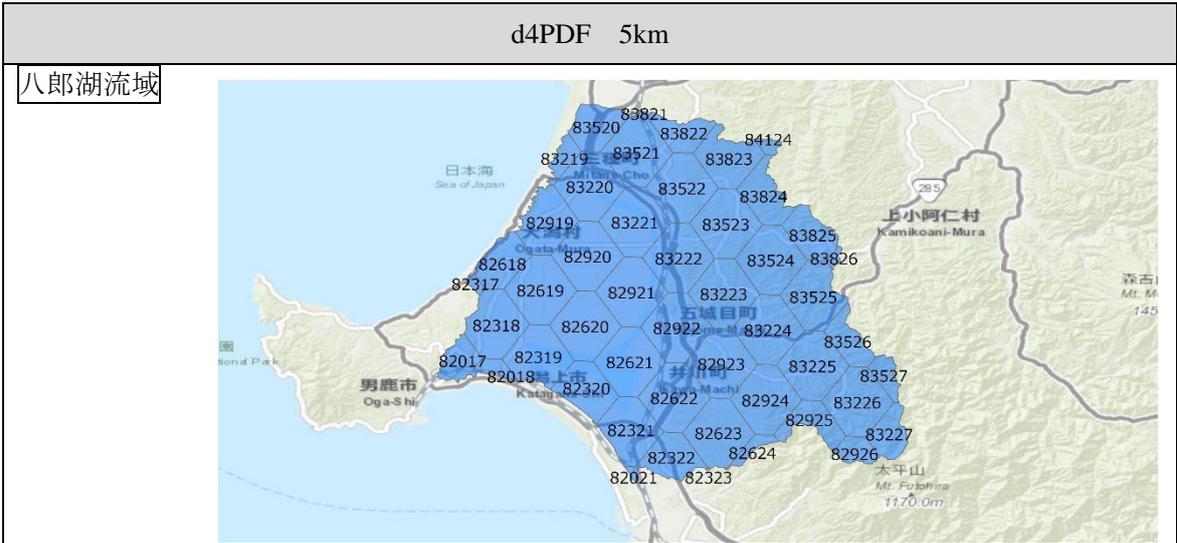


図 4.2 気候モデルでのメッシュと、モデル湖沼の流域

(左:MIROC5:150km、右:GFDL-CM3:200km)



背景図 Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

図 4.3 気候モデルでのメッシュと、モデル湖沼の流域 (d4PDF: 5km)

【参考 d4PDF データセット】

「大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ（東北～九州）」は、SI-CAT（気候変動適応技術社会実装プログラム：文部科学省）において提供されている（図 4.4、表 4.2）。

「大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ（東北から九州）（by SI-CAT）」

気候モデル：MIROC5

空間解像度：5km

時間解像度：時間

気象項目：気温、降水量 等

シナリオ：4℃上昇条件での将来データであり、RCP8.5 相当として捉える。

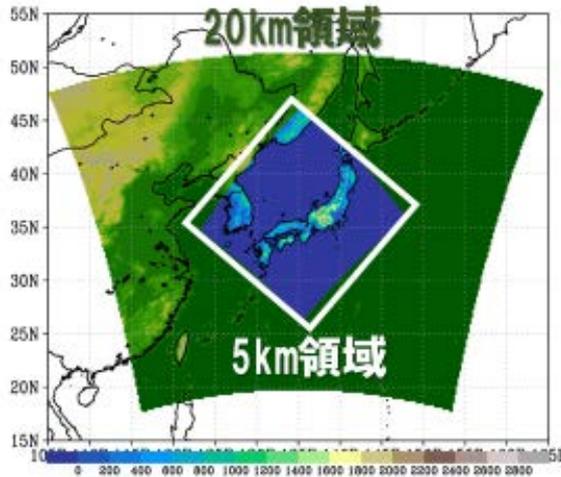
提供データ年数：2080.9～2111.8（約 30 年）、2つのアンサンブル（計約 60 年）

また、環境省が実施した「地域適応コンソーシアム事業」（平成 29～令和元年度）において、下記のデータセットが準備され、この事業での各地域、各分野における将来予測、影響評価、適応策検討に用いられており、メッシュサイズ、時間ピッチとも本調査での解析に適したものであったことから、このデータを入手して用いることとした。

なお、北海道、沖縄ではこのデータセットは用意されていないため、北海道、沖縄においてこのデータセットを活用する場合には、表 4.2 に示すデータセットから可能なものを使用することが考えられる。

領域気候モデルによる力学ダウンスケーリング

「20km → 5km 解像度」



	5km
過去実験	372yr
非温暖化実験	×
将来2K実験	372yr
将来4K実験	372yr
再現実験(JRA)	31yr

図 4.4 d4PDF データセットの 5km ダウンスケーリング

出典：佐々井崇博「SI-CAT プロジェクトにおける力学 DS データセットの構築」より引用、一部加筆

表 4.2 5km にダウンスケーリングされているアンサンブルメンバ名 (赤枠を本調査で使用)

期間	実験名 (昇温パターン)	計算ケース名	モデル作成国	計算期間	アンサンブル数	アンサンブルメンバ名
現在気候	過去実験	HPB	日本	1980.09 -2011.08	12	m001-m010 M021,m022
将来気候	将来4度昇温実験 (CCSM4)	HFB_4K_CC	アメリカ	2080.09 -2111.08	2	M101,m115
	将来4度昇温実験 (GFDL-CM3)	HFB_4K_GF	アメリカ	2080.09 -2111.08	2	M101,m115
	将来4度昇温実験 (HadGEM2-AO)	HFB_4K_HA	イギリス	2080.09 -2111.08	2	M101,m115
	将来4度昇温実験 (MIROC5)	HFB_4K_MI	日本	2080.09 -2111.08	2	M101,m115
	将来4度昇温実験 (MPI-ESM-MR)	HFB_4K_MP	ドイツ	2080.09 -2111.08	2	M101,m115
	将来4度昇温実験 (MRI-CGCM3)	HFB_4K_MR	日本	2080.09 -2111.08	2	M101,m115

## 4.3 将来予測ケースの設定

### 4.3.1 気候モデルデータの収集

気候モデルのデータは、DIAS のデータベースからデータをダウンロードすることにより収集した。また、d4PDF のデータについては、環境省を通じて、作成者である文部科学省に使用許諾を得るとともに、直接モデル予測に必要な気象データ（気温、降水量：バイアス補正済み）を入手した。

### 4.3.2 将来予測期間の設定

各気候モデルにおける将来予測期間は、表 4.3 の通りである。気候モデルによってデータの提供されている期間は異なっており、20～30 年であった。本調査においては、検討当時に収集したデータセット（MRI-NHRCM20）についてデータ提供期間が 20 年間であったことから、一定程度に様々な気象条件が含まれるよう、水質予測計算期間を 10 年間にするとともに、20 年間の中でより気候変動が進んでいるとして後半の期間を選んだ。

ここで、d4PDF のデータセットでは 30 年間のデータが提供されていることから、予測期間の長さの違いによる予測結果への影響について確認を行った。詳細な検討結果は、巻末の資料編（10.2 節）に示す。これによると、予測期間が長い場合、10 年間と比べて大きい降水量が含まれる可能性があり、極値的な現象を取扱う場合には予測期間は長く設定した方が望ましいことが分かった。

表 4.3 将来予測期間の設定

気候モデル	排出シナリオ	メッシュサイズ	時間ピッチ	データ収集期間 (提供期間)	水質予測に 使用した期間 (10 年)
MRI-NHRCM20	RCP2.6、8.5	20km	1 時間	2081～2099	2090～2099
MIROC5	RCP8.5	150km	3 時間	2060～2080	2071～2080
GFDL-CM3	RCP8.5	200km	3 時間	2076～2100	2091～2100
d4PDF	4℃上昇 (RCP8.5 相当)	5km	1 時間	2080.9～2111.8	2090～2099

### 4.3.3 バイアス補正

気候モデルの将来気象予測データについて、将来気象予測データ（現在気候）に対して現況（アメダス等の観測データ）との差（バイアス）が含まれていることから、水質予測モデルへ入力するにあたって、バイアス補正を行った。なお、各気候モデルの具体的なバイアス補正方法については、巻末の参考資料（10.3 節）に示している。以降では、各気候モデルで行ったバイアス補正方法の概要を示す。

#### (1) MRI-NHRCM20

MRI-NHRCM-20km のデータセットでのバイアス補正は、現況に合わせるよう現在気候のデータを補正し、それと同じ補正を将来気候のデータに行う、というバイアス補正を行った。

このバイアス補正の方法としては、本調査において実施していた A1B シナリオを用いた検討との整合性を図るために、各メッシュでの出力値（気温、降水量）に対して、「地球温暖化予測情報第 8 巻（NHRCM-5km）」で提供されている気象予測データでのバイアス補正方法と同じ方法にて行った。

さらに、年平均値・年降水量で現況（アメダス）と現在気候がずれている場合には、年平均値・年降水量で合うように補正を行った。

#### (2) MIROC5、GFDL-CM3

他の気候モデルと比べてメッシュサイズが大きいことから、上記 MRI-NHRCM-20km と同じバイアス補正の手法を用いると降雨量の極値が合わず、補正方法に課題があった。このため、さらに降水量の時間別値の累積確率分布を用いて、月ごとにバイアス補正を行うことで、極値の降水量を再現することとした。

なお、この 2 つの気候モデルでのメッシュ内（150km、200km サイズ）では、補正された降水量が一様に与えられることとなった。

#### (3) d4PDF

d4PDF（5km ダウンスケーリング）のデータセットには、解像度による地形効果等を要因とするバイアスが含まれており、これを補正する必要がある。また、将来気候ではアンサンブルに与えた海面水温の違いを考慮する必要があることから、バイアス補正が必要である。

なお、収集した d4PDF（5km ダウンスケーリング）のデータセットについては、前述した通り、環境省が実施した「地域適応コンソーシアム事業」（平成 29～令和元年度）においてバイアス補正が実施されており、そのデータを入手したことから、本調査ではバイアス補正は実施していない。

#### 4.3.4 気象条件以外のモデル入力条件

将来の湖沼の水質に影響を及ぼす要因として、気象変化の他に、流域での土地利用や排出負荷量等、様々な変化要因が考えられる、

しかし、本調査では、将来の気象変化による湖沼への影響を検討することを目的としていることから、水質予測モデルへの入力条件は気象条件のみを変更し、その他の入力条件（流域の人口や土地利用、排出負荷量等）は現況と同じとした。

なお、人口や土地利用や排出負荷量等に関する産業構造の将来シナリオとして、国立環境研究所から SSP（共通社会経済経路：Shared Socio-Economic Pathways）が公表される等、近年ではこの分野の研究や検討が進んでいる。今後は、気温や降水量等の将来の気象変化とともに、これら社会条件の将来変化も踏まえた上で、湖沼における将来の水質予測、及び影響評価を行うことが必要になると考えられる。

出典：国立環境研究所 HP：気候変動研究で分野横断的に用いられる社会経済シナリオ(SSP; Shared Socioeconomic Pathways)の公表（お知らせ）  
URL：<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20170221/20170221.html>

## 4.4 将来気象条件の設定結果

前節までで設定した将来予測ケースでの将来気温、降水量データについて、将来水質予測で使用する期間である10ヶ年のデータについて、現況との比較を以降に示す。比較のため、ここでは各メッシュのデータを流域平均で集計している。また、気温、降水量データは時間ピッチであり、これを年平均、月平均等で整理した。

### (1) 気温

#### 1) 年平均気温

3湖沼とも現況に比べて、将来の年平均気温は上昇し、そのうち、GFDL-CM3が4~5℃程度と最も上昇するとの予測となっている。

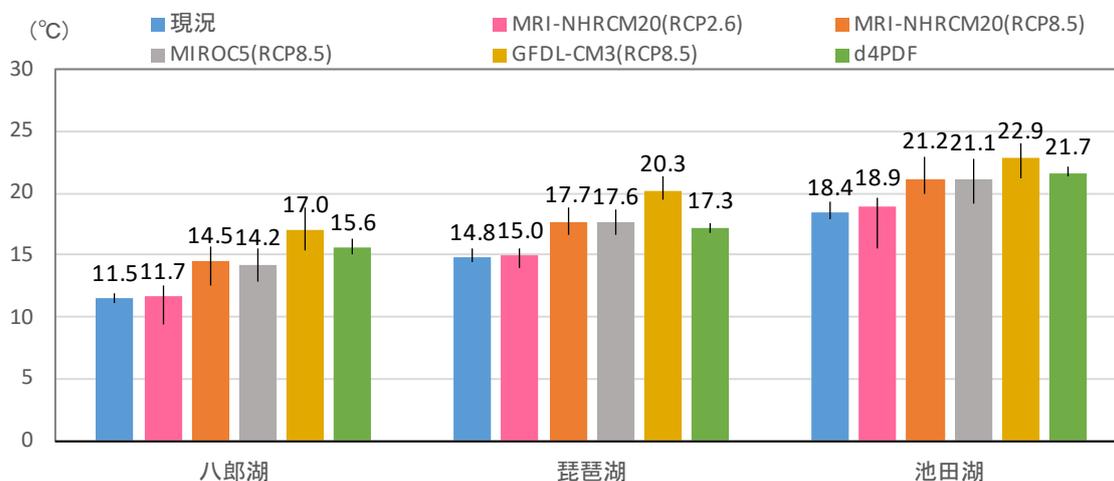
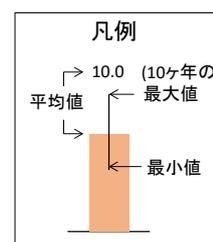


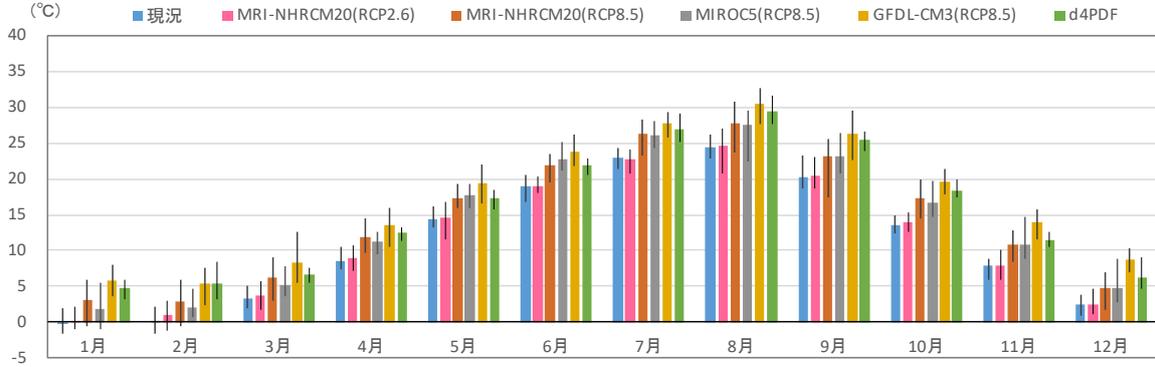
図 4.5 年平均気温



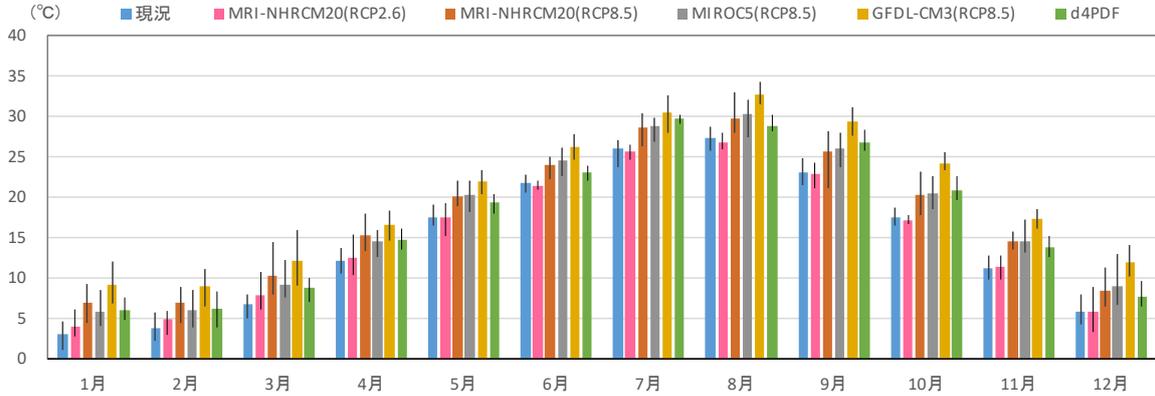
## 2) 月平均気温

3 湖沼とも年を通して月平均気温が上昇するとの予測となっている。

### ■ 八郎湖



### ■ 琵琶湖



### ■ 池田湖

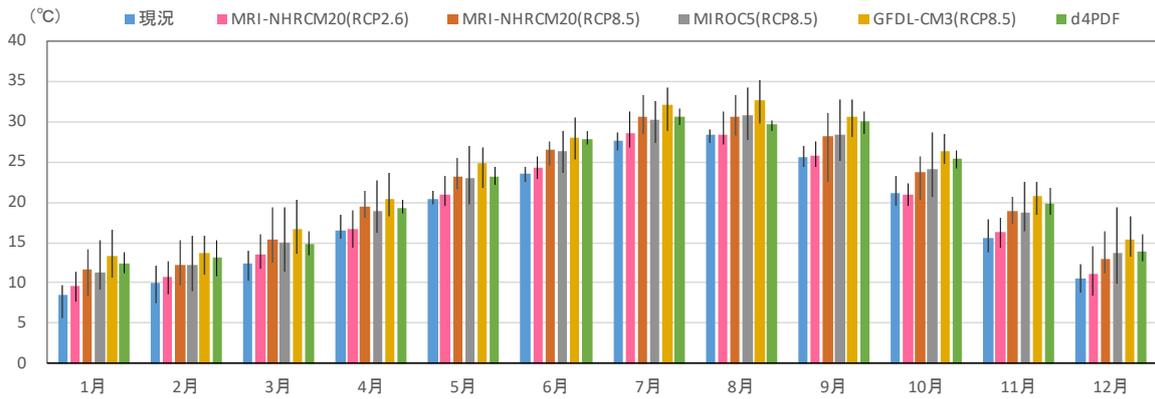
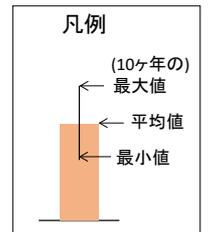


図 4.6 月平均気温



### 3) 日平均気温が 30 度以上の日数

夏の気温上昇について、日平均気温が 30℃を越える日数を集計すると、3 湖沼ともに大きく増加するとの予測となっている。

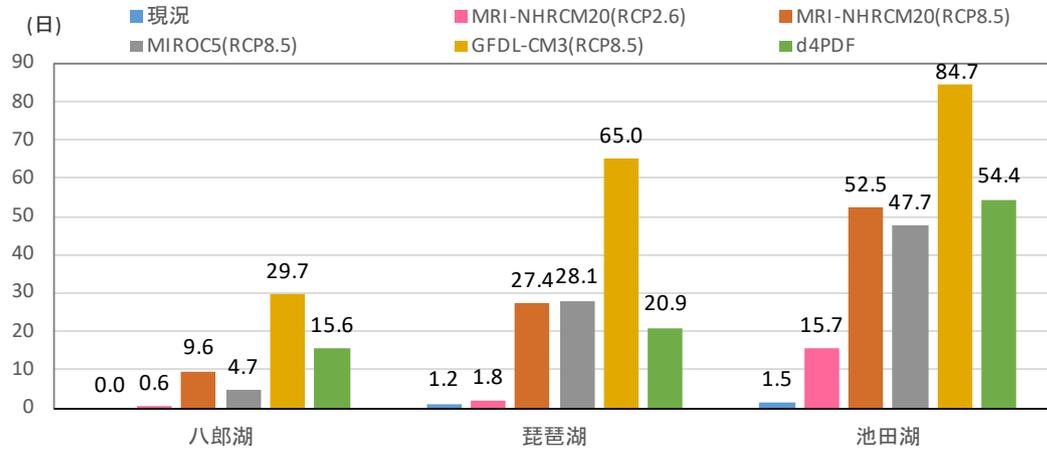


図 4.7 日平均気温が 30℃以上となる日数(10ヶ年で集計し 1 年あたりの日数)

### 4) 日平均気温が 0 度未満の日数

八郎湖、琵琶湖では減少すると予測されている。特に現在も冬季に湖面結氷する八郎湖では、ケースによっては半分未満の日数まで減少する。なお、池田湖では現況で 0℃未満となる日はなく、将来でも生じないとの予測となっている。

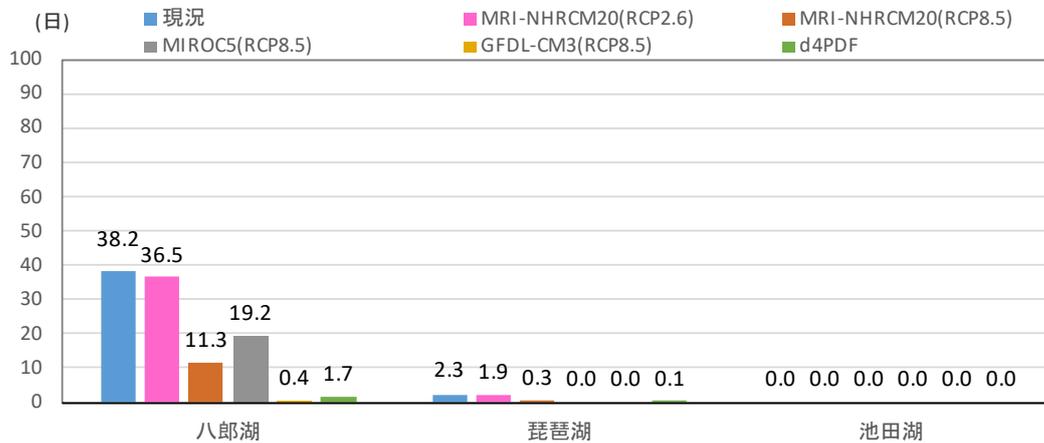


図 4.8 日平均気温が 0℃未満となる日数(10ヶ年で集計し 1 年あたりの日数)

## (2) 降水量

### 1) 年降水量

池田湖での d4PDF を除いて、年降水量は増加すると予測されている。池田湖ではケースごとの変動の幅が八郎湖、琵琶湖に比べて大きくなるとの予測となっている。

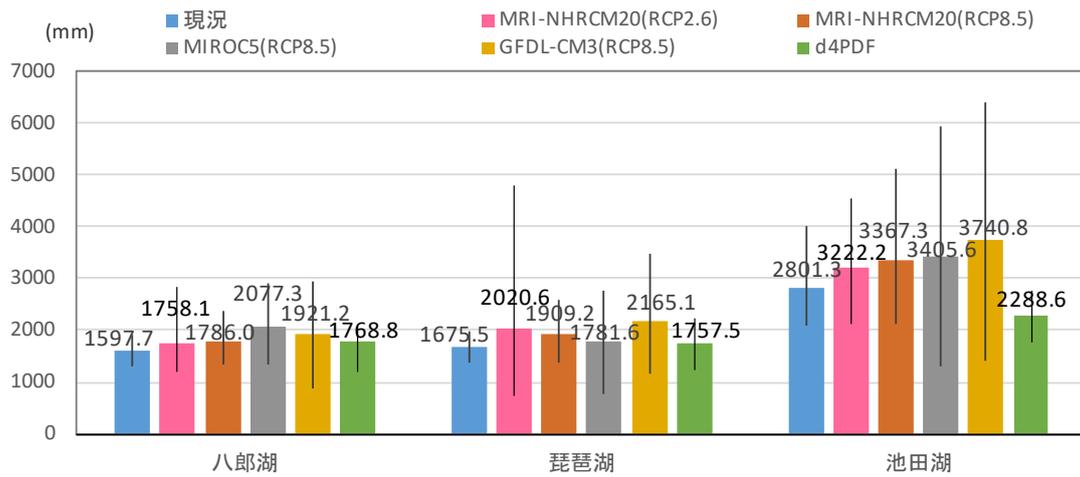
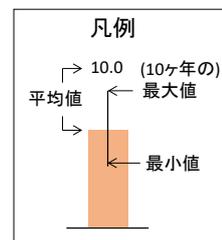


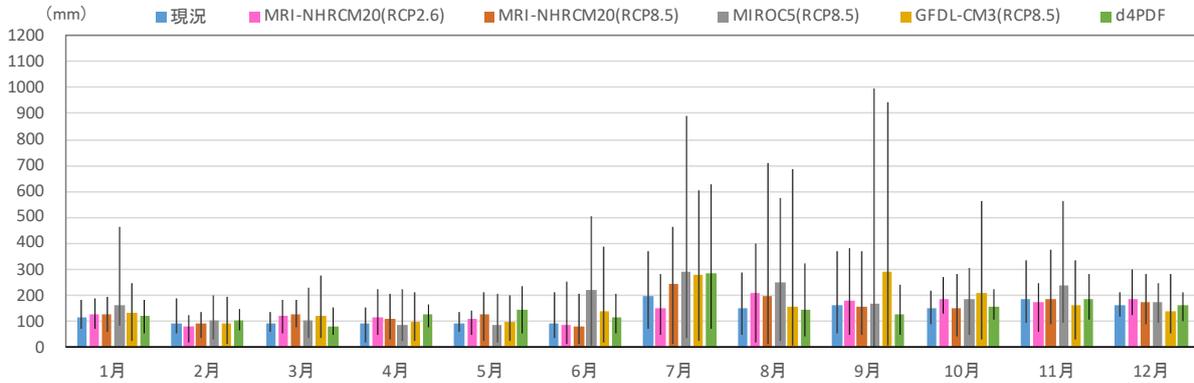
図 4.9 年降水量



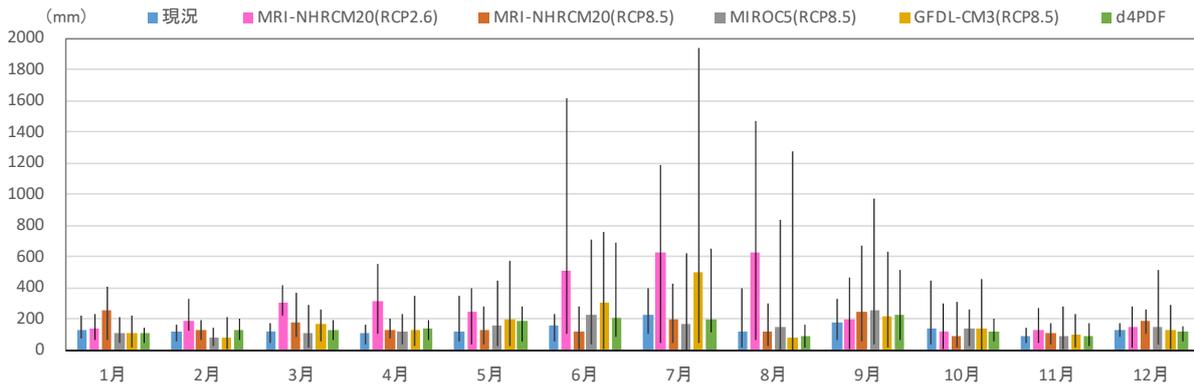
## 2) 月降水量

池田湖の d4PDF を除き、3つのモデル湖沼とも、夏期（6～9月）の降水量が多くなる傾向がある。池田湖では、月によっては現況より多い月があり、変動幅も大きくなるとの予測となっている。

### ■ 八郎湖



### ■ 琵琶湖



### ■ 池田湖

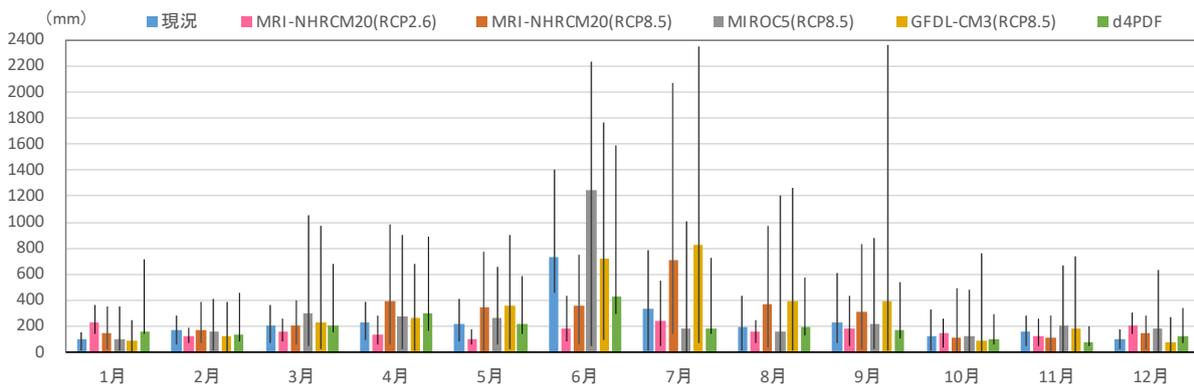
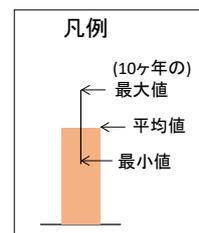


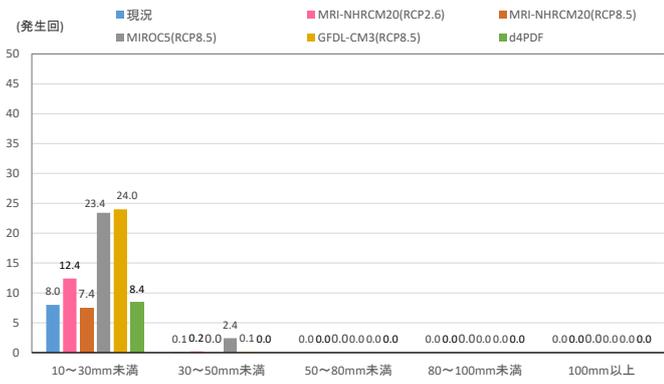
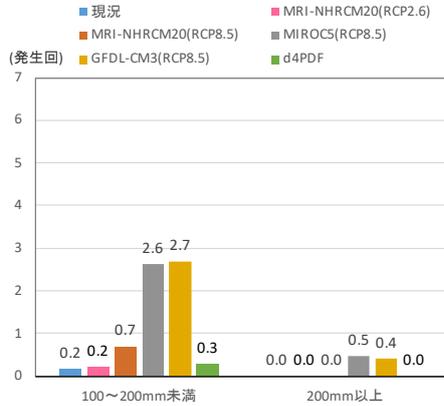
図 4.10 月降水量



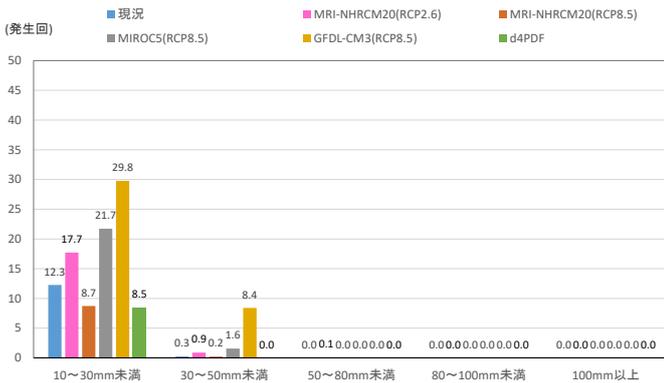
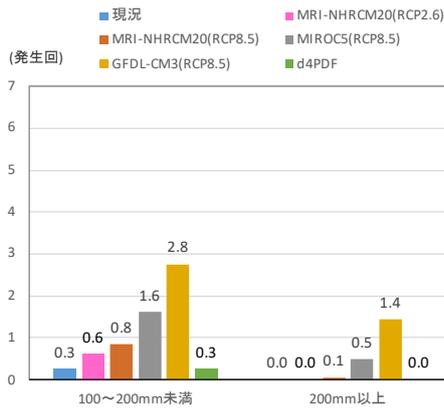
### 3) 日降水量・時間降水量の規模別発生頻度

出水時の流量や総流出量に影響する日降水量では、3湖沼ともに100mm以上となる回数は増加し、特に200mm以上について、MIROC5とGFDL-CM3で増加傾向が見られる。時間降水量についても同様な傾向であるとの予測となっている。

#### ■ 八郎湖



#### ■ 琵琶湖



#### ■ 池田湖

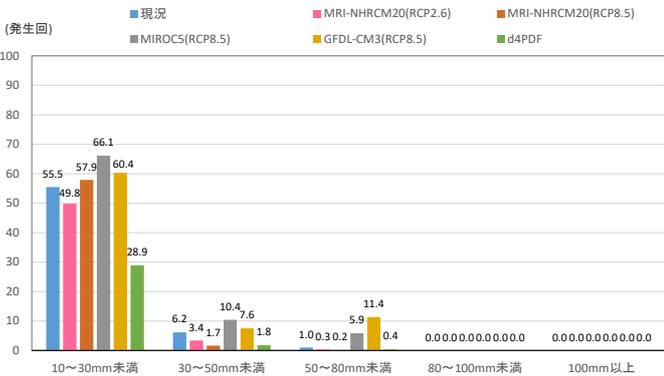
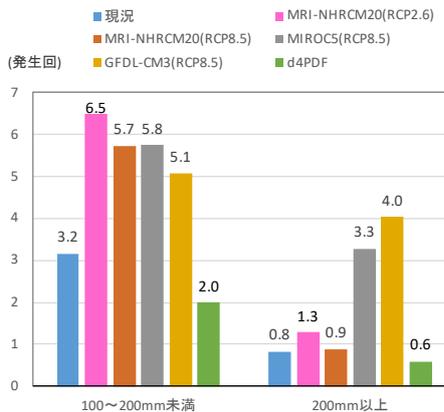


図 4.11 日降水量(左)、時間降水量(右)の規模別発生頻度(10ヶ年で集計し1年あたりの日数)

## 5. 影響評価の方法

---

### 5.1 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の変化であるため、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検討、評価することが必要である。

影響評価にあたっては、湖沼の水質変化によって、水利用上、何が問題になるのかを整理しておくことが重要である。例えば、湖沼の水温が上昇（いつ？、どのくらい？）することによって、何（漁獲対象魚種等）にどのような影響があるのか、といったことを対象湖沼の特性に応じて整理する。

そのため、本調査での影響評価にあたり、各湖沼の特徴（水利用状況や漁業等）に応じて、水質等の変化によりどのようなことが問題になり得るのかといったことについて、情報収集・整理した。表 5.1 に示すように、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を設定し、影響を評価することとした。

また、影響評価は、水質変化による影響の有無を判断するための評価基準値・しきい値等を設定して行った。例えば、評価対象魚類の生息適水温や溶存酸素（DO）濃度、植物プランクトンの増殖の程度を示すクロロフィル a 濃度等の評価基準値・しきい値について、既往知見や検討成果等から設定した。具体的な設定結果は、6 章以降に示す。

なお、本資料の予測結果・影響評価結果は、気温上昇が比較的小さいシナリオである RCP2.6 や、排出量が多く気温上昇が大きいシナリオである RCP8.5（または 8.5 相当）の異なるケースを用いた将来予測による結果であり、予測結果・影響評価結果には不確実性を含んでいることに留意する必要がある。

## 5.2 影響評価の指標

本調査においては、各モデル湖沼における水質・生態系への影響として、表 5.1 に示す項目により評価を行った。なお、本調査では、3つのモデル湖沼の特徴を踏まえ、表 5.1 の13項目を選定したが、検討の対象とする湖沼の特徴に応じて、他にも影響を評価するための指標を考えることはできる。

表 5.1 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(本調査で用いた例)

水環境の変化	影響を評価するための指標
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
	②底泥からの窒素、リンの溶出
湖水温の上昇	③冷水性魚類等の生息適水温とのずれ
	④植物プランクトンの変化
	⑤魚類等の生息水深の変化
	⑥底泥からの窒素、リンの溶出
湖面結氷の変化	⑦湖面結氷の短期化
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
	⑨春先の栄養塩供給量の減少
	⑩春先の融雪水量の減少
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
	⑫植物プランクトンの変化
降水量の減少による平常時流入量の減少	⑬植物プランクトンの変化

## 6. 八郎湖における将来予測・影響評価

### 6.1 将来気象条件

八郎湖における水質予測結果の傾向等を解釈するに際してポイントとなる各予測ケースの入力条件として用いた気象条件の特性を以降に整理する。

#### (1) 年別値(年平均気温、年降水量)のケース毎の比較

気温(図 6.1 の左)については、現況では年平均気温(計算に用いた 10 年間の平均)が約 11.3°C であるのに対し、将来においては、RCP2.6 のケースで約 0.4°C の上昇、その他の RCP8.5 相当\*の 4 ケースでは平均約 3.4~7.1°C の上昇となっている。中でも GFDL-8.5 は突出して気温が高くなるケースとなっている。また、現況に比べて、将来ケースの方が各年のばらつきの幅は大きい。

年降水量(図 6.1 の右)は、現況で 1,892mm であるのに対し、将来においては 7mm の減少~582mm の増加となる。中でも MIROC-8.5 は降水量の増加幅の大きいケースとなっている。また、現況に比べて、将来ケースの方が各年のばらつきの幅は大きく、中でも MIROC-8.5、GFDL-8.5 は各年のばらつきが大きいケースとなっている。

※本報告書では、RCP8.5 の予測ケース(3 ケース)に加え 4°C 上昇シナリオである d4PDF を含めて「RCP8.5 相当」と称することとする。

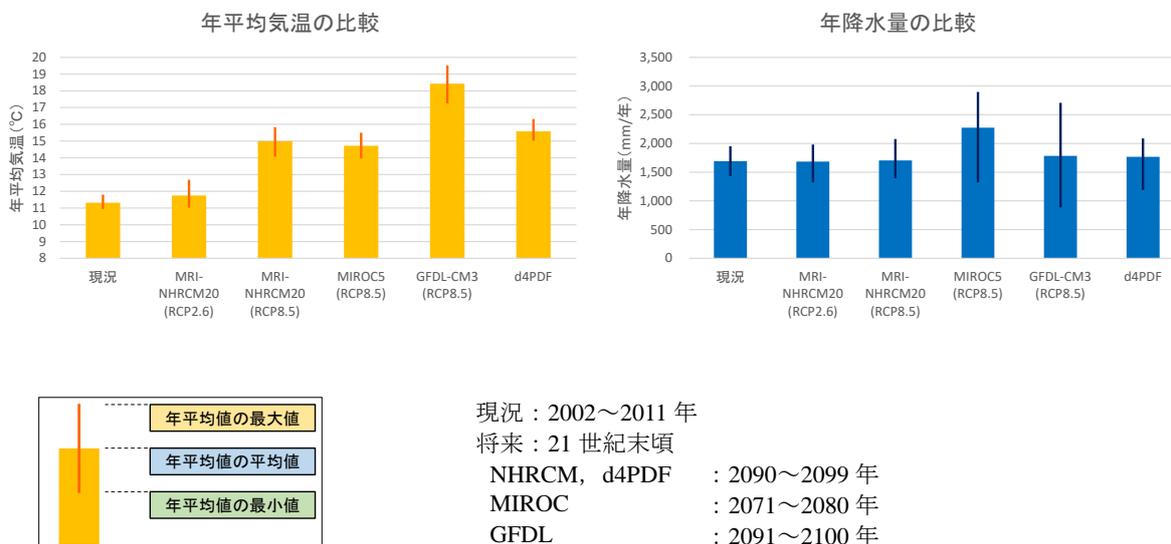


図 6.1 各ケースの気象状況の比較(八郎湖, 流域平均)

## (2) 規模の大きな降雨の比較

各ケースにおける10年分の日雨量を降順に並べ替え、規模の大きな降雨の生起状況を比較した(図6.2)。MIROC、GFDLでは、他のケースに比べて大きな日降水量の発生が見られる。d4PDFとNHRCMは近い傾向となっている。

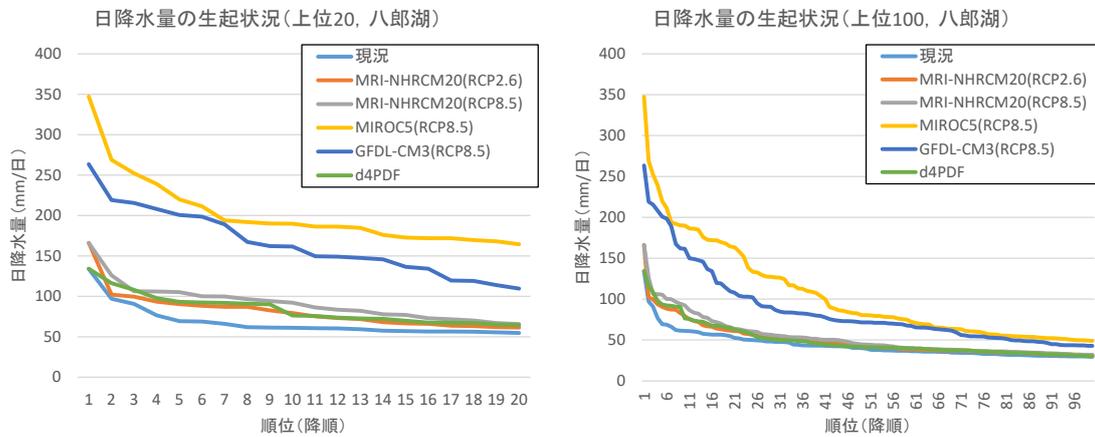


図 6.2 各ケースの日降水量の比較(八郎湖, 流域平均)

現況の10年間で第10位の日雨量<sup>\*</sup>(流域平均)以上の日雨量の生起回数(図6.3)は、将来気候のいずれのケースにおいても現況を上回り、将来、大雨の生起頻度は増加する傾向である。

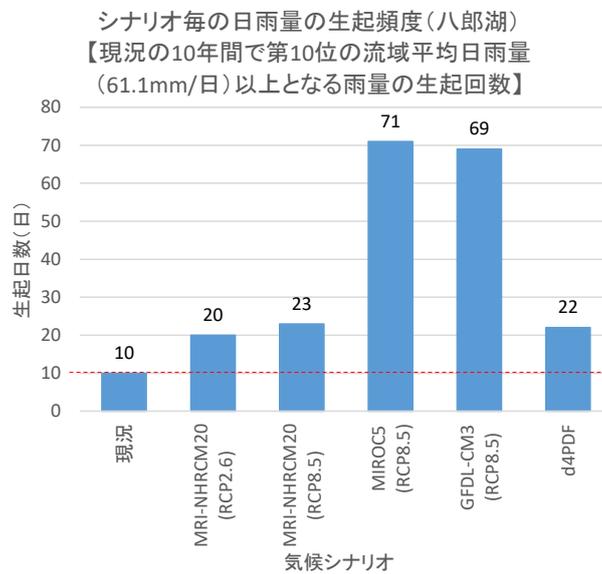


図 6.3 各ケースの日降水量の発生頻度の比較(八郎湖, 流域平均)

【現況の10年間で第10位の日雨量<sup>\*</sup>(流域平均)以上の日雨量の生起回数】

<sup>\*</sup>10年間で第10位の日雨量: 降雨強度の強い雨の発生頻度を比較するため、年1回相当程度の頻度と捉えるため設定した指標

### (3) ケース毎の年別値(年平均気温、年降水量)、日別値(日平均気温、日降水量)の比較

図 6.4～図 6.9 に、各ケースにおける日・年での気象データを示す。MIROC、GFDL において、大きな日降水量の発生が見られ、年降水量の幅も大きい。

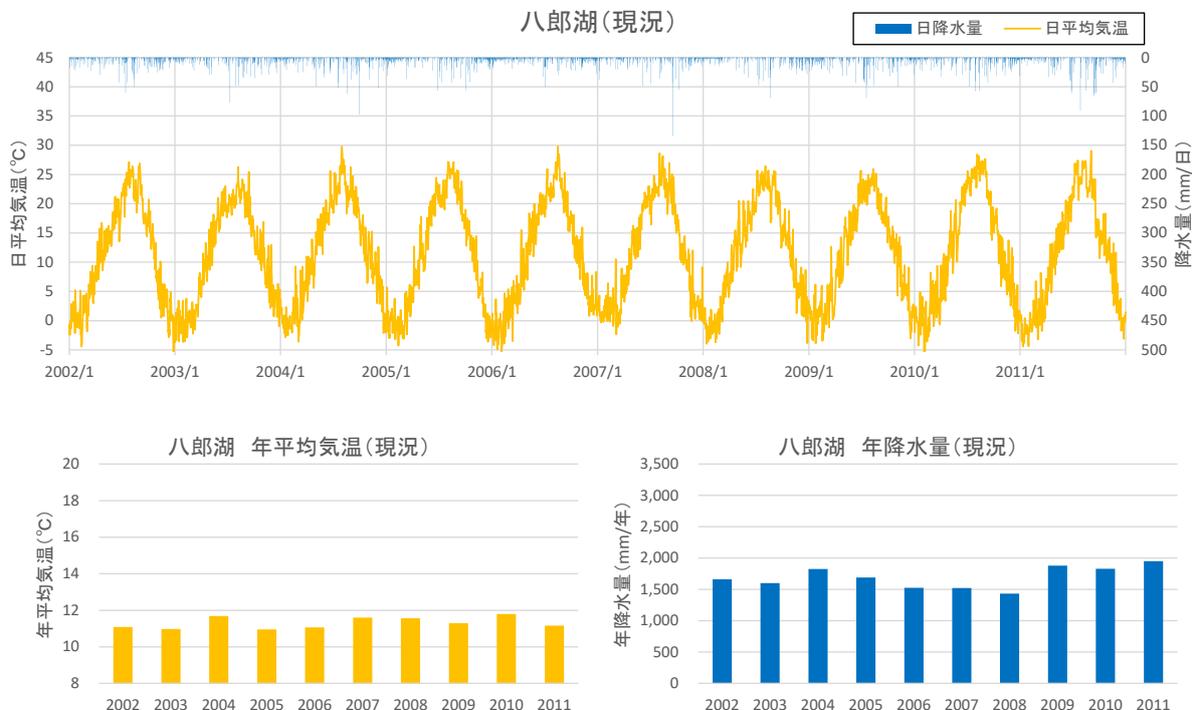


図 6.4 現況の気象状況(八郎湖, 流域平均)

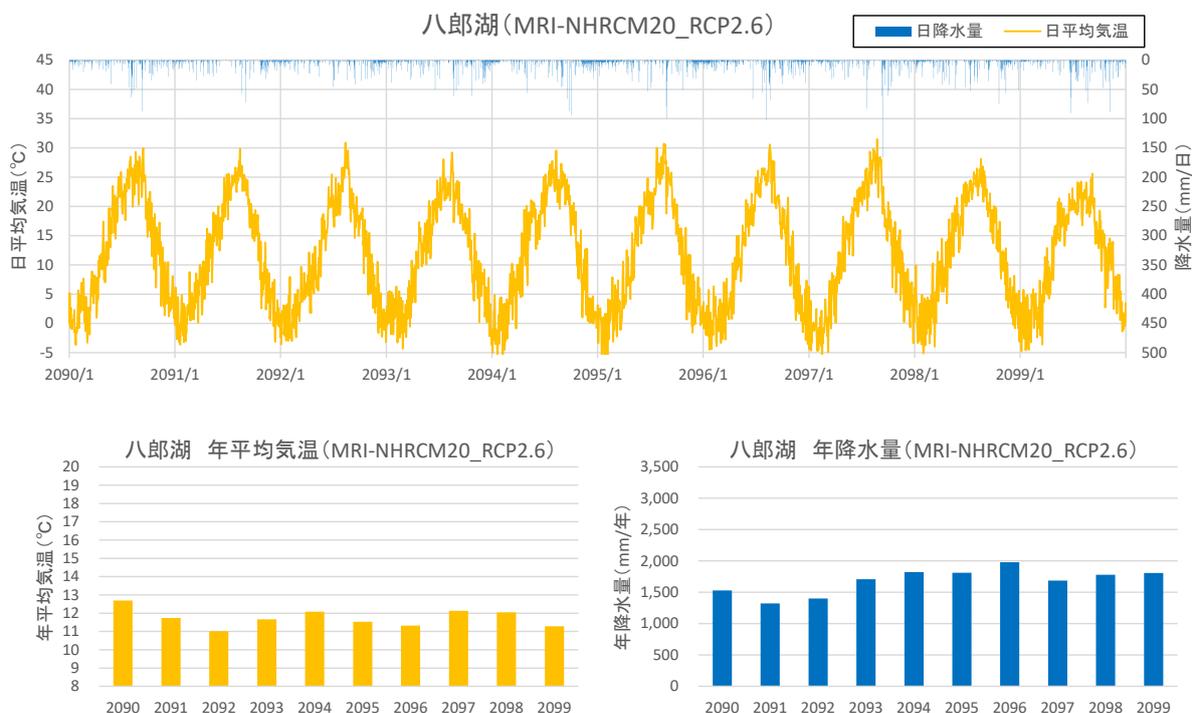


図 6.5 MRI-NHRCM20\_RCP2.6 の気象状況(八郎湖, 流域平均)

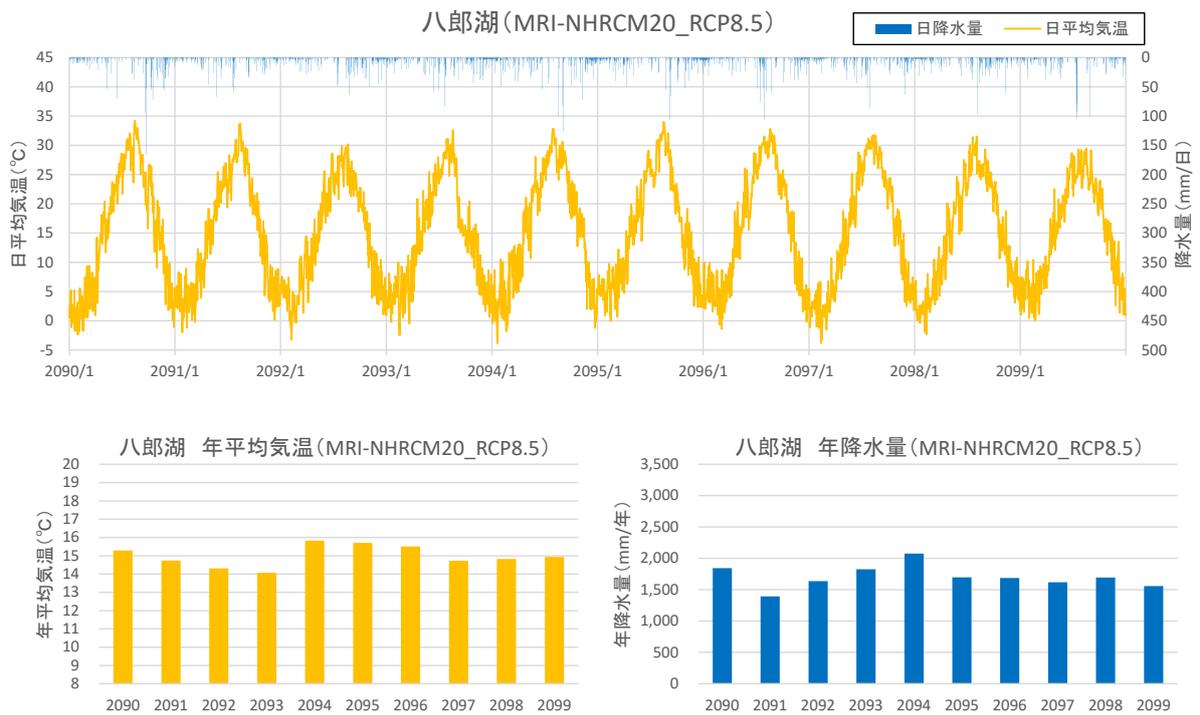


図 6.6 MRI-NHRCM20\_RCP8.5 の気象状況(八郎湖, 流域平均)

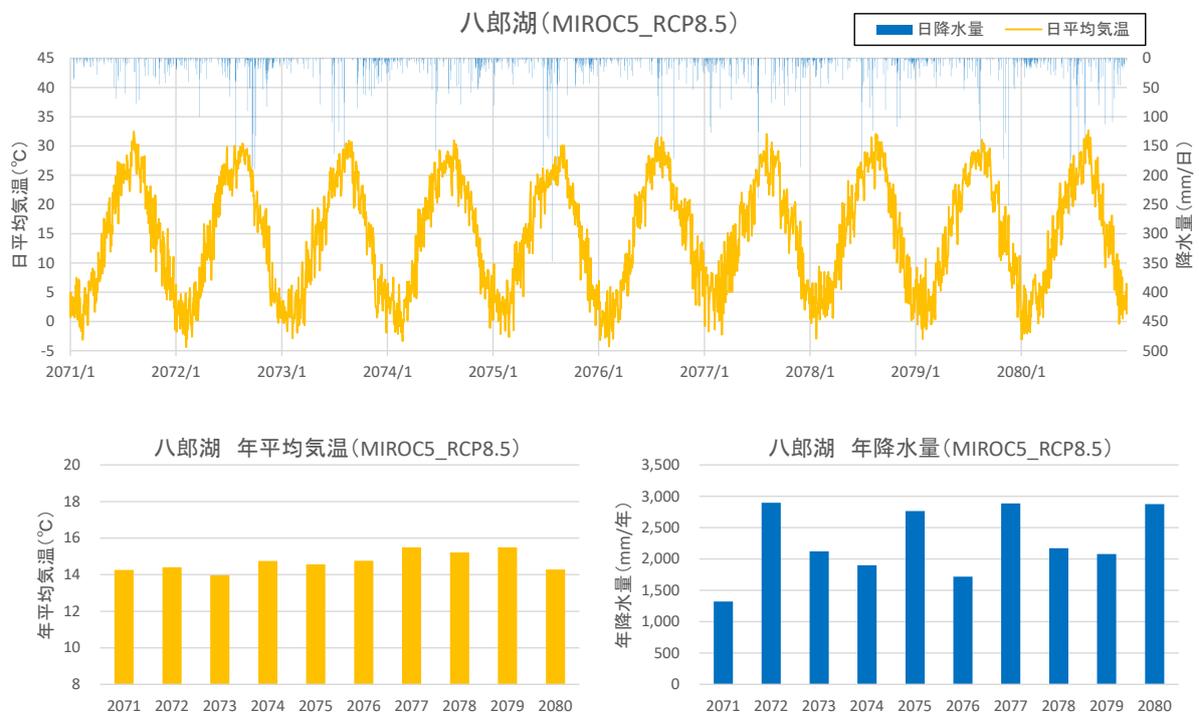


図 6.7 MIROC5\_RCP8.5 の気象状況(八郎湖, 流域平均)

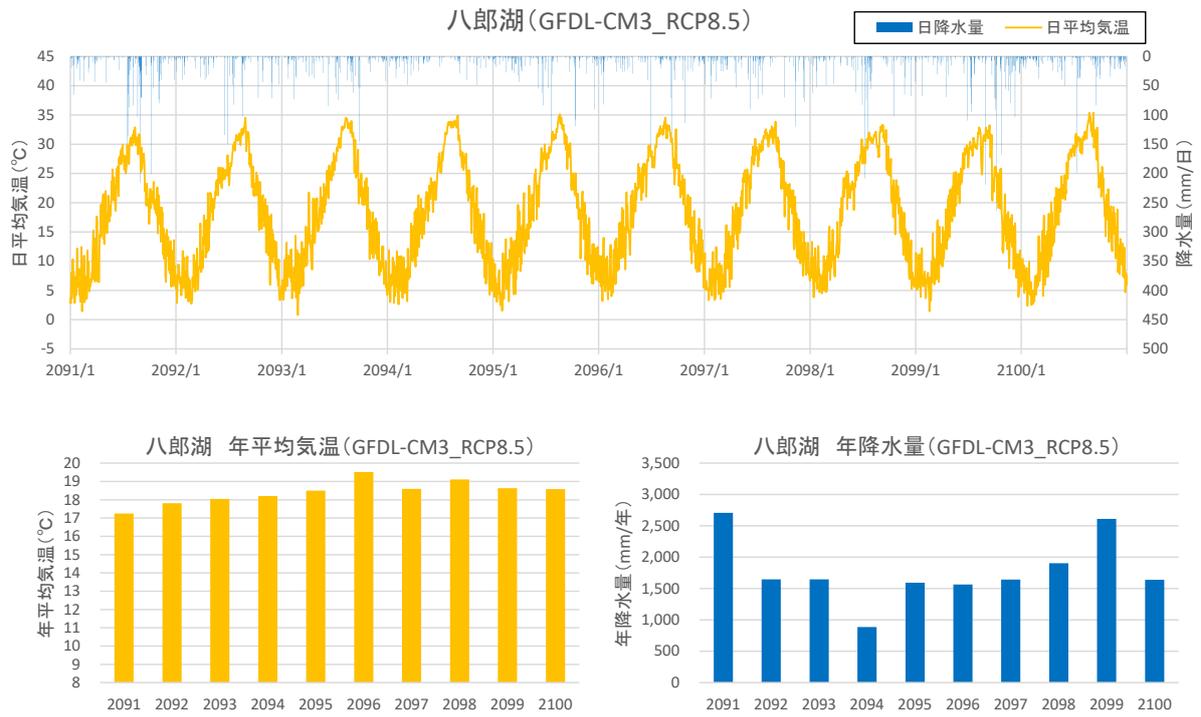


図 6.8 GFDL-CM3\_RCP8.5 の気象状況(八郎湖, 流域平均)

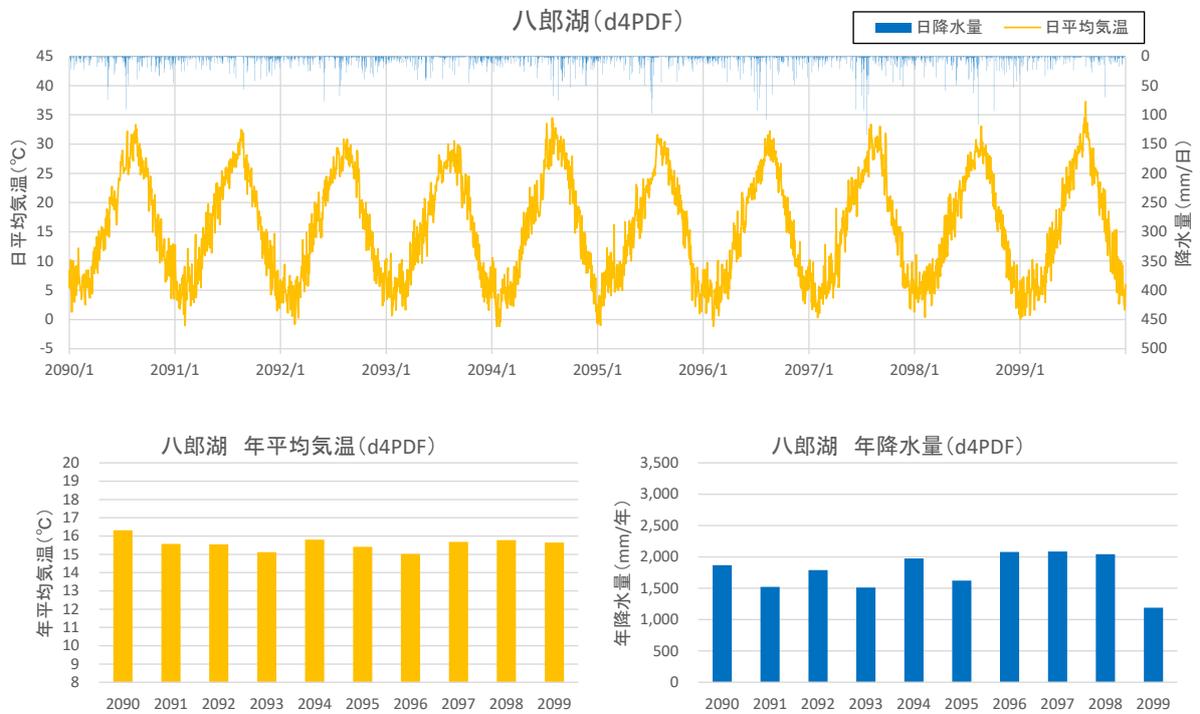


図 6.9 d4PDF の気象状況(八郎湖, 流域平均)

## 6.2 将来水質予測結果

### (1) 流域からの流入

#### 1) 河川流量

- 最大の流入河川である馬場目川の流量の変化を示す。通年においては、現況では年平均流量（10ヶ年の平均）が19.6m<sup>3</sup>/sであるのに対し、将来は14.5～19.0m<sup>3</sup>/sと流量が約3～28%減少する。（図 6.10）
- 融雪期にあたる3～5月においては、融雪による流量増加が、将来気候では小さくなる。現況では3～5月平均流量が21.5m<sup>3</sup>/sであるのに対し、将来は12.3～18.9m<sup>3</sup>/sと流量が約12～43%減少する。（図 6.11、図 6.13）
- 出水期にあたる7～9月では、現況と比較して、将来は、現況の最大流量を上回るような出水の生起頻度が増加するケースや、出水期以外の季節においても比較的規模の大きな出水が発生するケースがある。（図 6.12、図 6.13）

#### ■通年

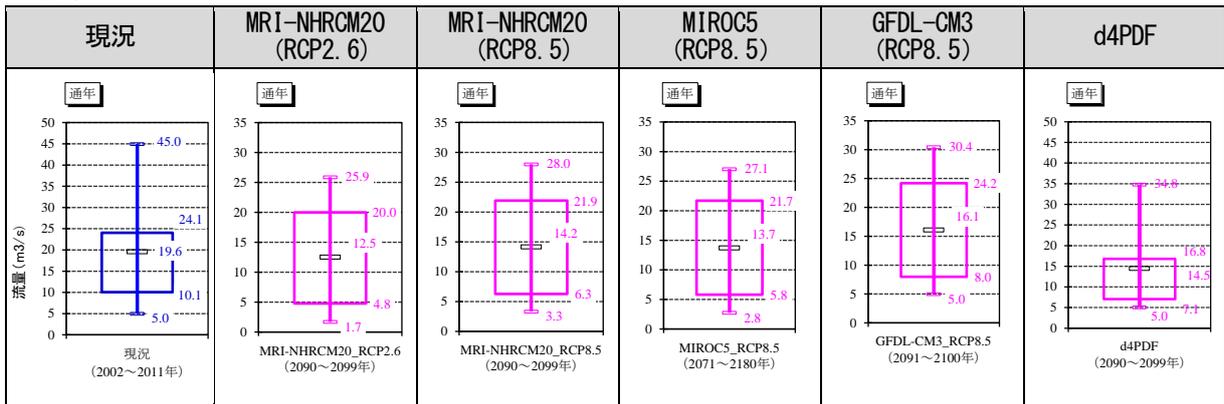


図 6.10 馬場目川における通年の流量変化

#### ■3～5月（現況の状況から3～5月を融雪期と設定した）

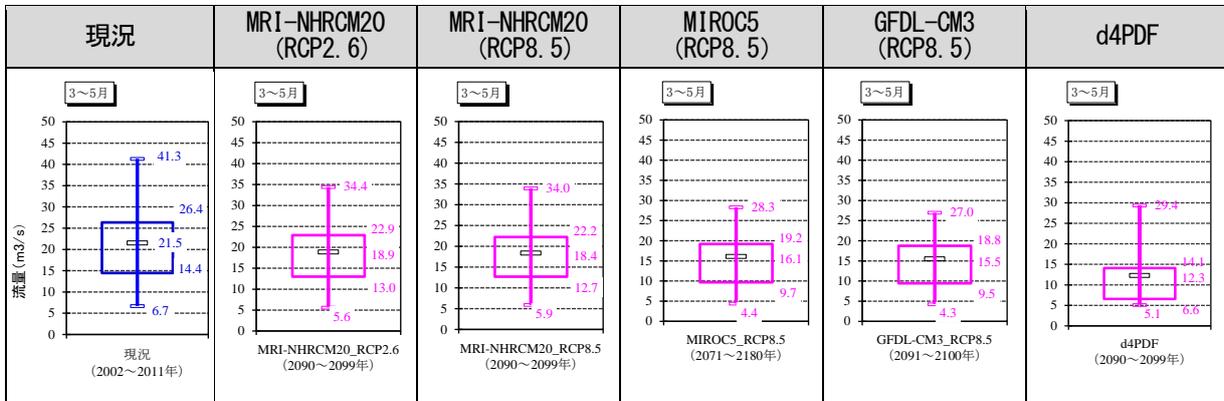
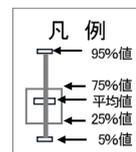


図 6.11 馬場目川における融雪期の流量変化



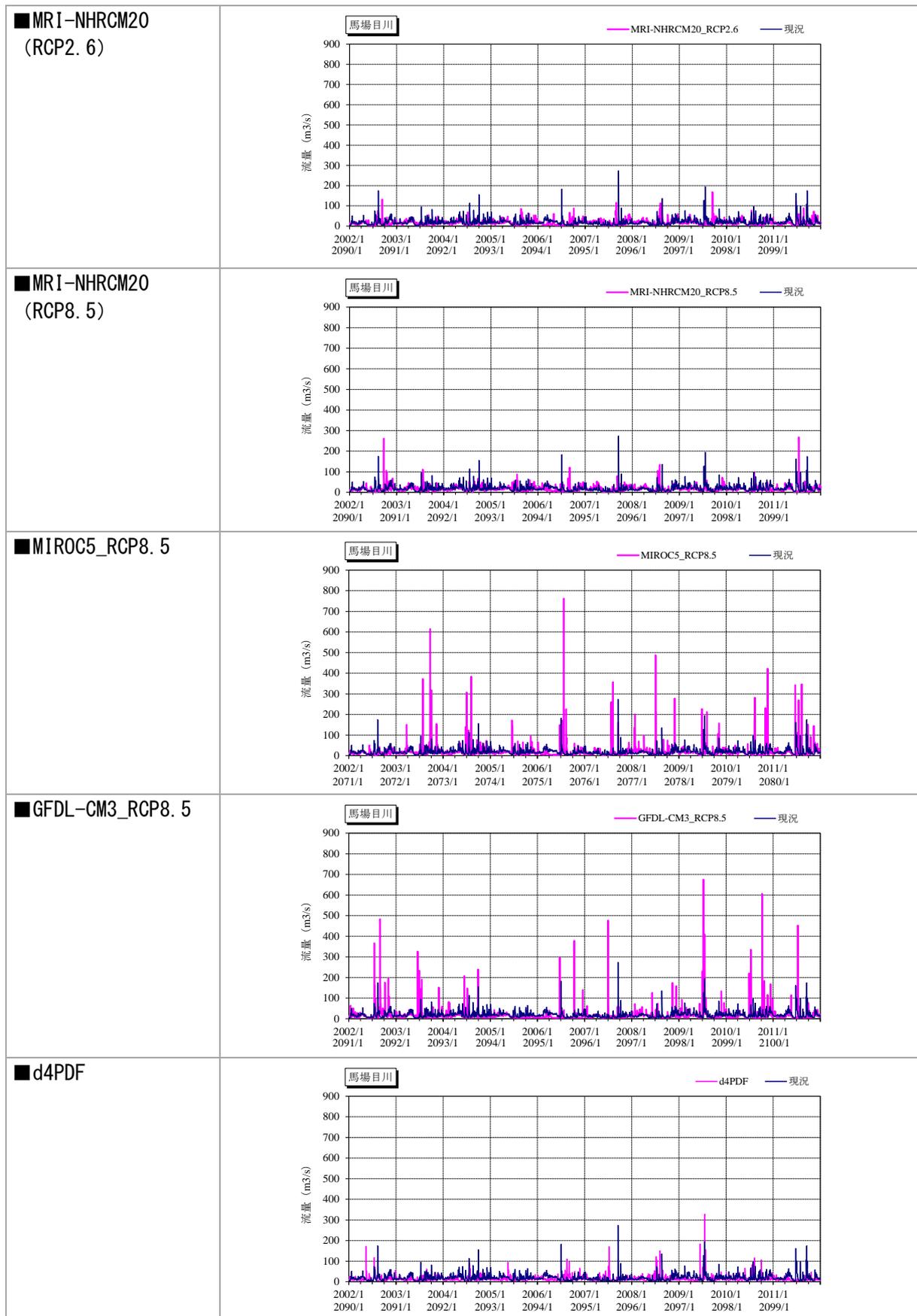


図 6.12 馬場目川における河川流量予測結果(日平均値、10年予測結果)

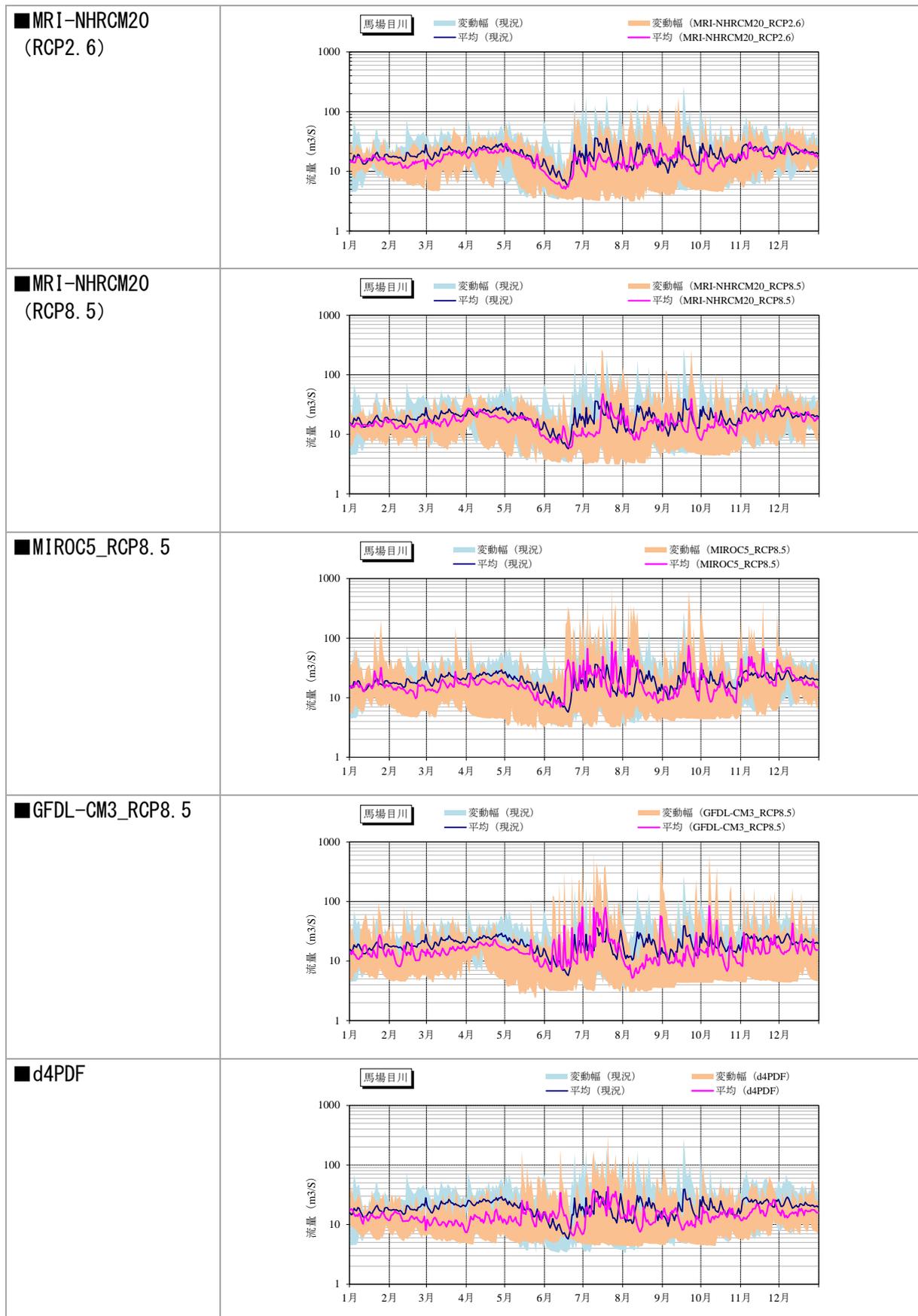


図 6.13 馬場目川における河川流量予測結果(10ヶ年平均・変動幅)

※10年間のシミュレーション(連続計算)結果の各年の1月1日~12月31日の10個の計算結果の平均値、最大値、最小値を関化(以下同じ)

## 2) 河川水温

- ・ 将来予測の各ケースにおける将来の気温上昇の程度（図 6.1）に応じた変化となっており、現況では年平均（10ヶ年の平均）で12.1℃であるのに対し、将来は12.5～16.1℃と、現況に比べて0.4～4.0℃の上昇となっている。（図 6.14）
- ・ 水温が高い夏期での上昇量が大きくなるケース、夏期よりも秋期～春期の上昇が大きくなるケースがある。（図 6.16）
- ・ 夏期の水温について、現況では30℃を超えることはないが、将来は10ヶ年中5～10ヶ年で30℃を超え、1つのケースでは、10ヶ年中4ヶ年で35℃を上回る結果となった。（図 6.15、図 6.16）

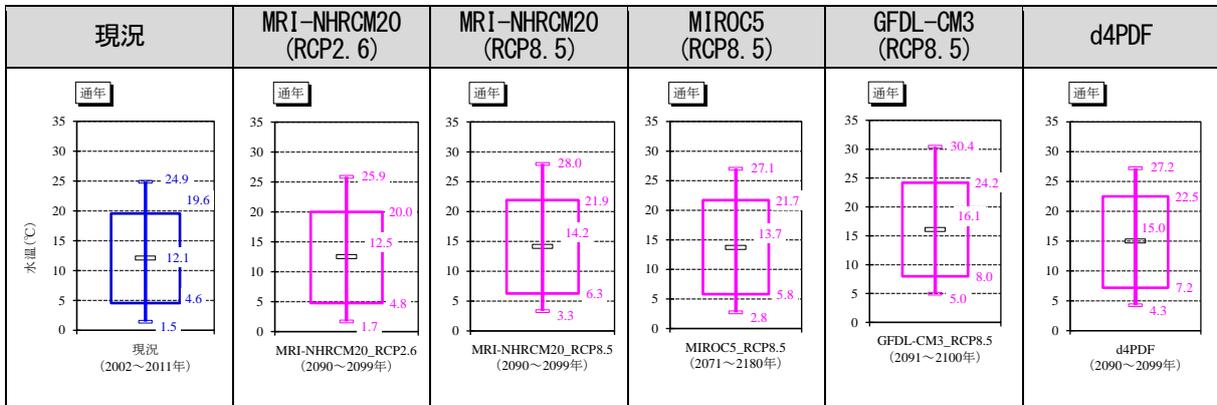
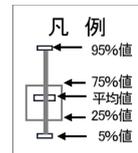


図 6.14 馬場目川における通年の水温変化



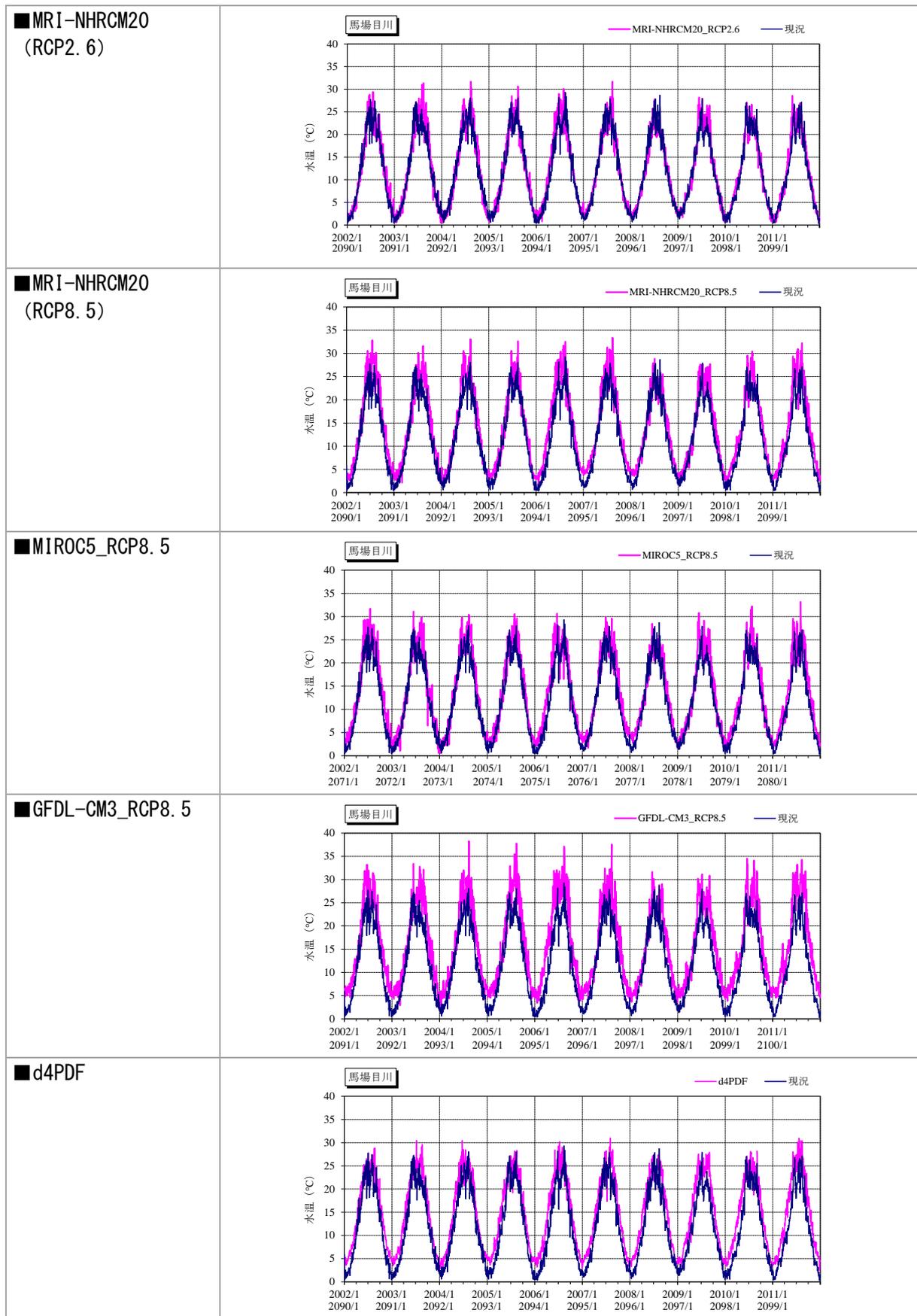


図 6.15 馬場目川における河川水温予測結果(日平均値、10年予測結果)

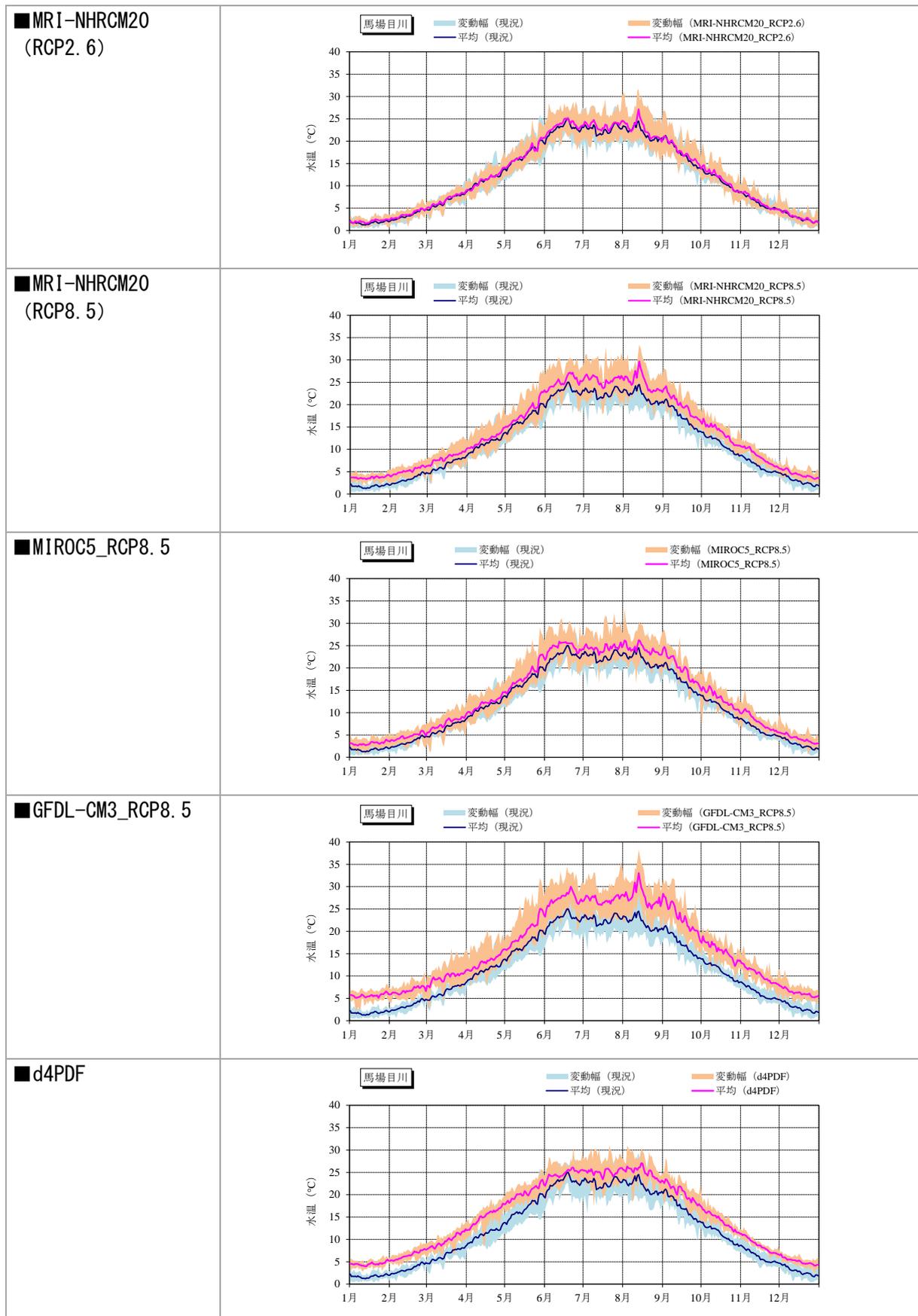


図 6.16 馬場目川における河川水温予測結果(10ヶ年平均・変動幅)

### 3) 河川水質(窒素・りん)

- T-N 濃度は、将来は、年間を通じて現況とほぼ同程度の濃度と予測された。ケースによって差はあるが、その差は大きくない。(図 6.17、図 6.19)
- T-P 濃度は、将来は、ベースとなる平均的な濃度は現況と概ね同程度であるが、出水期にあたる夏期～秋期において、現況に比べて濃度が高くなる頻度が増加するケースがある。(図 6.18、図 6.20)
- 流域からの負荷の流入は、降雨時に流量が増加し、それに応じた負荷の流入を流域モデルで表現しており、特に T-P については、出水時に濃度が高くなり、より多くの負荷が流入する設定としている(モデルの検証で設定)。将来ケースのうち、MIROC および GFDL については、他のケースに比べて大きな出水の生起頻度が大きくなっている(図 6.4～図 6.9)ことから、それに応じた予測結果になっていると考えられる。

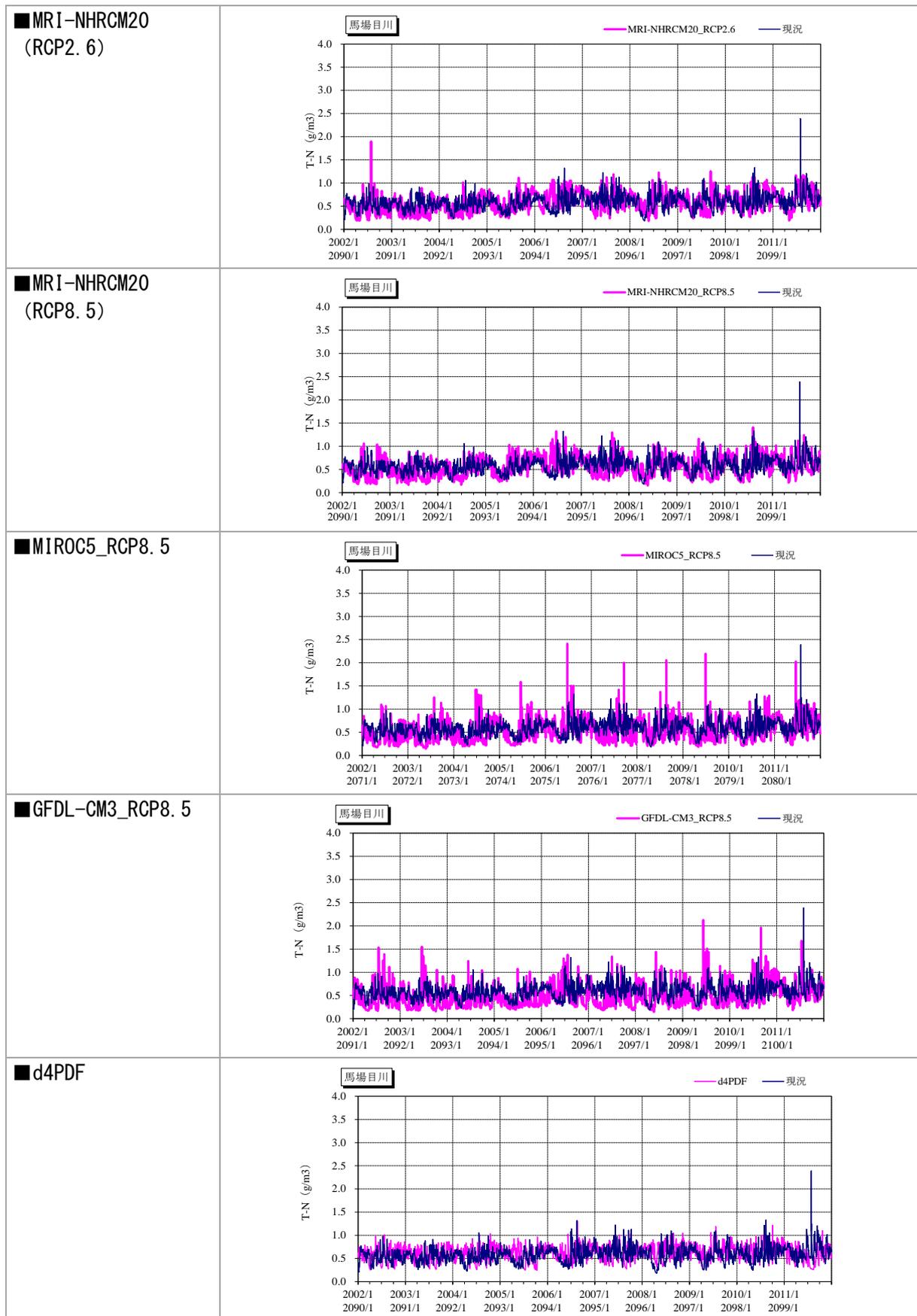


図 6.17 馬場目川における河川水質予測結果(全窒素、日平均値、10年予測結果)

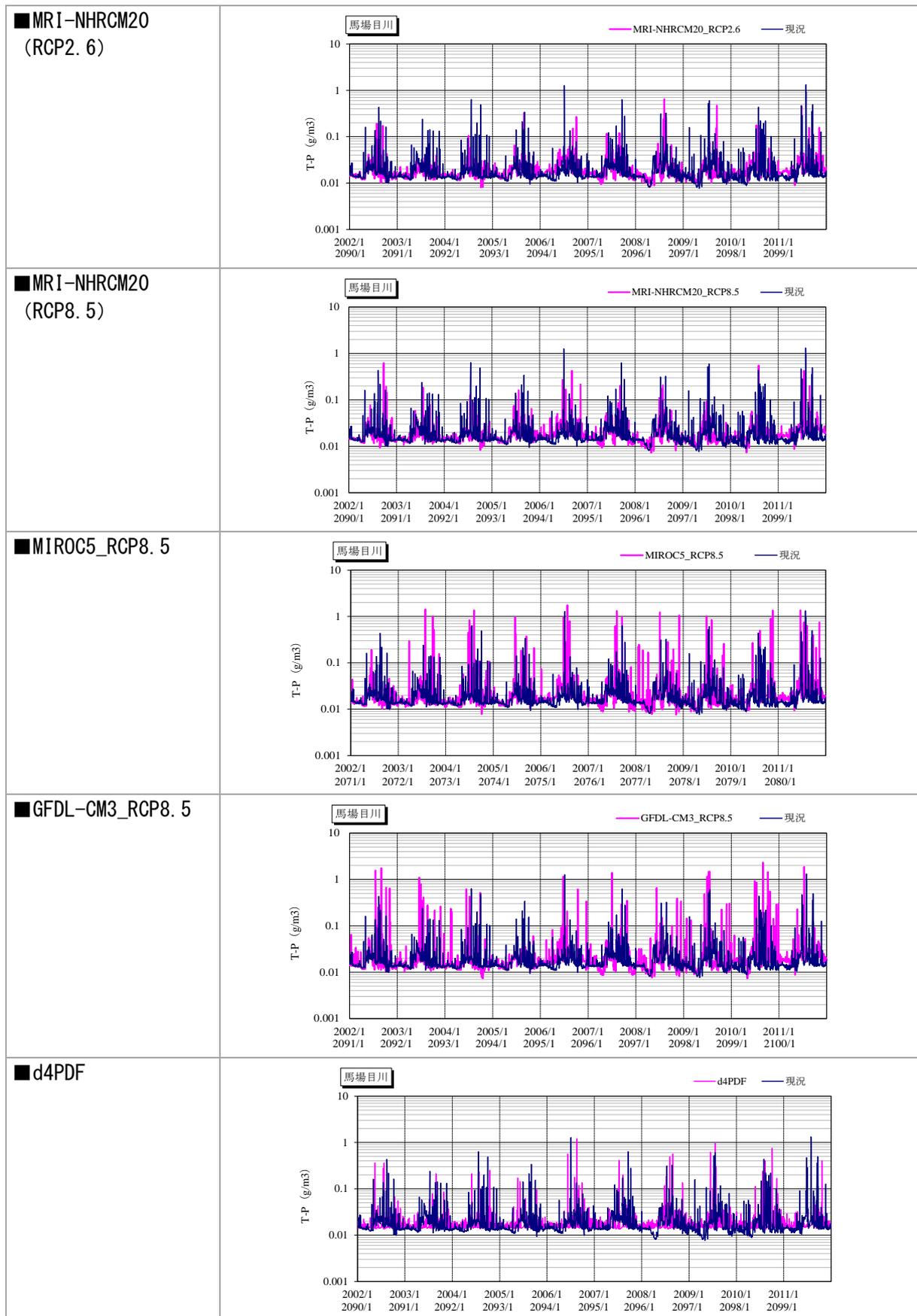


図 6.18 馬場目川における河川水質予測結果(全りん、日平均値、10年予測結果)

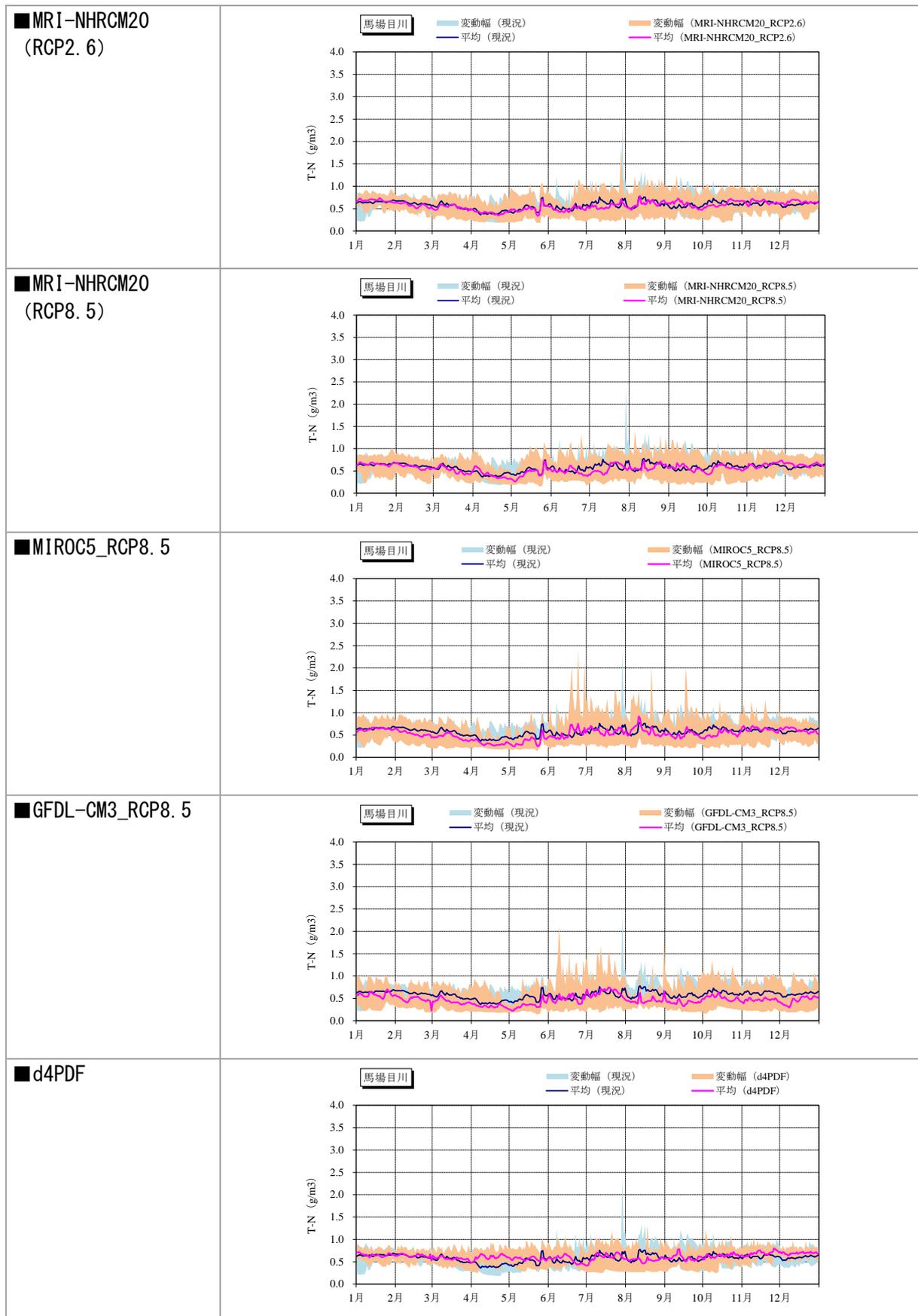


図 6.19 馬場目川における河川水質予測結果(全窒素、10ヶ年平均・変動幅)

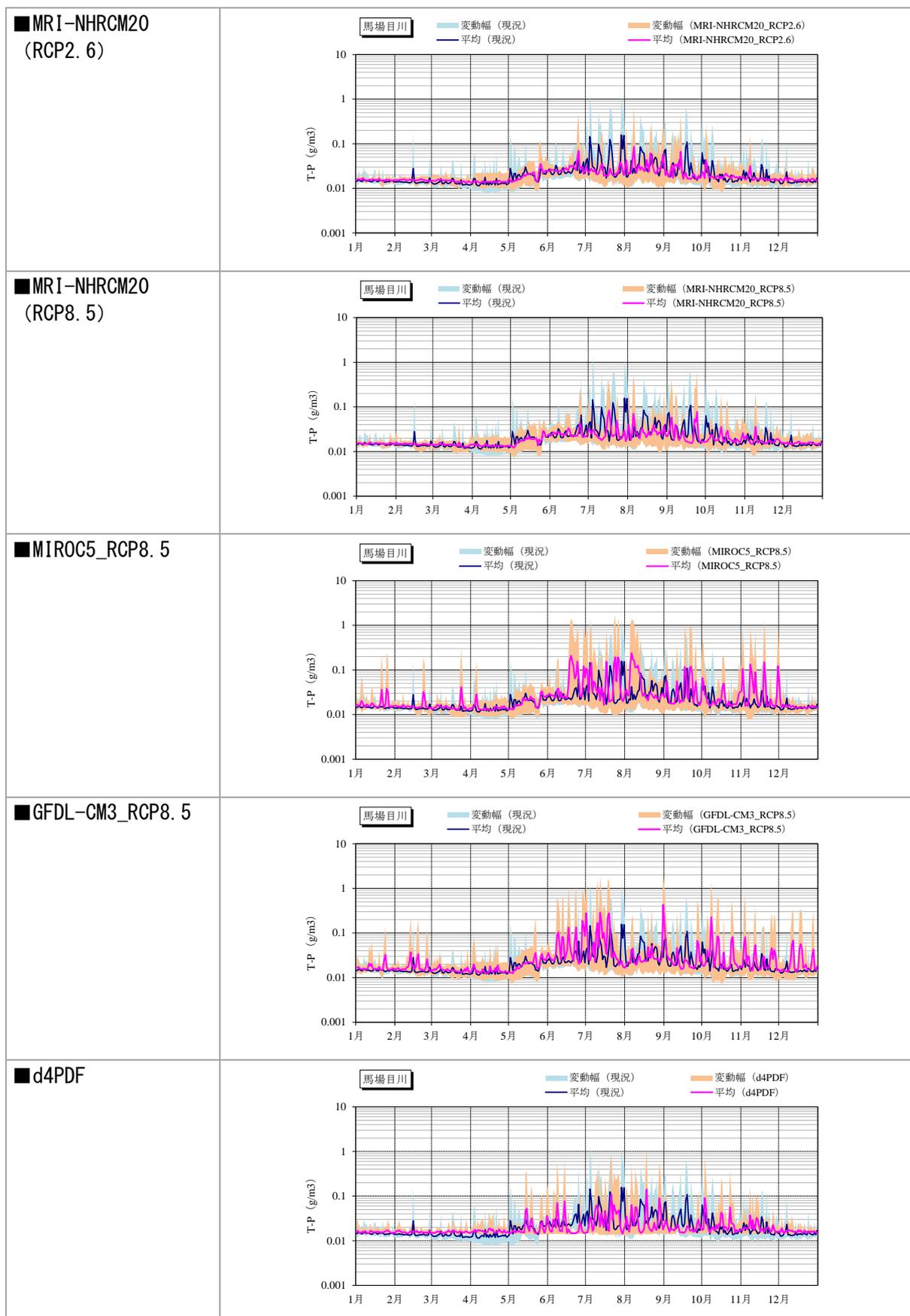


図 6.20 馬場目川における河川水質予測結果(全りん、10ヶ年平均・変動幅)

#### 4) 河川からの流入負荷量

##### A) 年流入負荷量のケース毎の比較

河川からの流入負荷量の予測結果を図 6.21 に示す。将来の T-N 負荷量については、将来は全体的にやや減少する傾向である（16%の減少～8%の増加）。また将来のいくつかのケースでは各年のばらつきの幅が大きくなっている。

T-P 負荷量については、ケースによって増減傾向の幅が大きい（41%の減少～183%の増加）。将来の増加が顕著なケースでは、各年のばらつきの幅も大きくなっている。

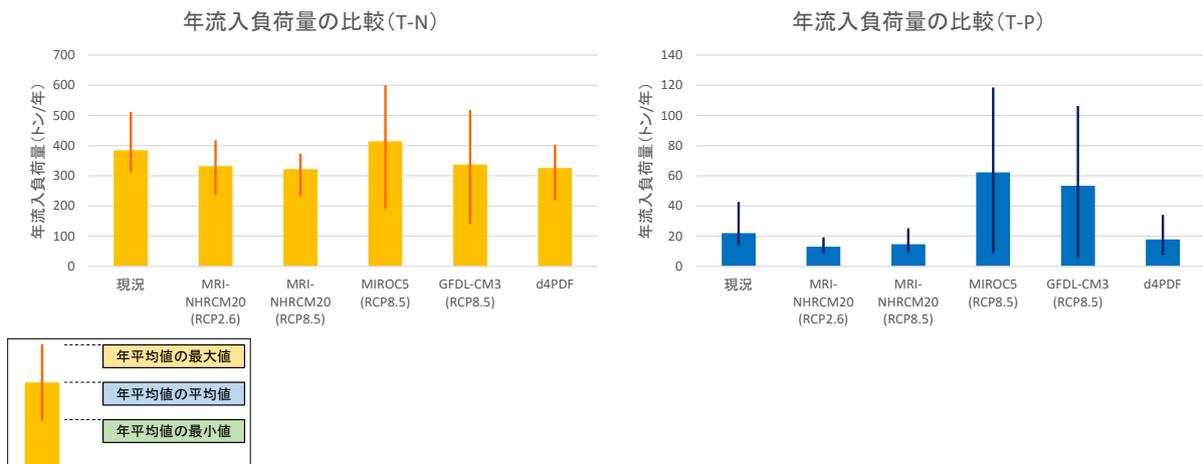


図 6.21 各ケースの流入負荷量の比較(馬場目川)

## B) ケース毎の負荷量(日負荷量, 年負荷量)の比較

各ケースにおける日・年の負荷量について、図 6.22～図 6.27 に示す。MIROC、GFDL においては、年によって大きな差が見られる。これは出水の生起状況に対応している。

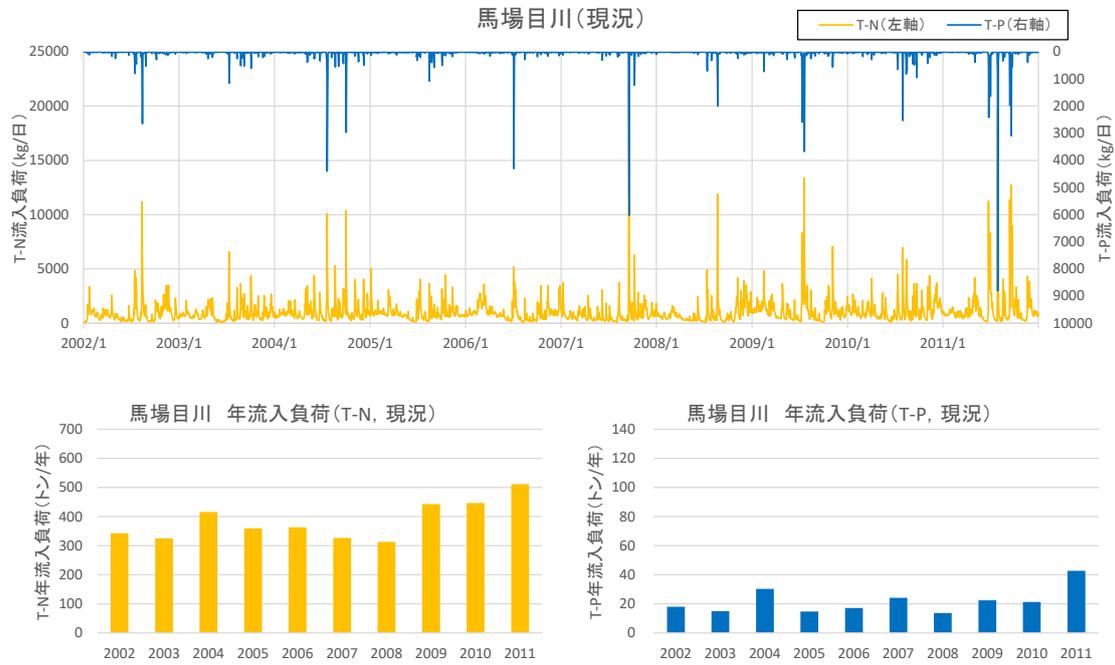


図 6.22 流入負荷量(馬場目川, 現況)

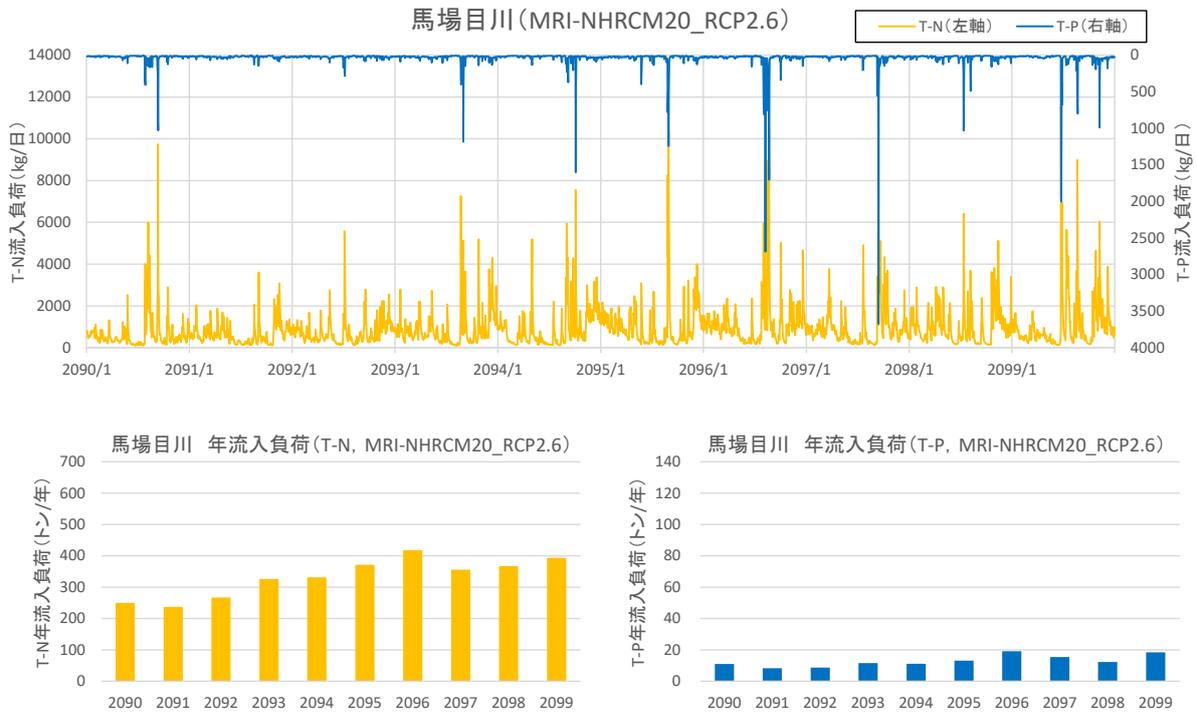


図 6.23 流入負荷量(馬場目川, MRI-NHRCM20\_RCP2.6)

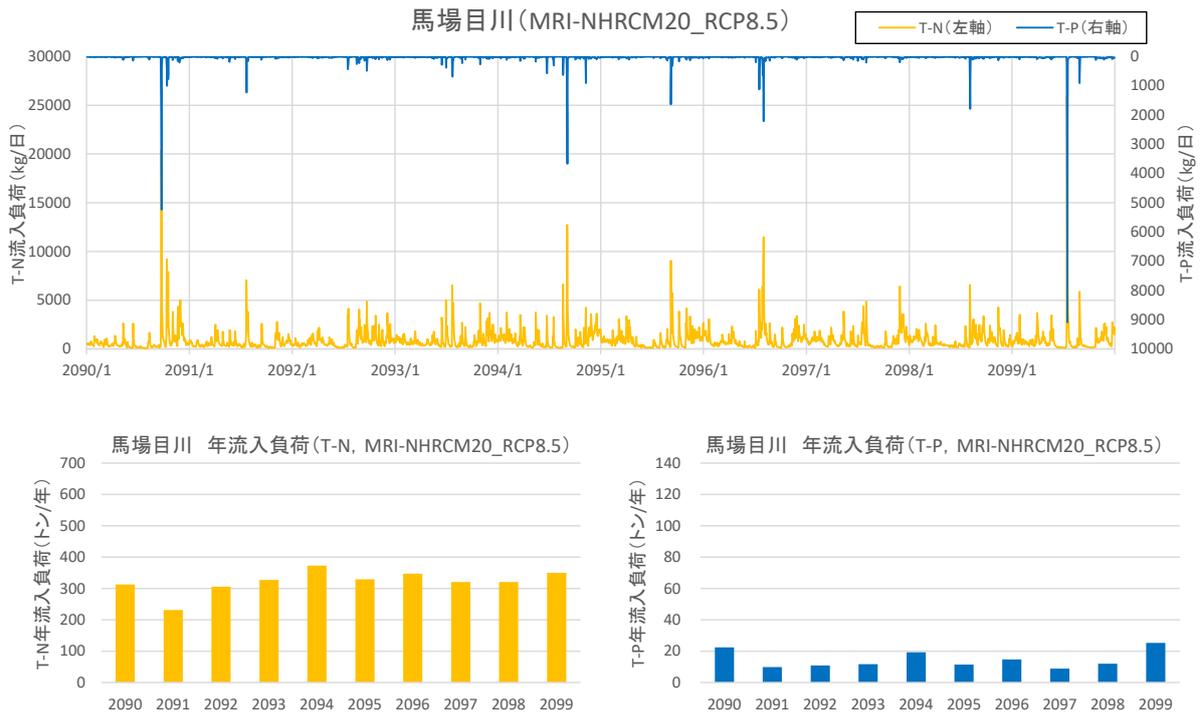


図 6.24 流入負荷量(馬場目川, MRI-NHRCM20\_RCP8.5)

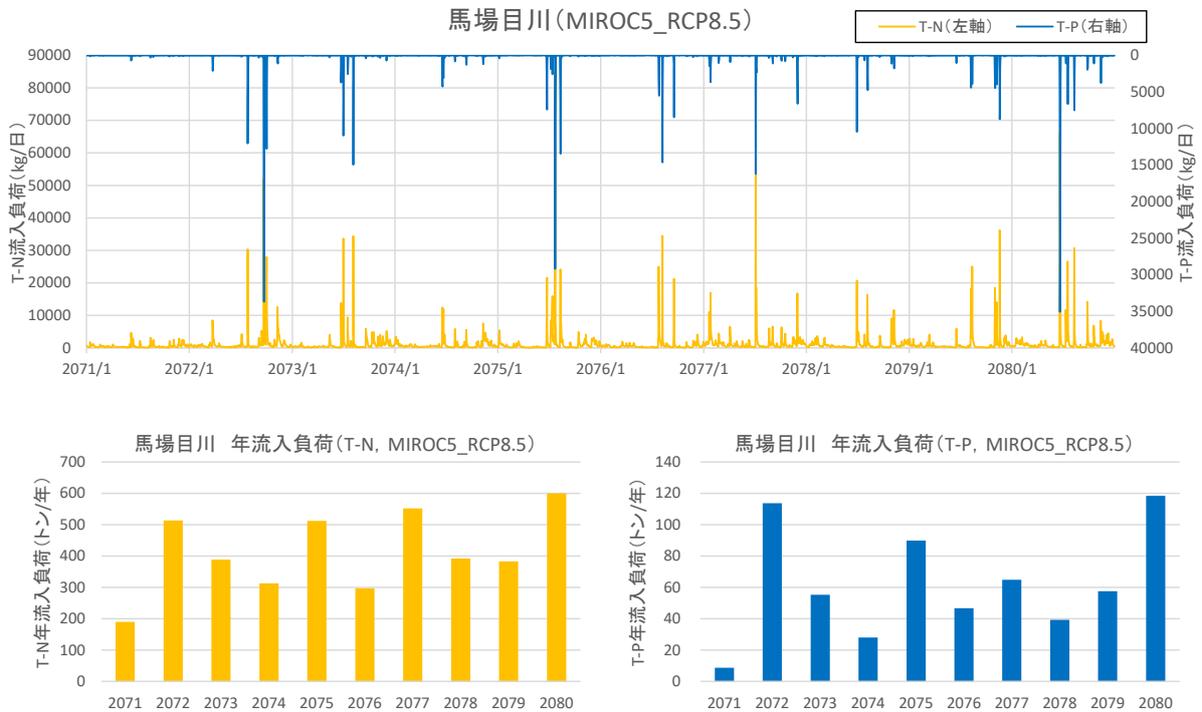


図 6.25 流入負荷量(馬場目川, MIROC5\_RCP8.5)

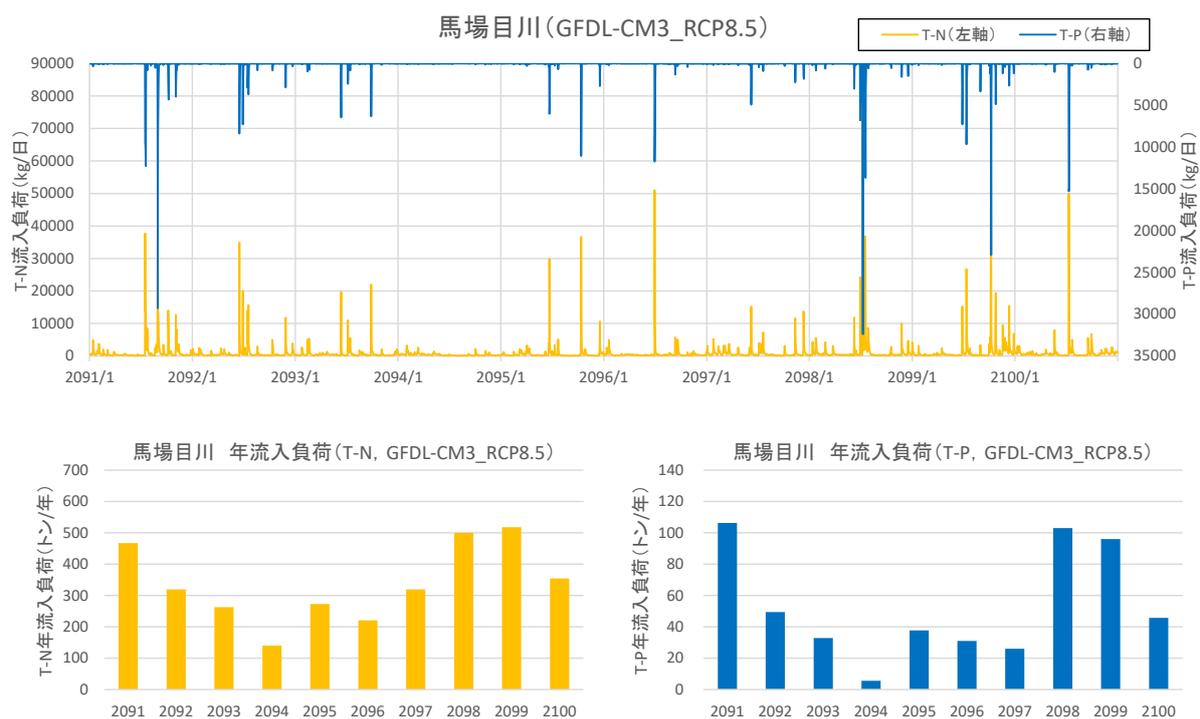


図 6.26 流入負荷量(馬場目川, GFDL-CM3\_RCP8.5)

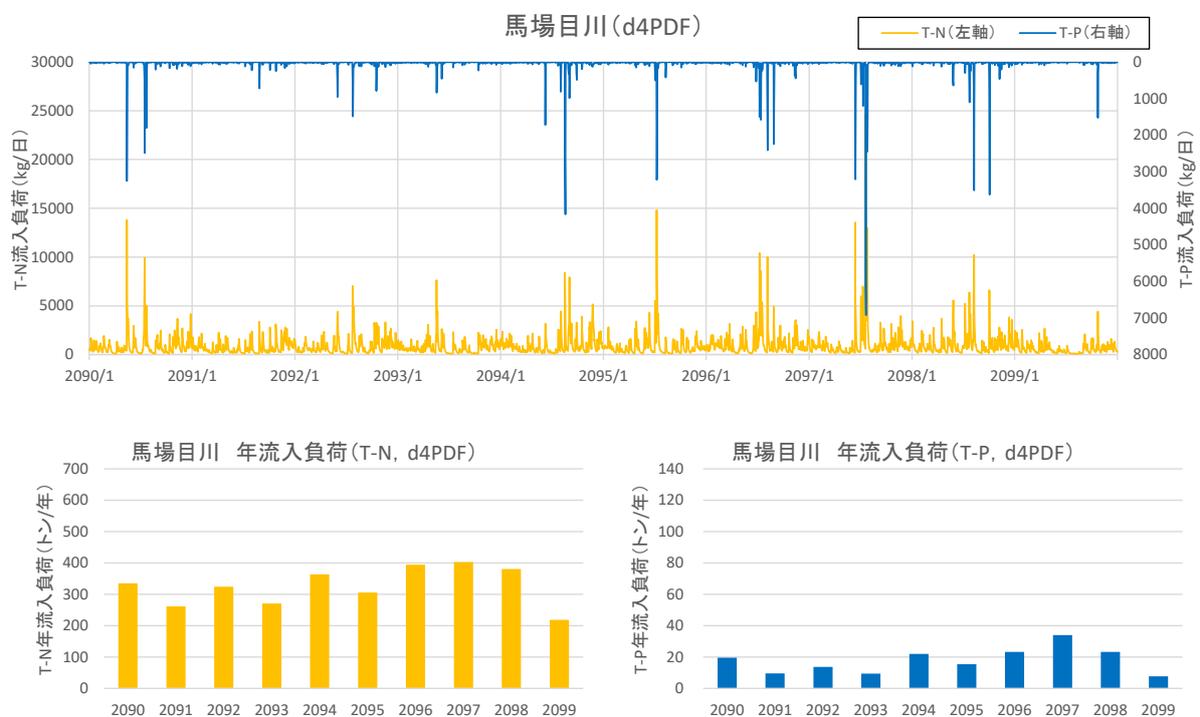


図 6.27 流入負荷量(馬場目川, d4PDF)

## (2) 湖内

### 1) 湖水温

- ・ 将来予測の各ケースにおける将来の気温上昇の程度（図 6.1）に応じた変化となっており、現況では年平均（10ヶ年の平均）で 12.5℃であるのに対し、将来は 12.9～18.1℃と、現況に比べて 0.4～5.6℃の上昇となっている。（図 6.28）
- ・ 水温が高い夏期で上昇がやや大きく、夏期の水温に相当する 75%値では、現況に比べて 0.3℃～5.9℃の上昇と予測された。（図 6.28、図 6.29、図 6.30）

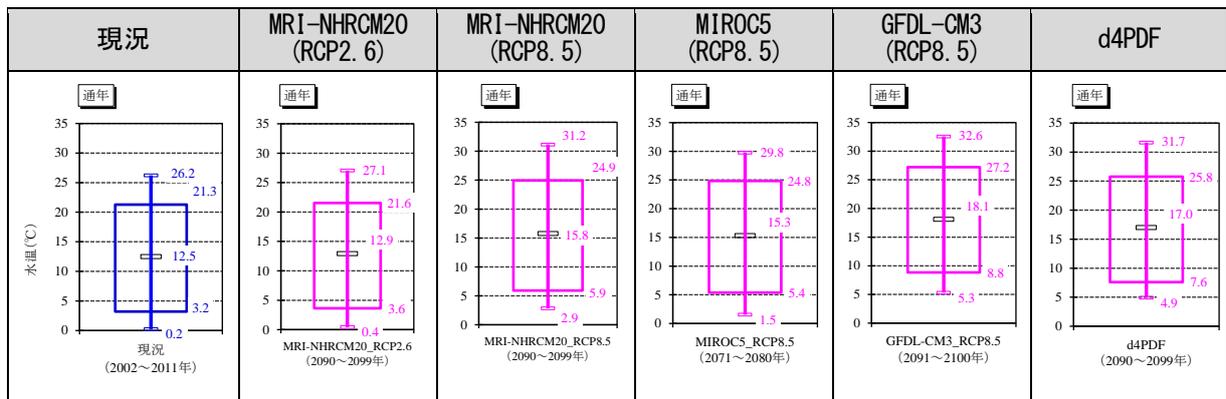
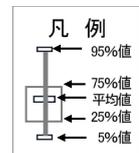


図 6.28 八郎湖湖内の水温変化(調整池, 湖心-表層)



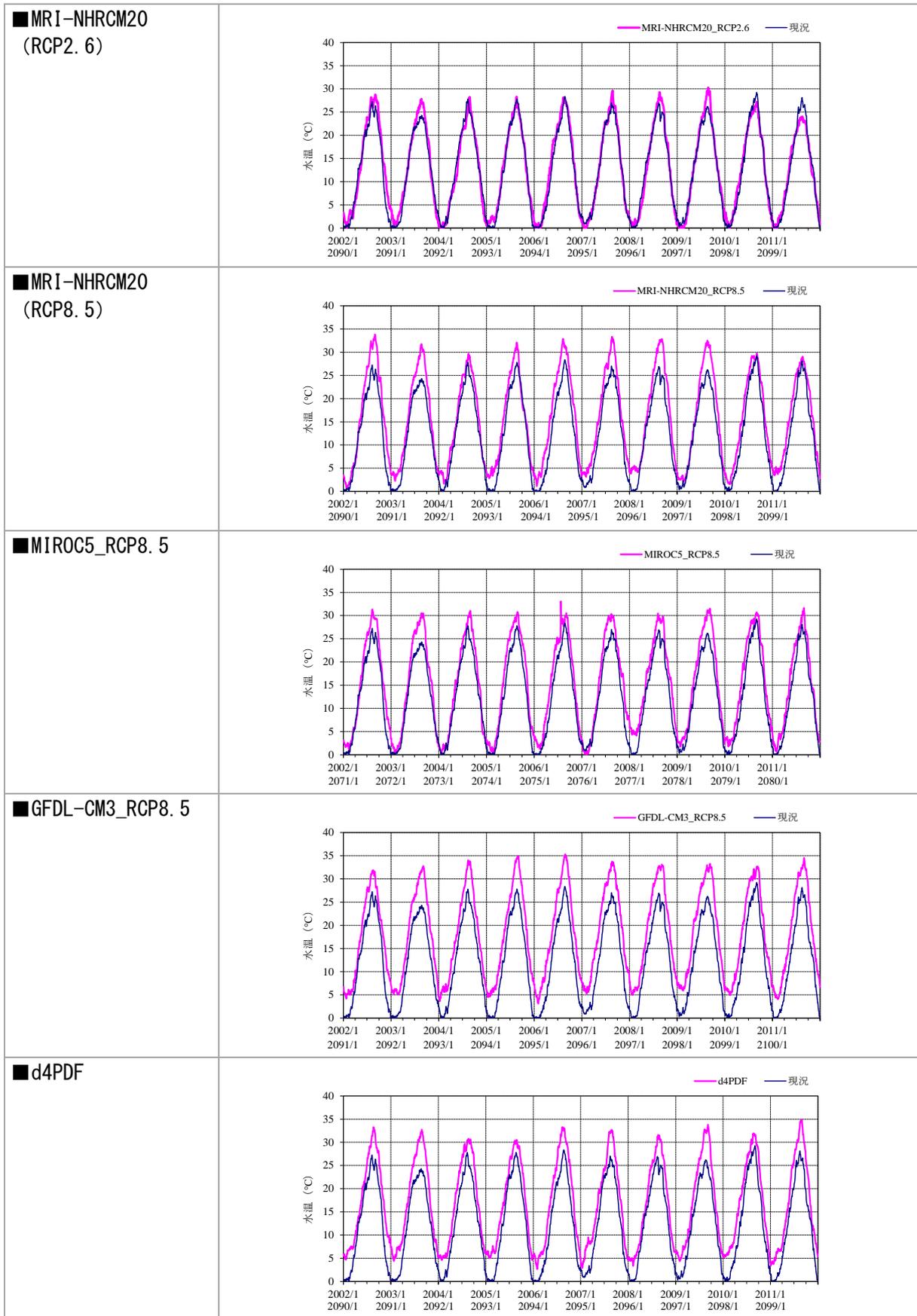


図 6.29 湖内水温予測結果(調整池, 湖心-表層、日平均值、10年予測結果)

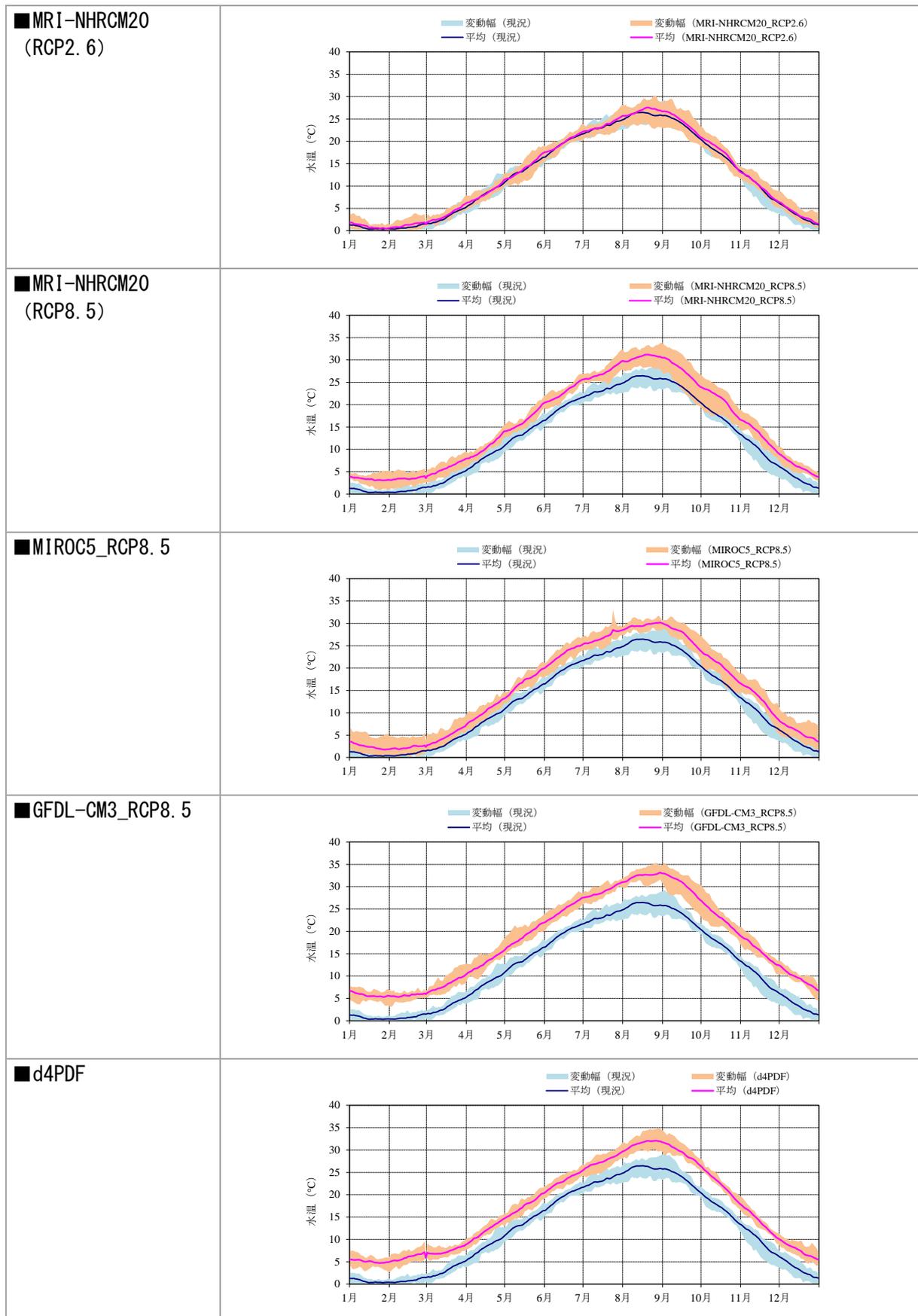


図 6.30 湖内水温予測結果(調整池, 湖心-表層、10ヶ年平均・変動幅)

## 2) 湖水質(クロロフィル a、COD、T-N、T-P の変化)

(図 6.31～図 6.39)

- ・ 将来気候では、水温上昇により植物プランクトンの増殖時期が早まり、春期～夏期に現況より濃度上昇が大きくなる傾向が見られる。また、出水の極端化に伴って負荷の流入が増えることにより内部生産が増え、クロロフィル a の最大値 (10 ヶ年幅の上限) が上昇する傾向が見られる。その結果 (内部生産の結果) COD も同様に上昇する傾向となっている。
- ・ 気温上昇の小さいケース (NHRCM20-RCP2.6) では、年間を通じて平均的にやや増加する傾向が見られる。
- ・ 気温上昇の大きい RCP8.5 相当の 4 ケースについては、水温が上昇した結果、増殖時期が早まり、春期～夏期の濃度上昇が顕著となる傾向が見られる。
- ・ RCP8.5 相当ケースのうち、NHRCM20-RCP8.5、d4PDF の 2 ケースでは、夏期においては濃度の上昇は一定の濃度で頭打ちとなっているのに対し、MIROC、GFDL の 2 ケースについては、同様に頭打ちとなっている年と大きな濃度上昇がみられる年がある。これは、流域からの栄養塩流入量の差によるものと推察される。MIROC、GFDL では、大きな出水が生じた際に栄養塩 (特にりん) 濃度が上昇し、それを基に、植物プランクトン (クロロフィル a) が増加するという現象が生じているものと考えられる。
- ・ 流域からの流入負荷の状況を個別に見ると (図 6.22～図 6.26) 、大きな出水の生起とその時期に対応した変化になっていると考えられる。すなわち、例えば、NHRCM20-RCP8.5 では、2090 年、2099 年において同様に大きな負荷が流入しているが、クロロフィル a は 2099 年においてより顕著に増加している。これは、その時期に起因していると考えられ、増殖が盛んとなる夏期もしくはその前に大きな出水により負荷が流入すると、それを利用して植物プランクトンが増殖するが、秋以降等であれば、大きな負荷が流入してもその影響は限定的であることを示唆するものである。2090 年の流入時期は 9 月下旬となっているのに対し、2099 年は 7 月中旬である。
- ・ 同様に MIROC では、2072 年 (9 月) 、2075 年 (7 月) 、2080 年 (6 月) において大きな負荷が流入しているが、2075 年、2080 年のクロロフィル a の上昇が顕著となっている。
- ・ 環境基準項目である COD、T-N、T-P が将来どの程度変化するかという視点でみると (図 6.39) 、現況に比べて将来ケースでは、COD (75% 値) が約 4～28% 増加すると予測された。また、T-N (年平均値) は、約 13～22% 増加、T-P (年平均値) は、約 4～22% 増加すると予測された。
- ・ 八郎湖の環境基準は、湖沼 A (COD : 3mg/L) 、湖沼 IV (T-N : 0.6mg/L、T-P : 0.05mg/L) であり、現況も含めていずれも環境基準値を超過しているが、今後、環境基準の達成に向け、湖沼水質保全計画による水質改善対策が推進されていくこととなる。将来は、気候変動の影響により、いずれの項目も、現況に比べて将来は増加すると予測されており、環境基準の達成は、より困難になる影響が懸念され、想定以上の水質改善対策の実施が必要になる可能性がある。

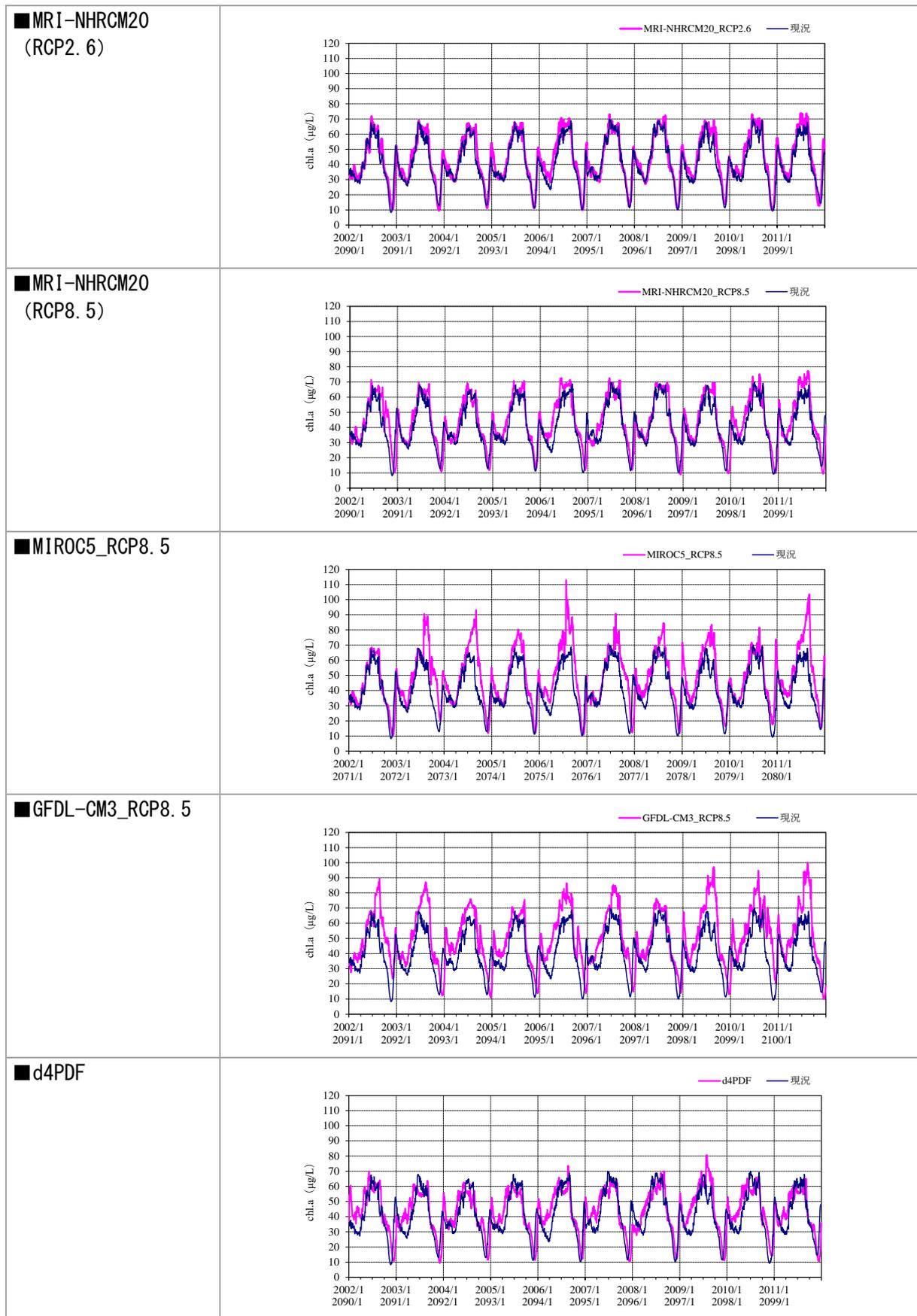


図 6.31 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、Chl.a 日平均値、10年予測結果)

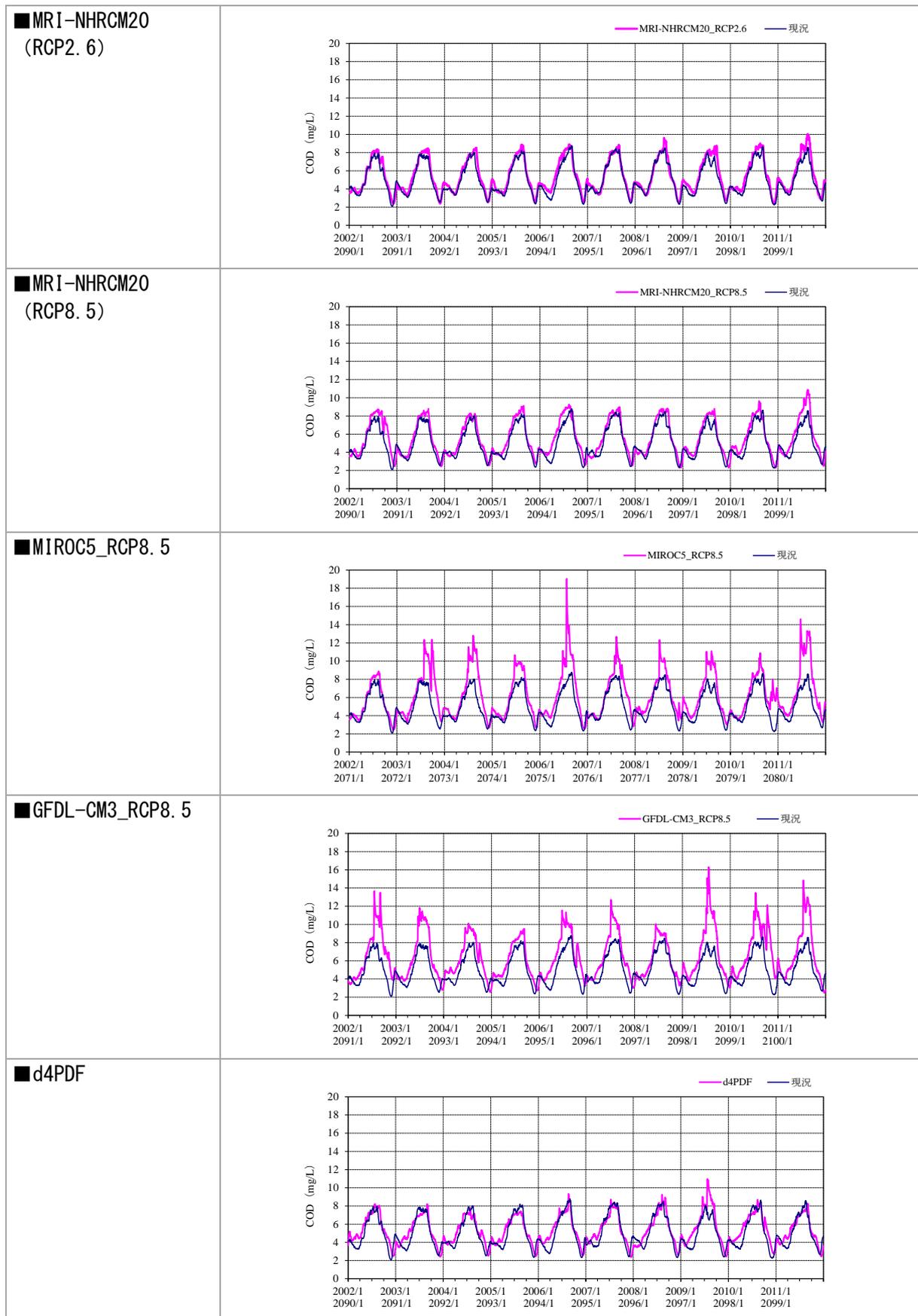


図 6.32 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、COD 日平均値、10 年予測結果)

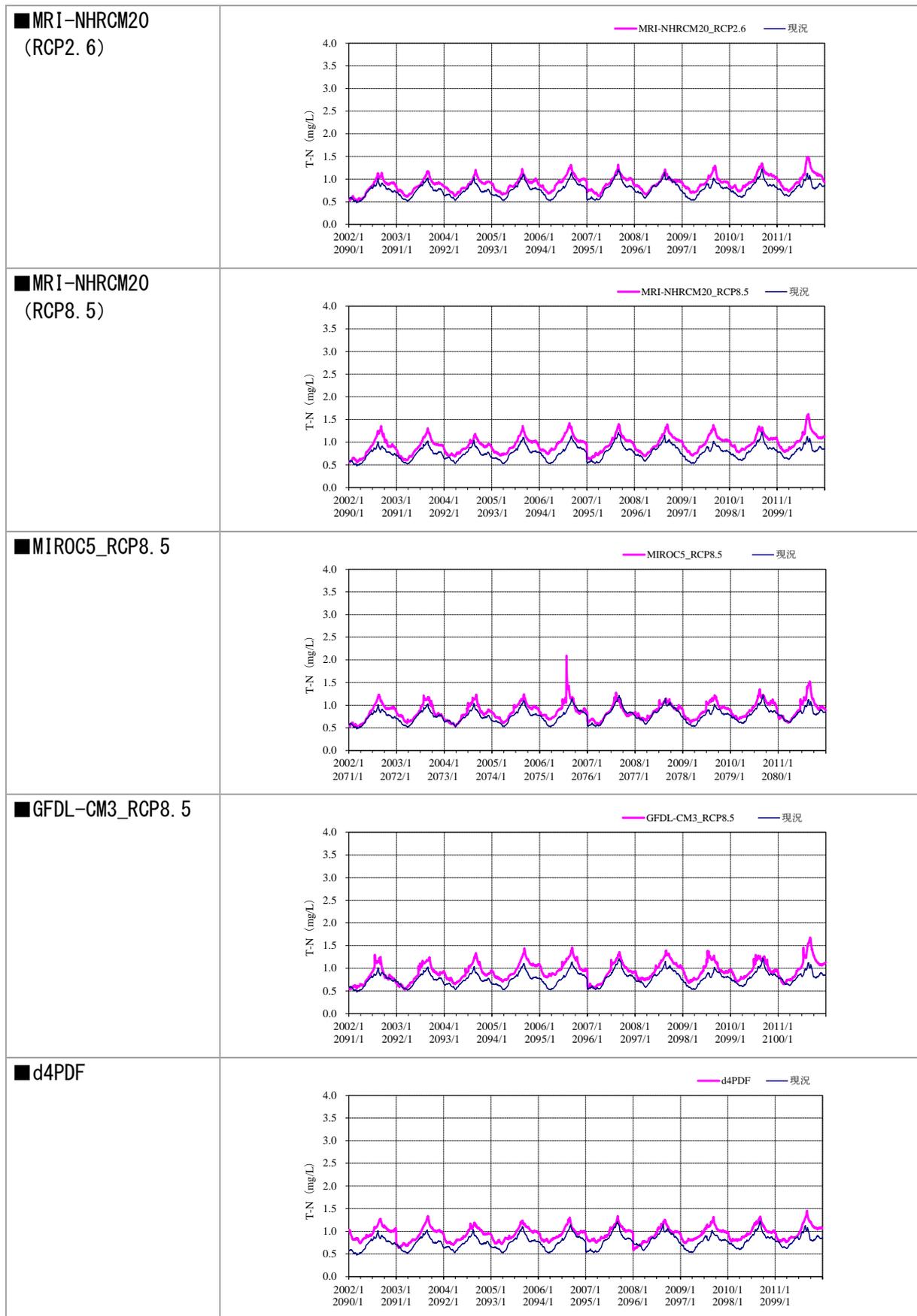


圖 6.33 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、全窒素-日平均值、10年予測結果)

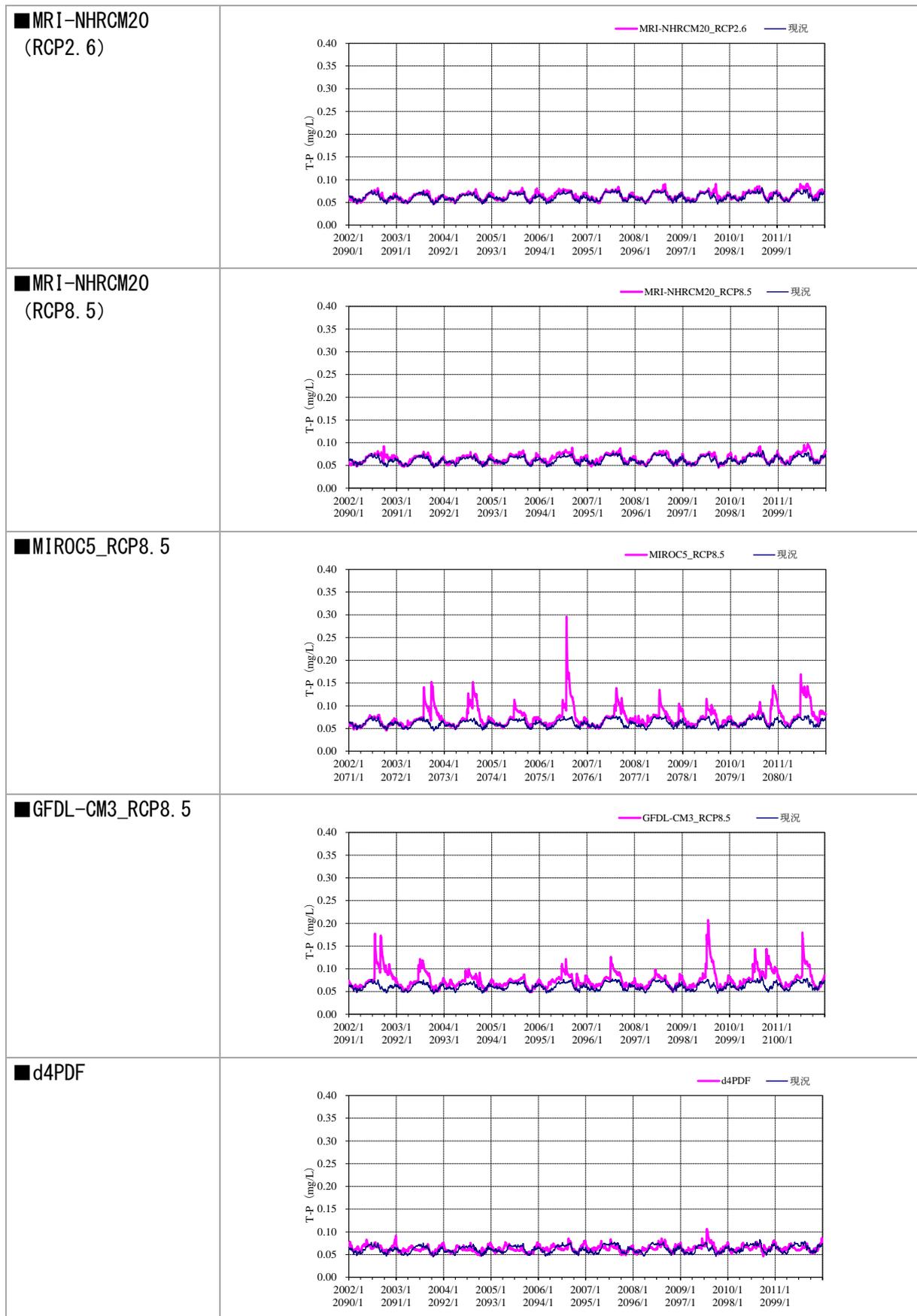


図 6.34 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、全りん-日平均値、10年予測結果)

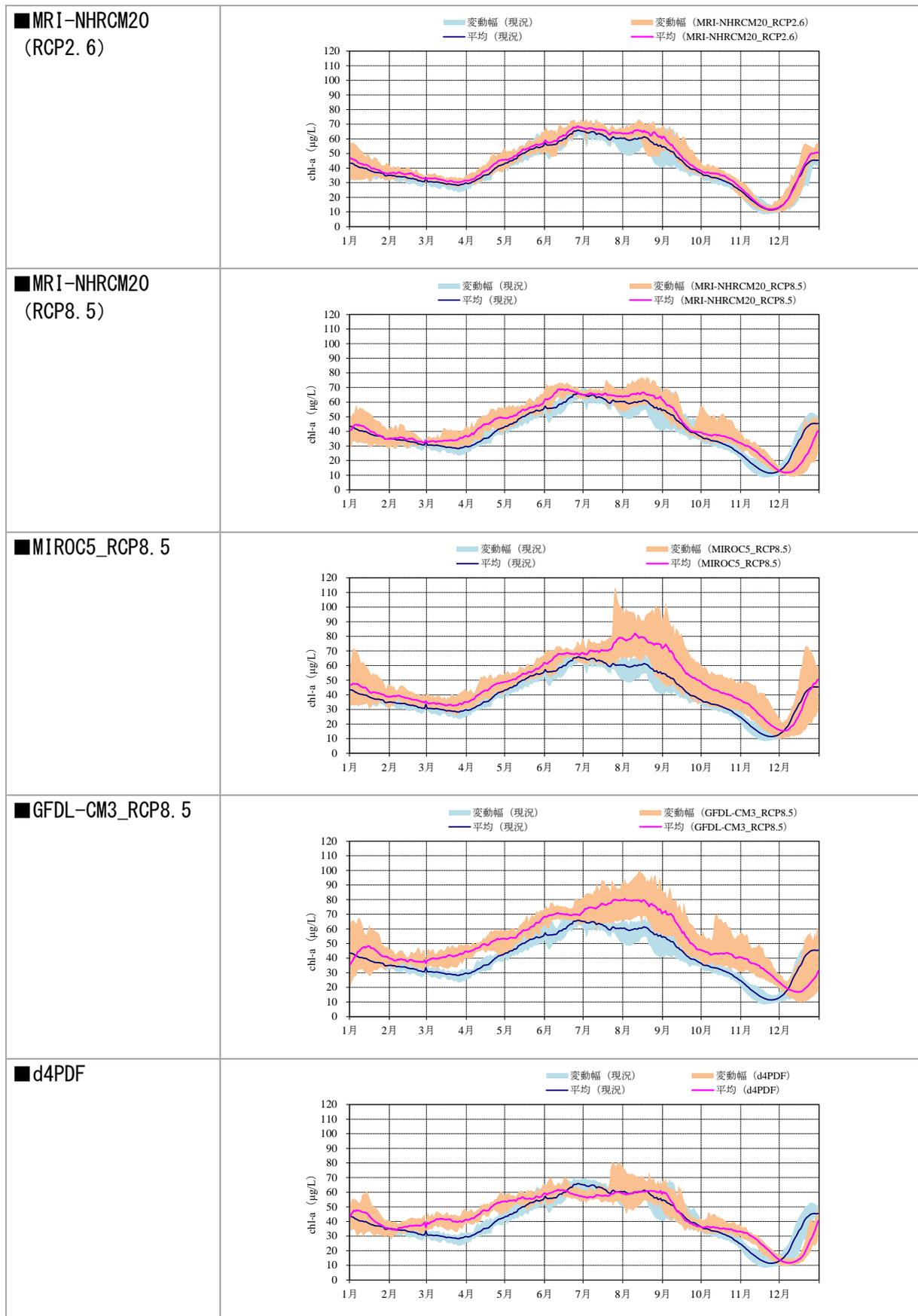


図 6.35 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、Chl.a-10ヶ年平均・変動幅)

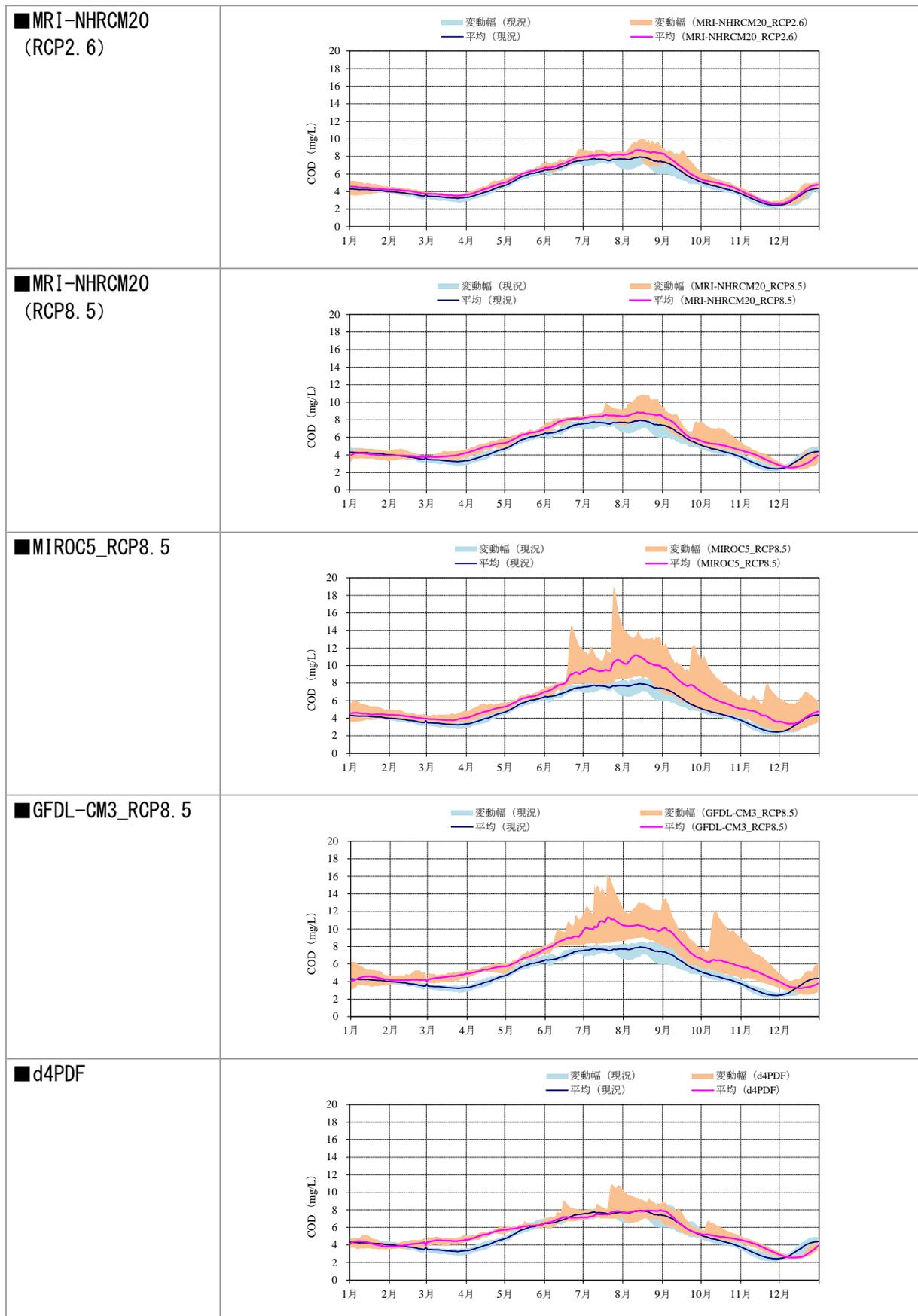


図 6.36 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、COD-10ヶ年平均・変動幅)

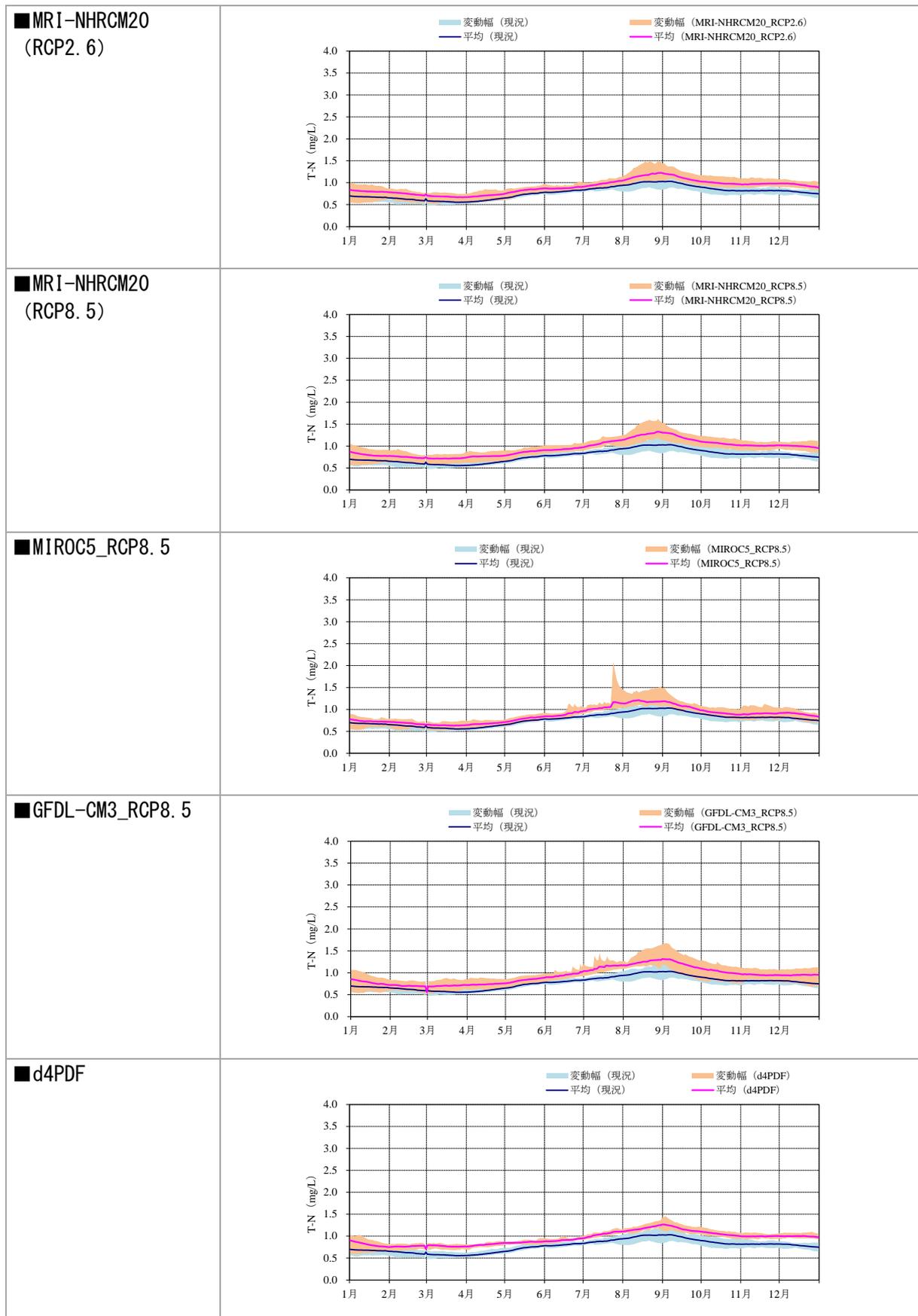


図 6.37 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、全窒素-10ヶ年平均・変動幅)

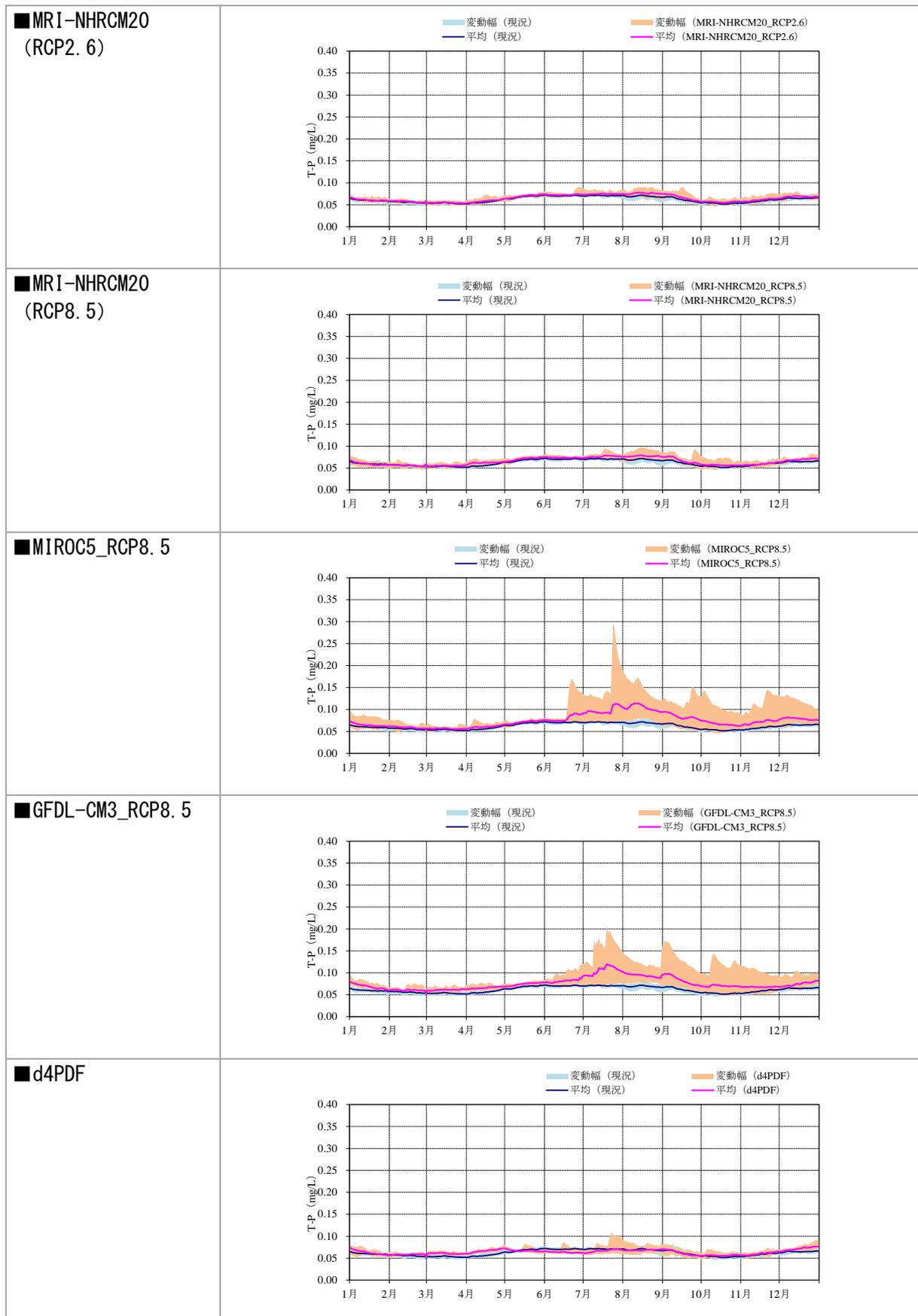
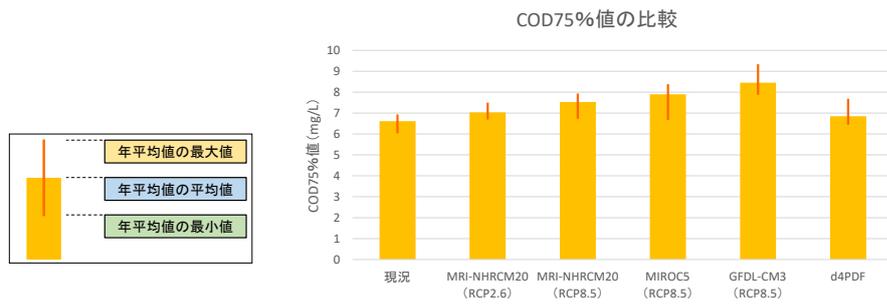
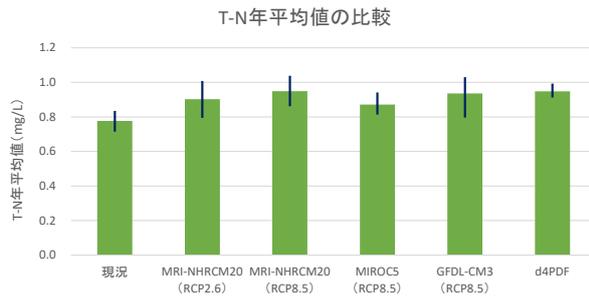


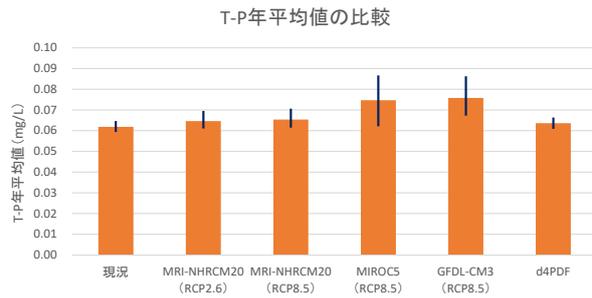
図 6.38 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、全りん-10ヶ年平均・変動幅)



<COD (75%値)>



<T-N (年平均値)>



<T-P (年平均値)>

**図 6.39 将来の環境基準項目の変化(調整池-湖心、表層)**

※注) CODについて環境基準達成評価は全層平均値を用いるが、ここでは変化の傾向を見るため、表層での計算結果を用いて整理している。

### 6.3 影響評価

八郎湖については、表 6.1 に示す検討対象の項目について、水環境系への影響と評価を行った。

表 6.1 八郎湖における評価項目

水環境の変化	影響を評価するための指標	検討対象※
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	—
	②底泥からの窒素、リンの溶出	—
湖水温の上昇	③冷水性魚類等の生息適水温とのずれ	●
	④植物プランクトンの変化	●
	⑤魚類等の生息水深の変化	—
	⑥底泥からの窒素、リンの溶出	●
湖面結氷の変化	⑦湖面結氷の短期化	○
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	●
	⑨春先の栄養塩供給量の減少	●
	⑩春先の融雪水量の減少	●
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	●
	⑫植物プランクトンの変化	●
降水量の減少による平常時流入量の減少	⑬植物プランクトンの変化	※

【検討対象の凡例】

- ：定量評価：気候変動関連性が高く、比較的定量的にその影響がわかりやすく表現できると考えられるもの
- ：定性評価：定量化は困難と考えられるものの気候変動との関連と生物生態系や人に対する影響を定性的に検討しておくことが望ましいと考えられるもの
- ：該当なし
- ※：定量評価の対象としたが、予測結果からは明瞭な影響が認められなかった

## (1) 水温上昇による影響

### 1) 冷水性魚類等の生息適水温とのずれ

八郎湖における主な漁業対象種であるワカサギについて、水温変化の影響を検討した。

#### A) ワカサギ成魚への水温変化の影響

- ・ワカサギの成魚の生息に影響を与えると考えられる水温（30℃）以上となる状況（表 6.2）が、現況では10年間でゼロ日であるのに対し、将来は10年間で2～608日（0.2～61日/年）となり、場合によっては高頻度で生じる可能性が示された。

表 6.2 ワカサギの生息適水温

時期	最適水温域 (℃)	適水温域 (℃)	生存可能範囲	
			下限 (℃)	上限 (℃)
産卵期	6～7	5～10	—	—
ふ化期	—	5～17.5	—	—
成魚期	—	0～30	0	30

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)

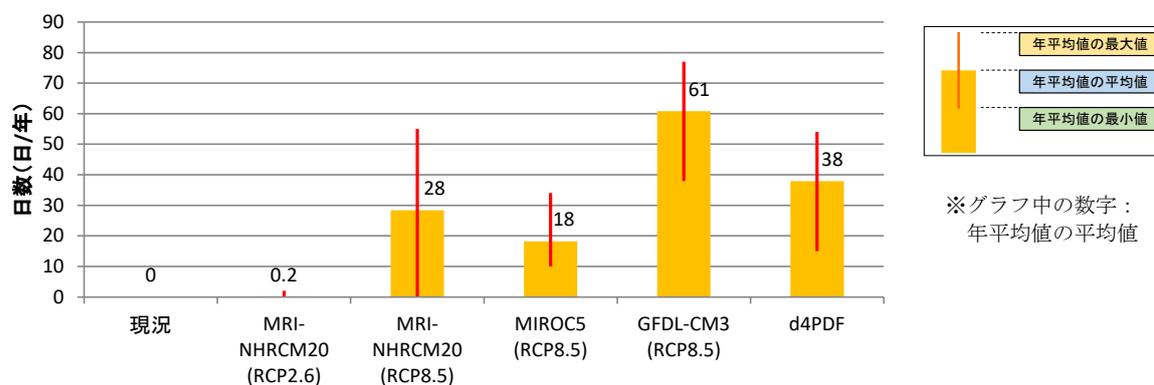


図 6.40 八郎湖湖心の表層水温が 30℃以上となる日数

全国的にみてワカサギの漁獲が比較的多い都道府県の状況を見ると、湖沼の存在状況や当該都道府県に存する湖沼の特性との関連も考えられるが、比較的北に偏っており、冷水を選好していることがうかがえる。

秋田県に次ぐ漁獲量のある茨城県は霞ヶ浦での漁獲が主と考えられることから、過去の八郎湖と霞ヶ浦の水温変化を比較した（図 6.41）。霞ヶ浦の方が、水温が高い傾向はあるものの、夏期においても 30℃を頻繁に上回ったり、顕著に上回ったりする傾向は見られない。

過去の水生生物保全環境基準類型指定専門委員会（環境省）においては、ワカサギは水温の適応範囲が広いこと及び生息分布の情報を踏まえ、冷水性の水生生物としてはあえて分類していないが、夏の高温はこの魚にとっては好ましい環境ではないとされている。

表 6.3 都道府県別のワカサギ漁獲量の比較

都道府県	わかさぎ漁獲量 (トン, H29)
全 国	943
都道府県 (降順)	
青 森	419
北 海 道	214
秋 田	155
茨 城	92
長 野	9
大 分	7
福 岡	4
福 島	1
新 潟	1

出典：平成 29 年漁業・養殖業生産統計

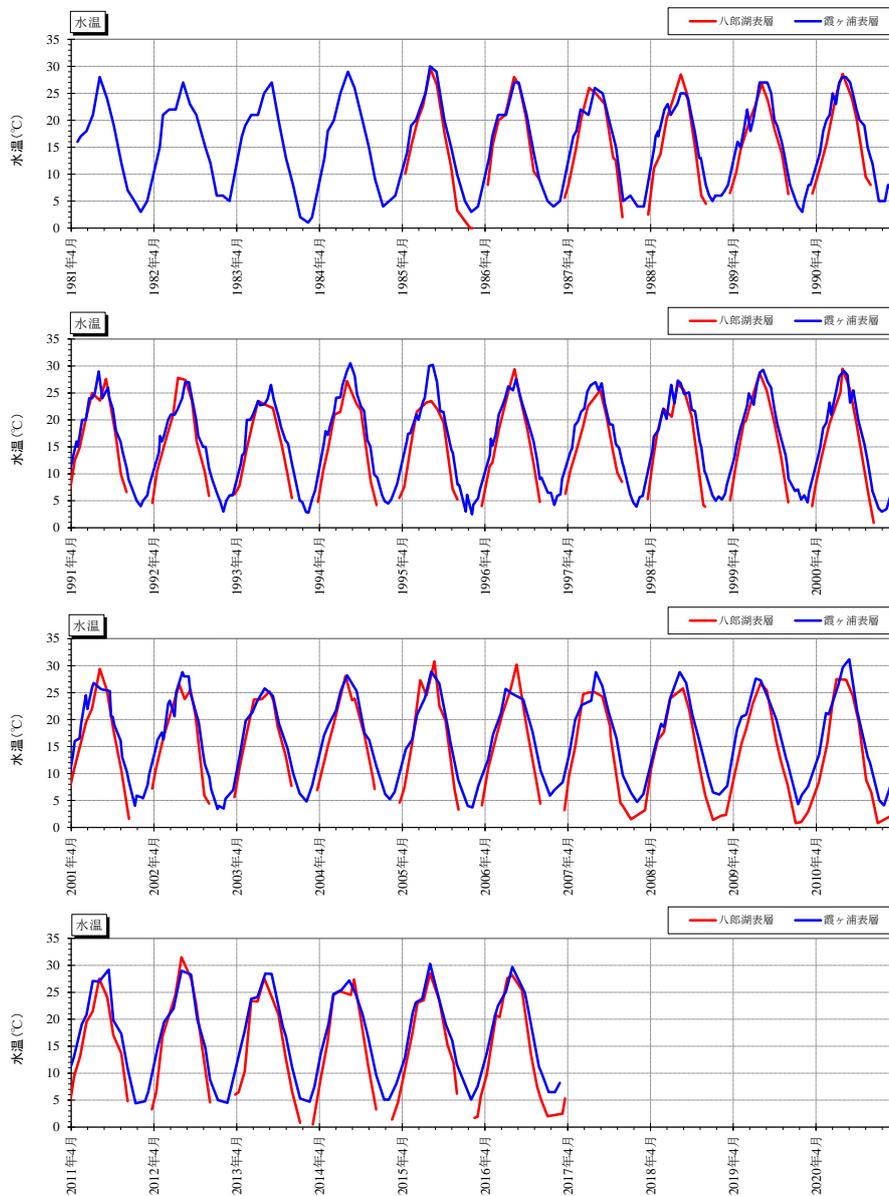


図 6.41 八郎湖と霞ヶ浦の水温比較

## 2) 植物プランクトンの変化

気候変動による植物プランクトン量の変化を検討するため、モデル解析項目のクロロフィル a 濃度を用いて整理した。

### A) 最大値(10年間の予測期間の最大値)の変化

- ・植物プランクトンが存在すること自体は問題ではなく、異常増殖することがアオコ等の水質問題につながることから、クロロフィル a 濃度の最大値に着目した。
- ・水質シミュレーションにおける現況での 10 年間の最大濃度は  $70 \mu\text{g/L}$ 、将来は  $74\sim 113 \mu\text{g/L}$  と 1.05~1.61 倍の濃度になると予測された (図 6.42)。
- ・また、現況での 10 年間の最大濃度  $70 \mu\text{g/L}$  に対し、将来この値を上回る回数 (年) は、2~10 回と予測された (図 6.43)。
- ・クロロフィル a 濃度の増加が必ずしもアオコ発生に直結するわけではないが、アオコ発生のリスクは将来増大する可能性がある。
- ・なお、前述の通り、クロロフィル a 最大値の変化には、水温上昇よりも夏期またはそれ以前の流入負荷の増加が効いてくることが示唆される。

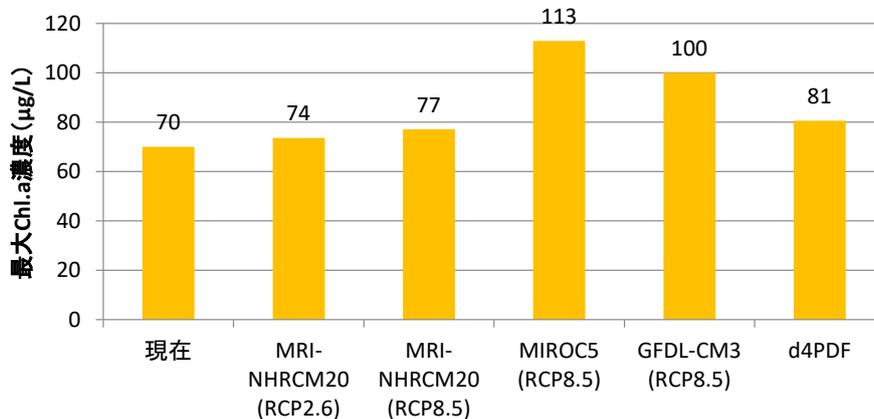


図 6.42 気候モデル・シナリオによるクロロフィル a 最大値(10年間のシミュレーションの最大値)

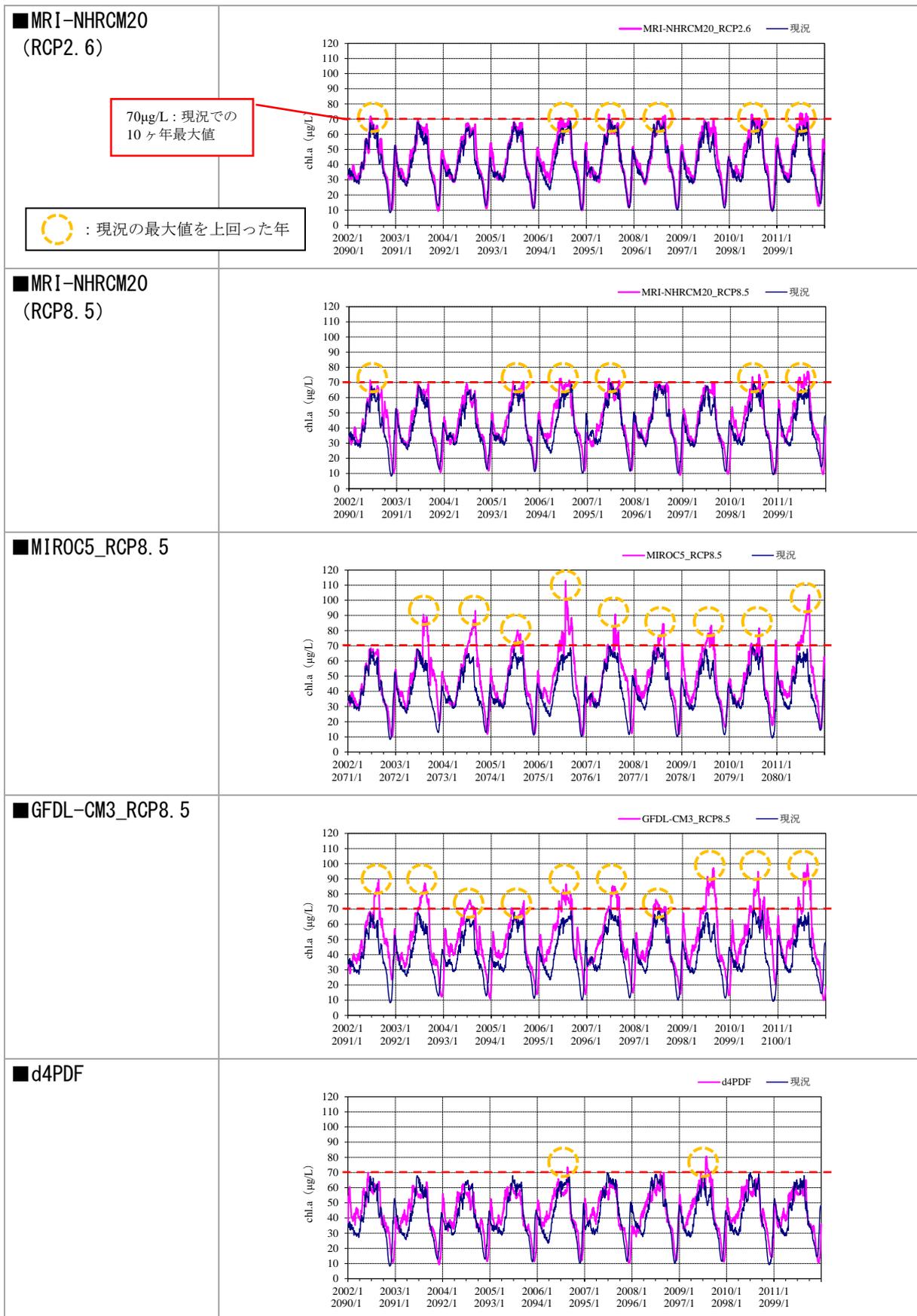
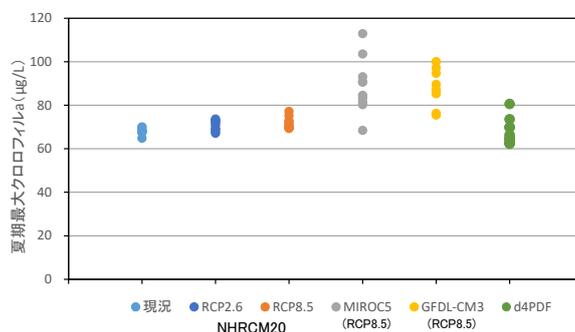


図 6.43 湖内水質予測結果(調整池, 湖心-表層、Chl.a 日平均値、10年予測結果)

## B) クロロフィル a(年最大値)、COD(年平均値, 75%値)の変動範囲

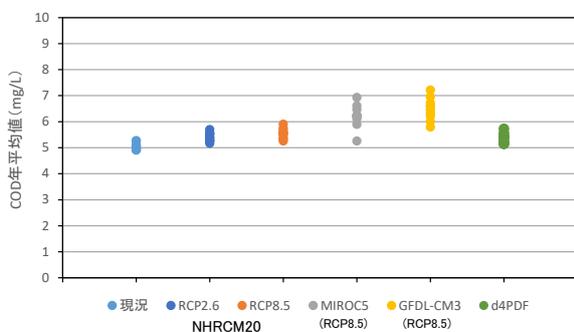
- ・ 現況に比べて将来ケースでは夏期クロロフィル a 濃度が高くなる傾向がみられる。ケース（気候モデルやシナリオ）によって最大値（図 6.42）には幅があるとともに、同じケース内の年毎のばらつきにも差がみられる。
- ・ 図 6.44 の各ケースの各年のクロロフィル a 年最大値の分布を見ると、現況に比べて将来ケースでは、濃度が高くなるとともに、各年の変動幅（値のばらつき）も大きくなる。ケースごとに見ると、MIROC で濃度が最も高くなり、ばらつきも大きい。次いで GFDL で濃度、ばらつきとも大きい。d4PDF では濃度は比較的小さく、ばらつきはやや大きい。NHRCM20-RCP2.6, 8.5 のケースでは、濃度、ばらつきとも比較的小さい。
- ・ 環境基準項目である COD では、クロロフィル a に比べてばらつきの幅は小さいが、傾向は同様に GFDL が最もばらつきが大きい。また、年平均値に比べて 75%値ではばらつきがやや大きくなる。
- ・ ばらつきが大きくなる要因としては、図 6.1 に示している各ケースの気象状況のばらつきの幅に対応していると考えられ、特に降水量のばらつきが大きいケースでは、水質濃度のばらつきも大きくなる傾向となっている。

気候モデル、シナリオによる違い



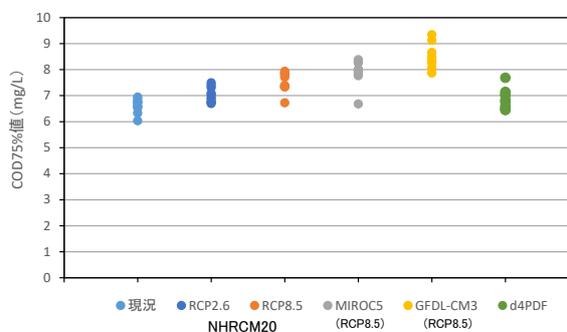
<クロロフィル a (年最大値)>

気候モデル、シナリオによる違い



<COD (年平均値)>

気候モデル、シナリオによる違い



<COD (75%値)>

図 6.44 気候モデル・シナリオによる毎年のクロロフィル a(最大値)COD(平均値、75%値)(10ヶ年)

### 3) 底泥からの窒素、リンの溶出

- ・ 予測結果から、現況と比べて将来では、底泥からの溶出量（湖全体）は、窒素で1～18%、リンで2～21%増加すると予測された。この増加量について、湖に供給される窒素（無機態窒素）、リン（無機態りん）の総負荷量と比べるとそれぞれ0.4～6%、0.5～6%となった（図 6.45）。
- ・ 底泥からの溶出は水温の上昇（図 6.46）とともに多くなることから、水温上昇の程度と対応した結果になっていると考えられる。
- ・ 特に、植物プランクトン量が多くなる8月の時期について見てみると、窒素で2～21%、リンで2～21%増加すると予測された。この増加量について、湖に供給される窒素（無機態窒素）、リン（無機態りん）の総負荷量と比べるとそれぞれ1～9%、1～8%となった。（図 6.45）
- ・ 水温の上昇に伴い底泥からの栄養塩溶出量が増加し、アオコ発生リスクの増加に影響する可能性がある。

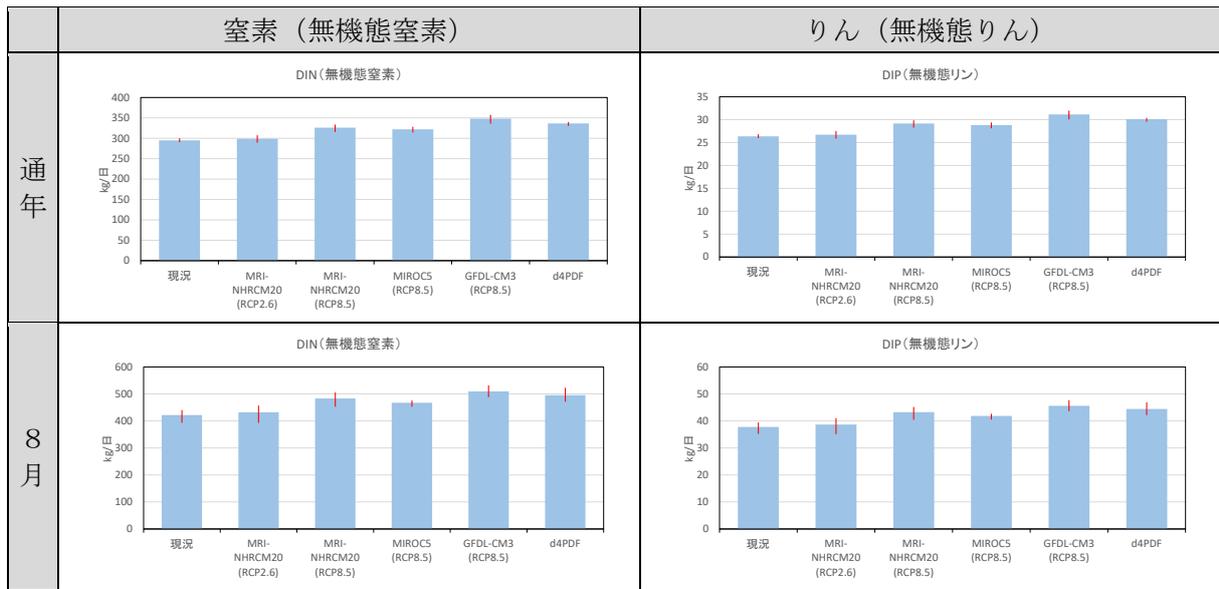


図 6.45 各予測ケースでの湖内の底泥溶出による負荷の比較

※溶出量は、シミュレーションにおける底泥溶出量を経時的に出力し、集計することにより算定

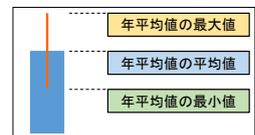
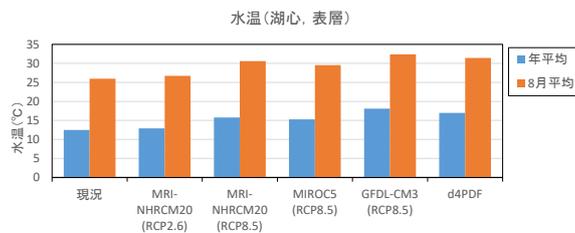


図 6.46 各予測ケースでの湖水温(湖心、表層:予測期間10年間の年平均・8月平均)の変化

## (2) 結氷の変化(湖面結氷の短期化)

- 2001～2014年の八郎湖における結氷の情報を整理した結果、湖面結氷が生じなかった年は2007年のみであった。また、冬期の気温と結氷の有無に一定の関係性があると仮定して分析を行った結果、「日平均気温が0℃を下回る日数」を指標として整理すると、関係が認められた。
- これを踏まえ、将来の気象条件として設定した気候モデル出力値(気温:バイアス補正後)において、「日平均気温が0℃を下回る日数」を評価指標として整理した結果、現況では37日/年であるのに対して、将来は0～29日/年と総じて減少する傾向となり(図6.47、図6.48)、結氷する日数が減少する可能性が示された。

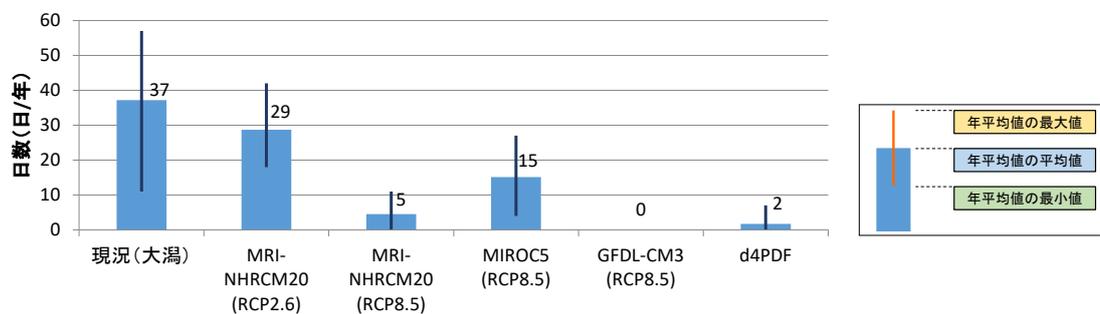


図 6.47 日平均気温が0℃を下回る日数

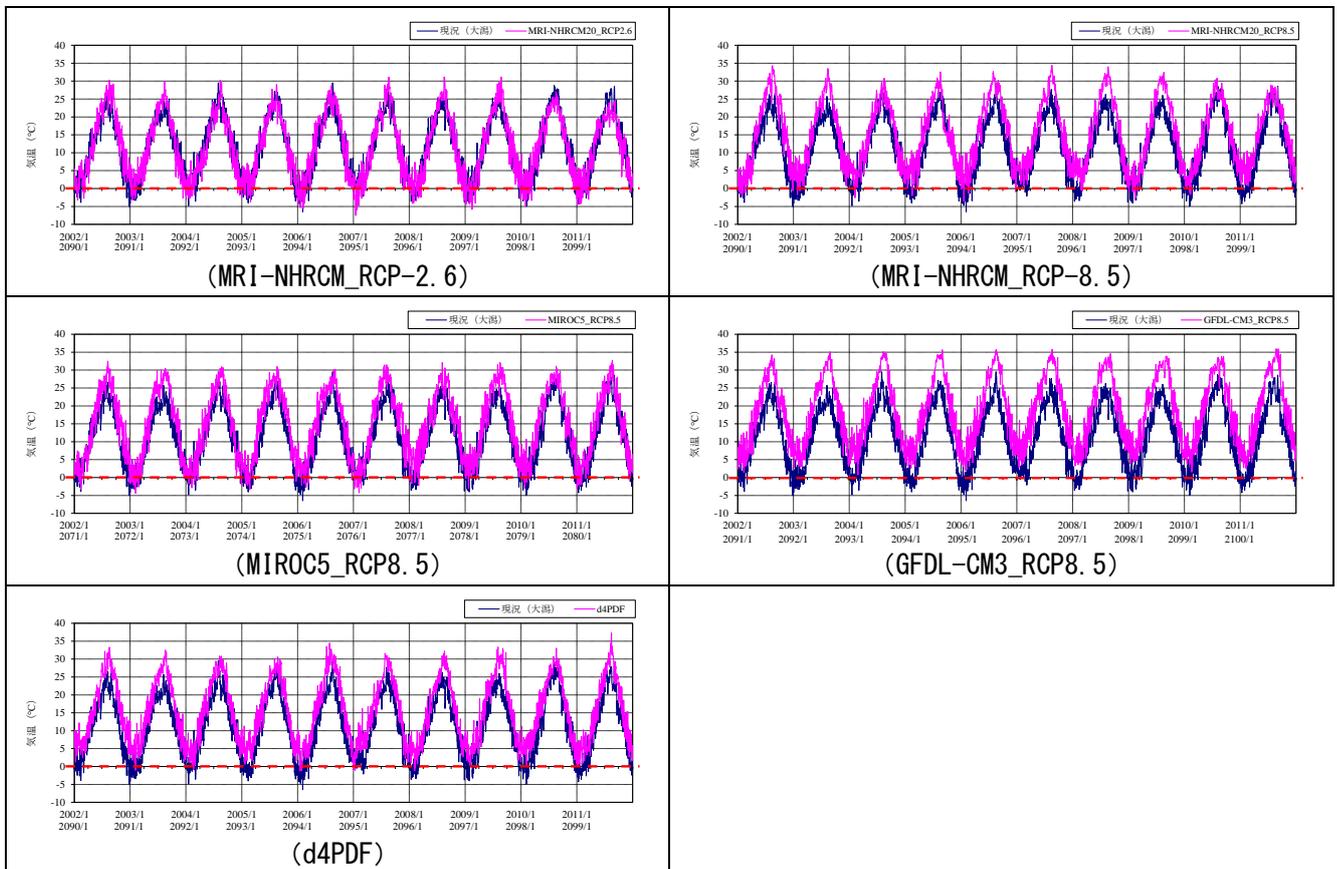


図 6.48 八郎湖における日平均気温の比較(現況:アメダス、将来:気候モデル出力値)

### (3) 融雪時期の変化による流入量・栄養塩供給時期の変化

#### 1) 植物プランクトン発生時期・量の変化

- ・ 以上までに整理した通り、融雪期（3～5月）においては、将来で河川流入量が約12～43%減少（図6.11）し、これによって八郎湖内の回転率が低下する。同時に水温も上昇するため、植物プランクトンは増殖しやすい環境となる。
- ・ 結果、増殖時期が早まり、春期～夏期の濃度上昇が現況よりも増加している。また、夏期から秋期にかけてクロロフィル a 濃度の低下していく時期においては、水温低下の時期が遅くなるのに伴い、クロロフィル a の低下する時期も遅くなる。（図6.49）
- ・ 予測結果を踏まえると、クロロフィル a 濃度の増加が必ずしもアオコ発生に直結するわけではないが、アオコ発生のリスクがある期間は、将来長くなる可能性がある。

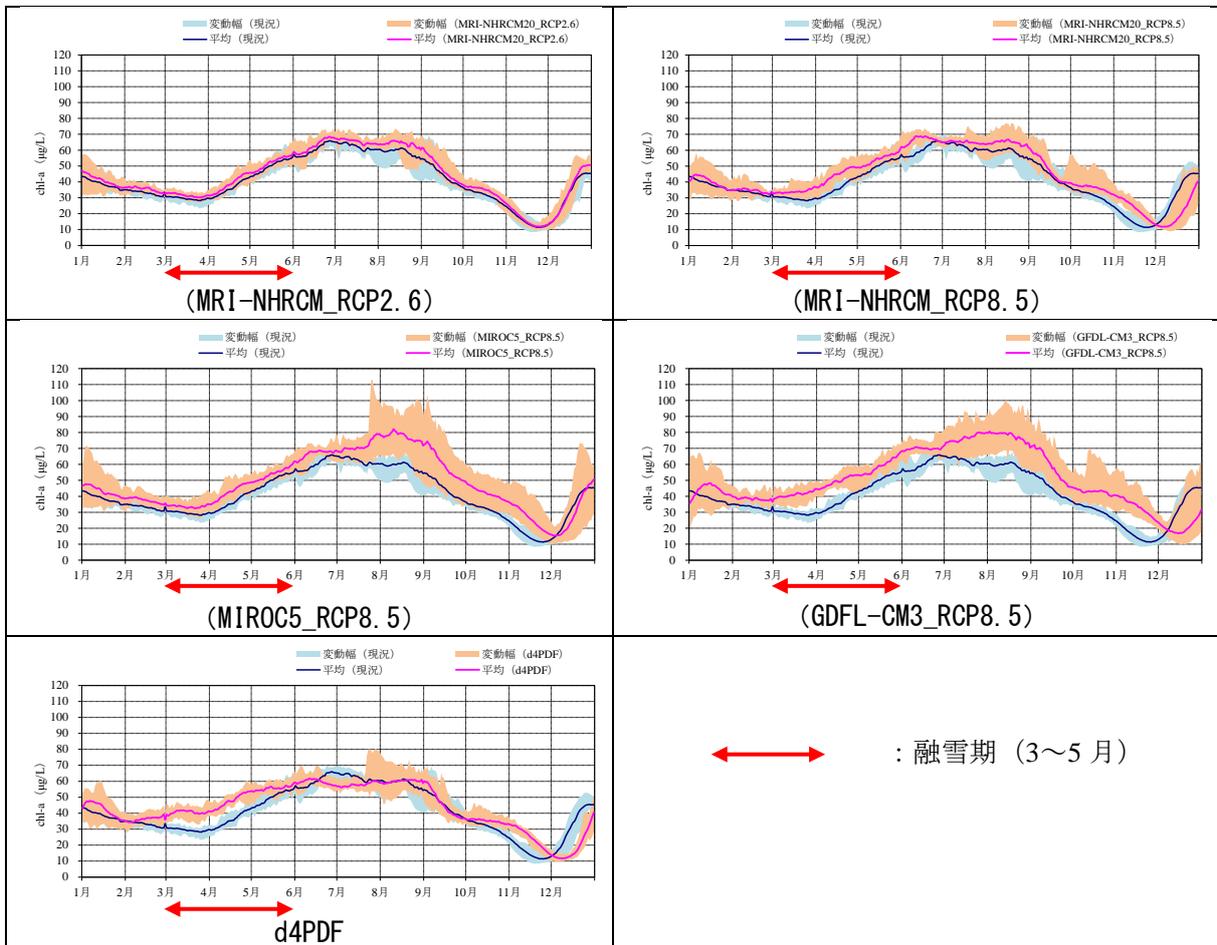


図 6.49 八郎湖における水質変化(調整池-湖心、表層、クロロフィル a-10ヶ年平均・変動幅)

## 2) 春先の融雪水量の減少

- 馬場目川では、現況では生じていた3～5月における融雪による流量増加が、将来気候では小さくなり、12～43%減少する。(図 6.50)
- 融雪時期という視点からは、気温上昇に対応した傾向となっており、NHRCM20 (RCP2.6) では現況と大きな変化はないが、その他 RCP8.5 相当の4ケースでは融雪による流出が早まる傾向が認められる。(図 6.51)

### ■3～5月 (現況の状況から3～5月を融雪期と設定した)

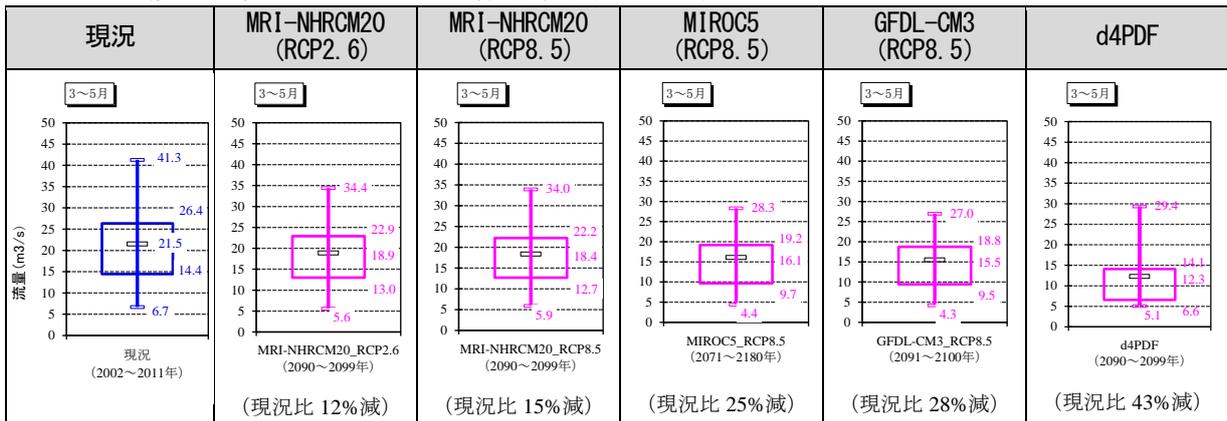


図 6.50 馬場目川における融雪期の流量変化

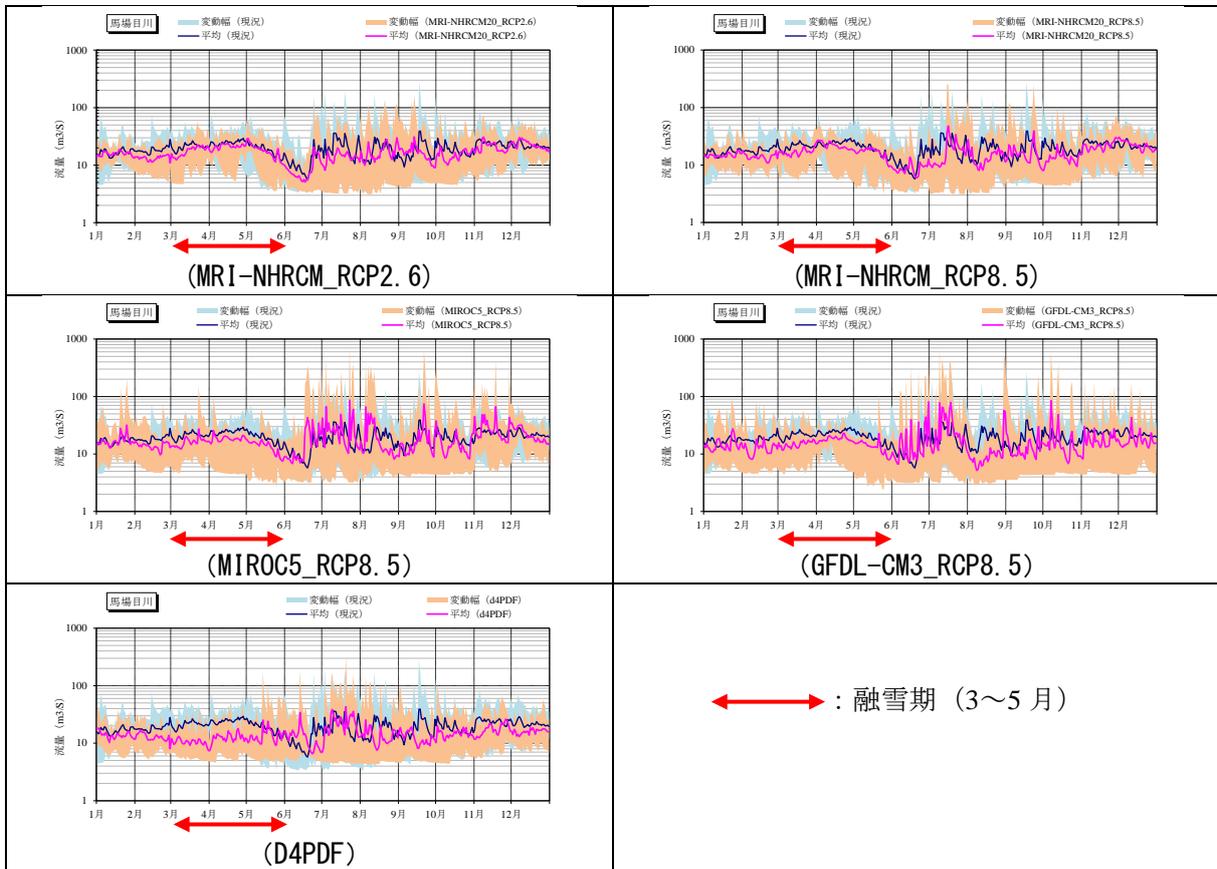


図 6.51 馬場目川における流量変化(10ヶ年平均、日平均で整理)

### 3) 春先の栄養塩供給量の減少

- 融雪期における河川負荷量は、将来、現況に比べて流量が減少することから、河川負荷量も減少する。
- 減少の程度は、窒素で 15～45%、りんで 13～23%と予測され、窒素に比べてりんの方が減少の程度が小さい。りんについては、窒素に比べて出水時の濃度上昇の影響が大きいことによるものと考えられる。(図 6.52)
- d4PDF では、流量の減少の程度に比べて負荷量はさほど減少していないが、これは 5月に他のケースに比べてやや大きな規模の出水に伴う大きな負荷の流入があるためと考えられる。(図 6.53、図 6.54)

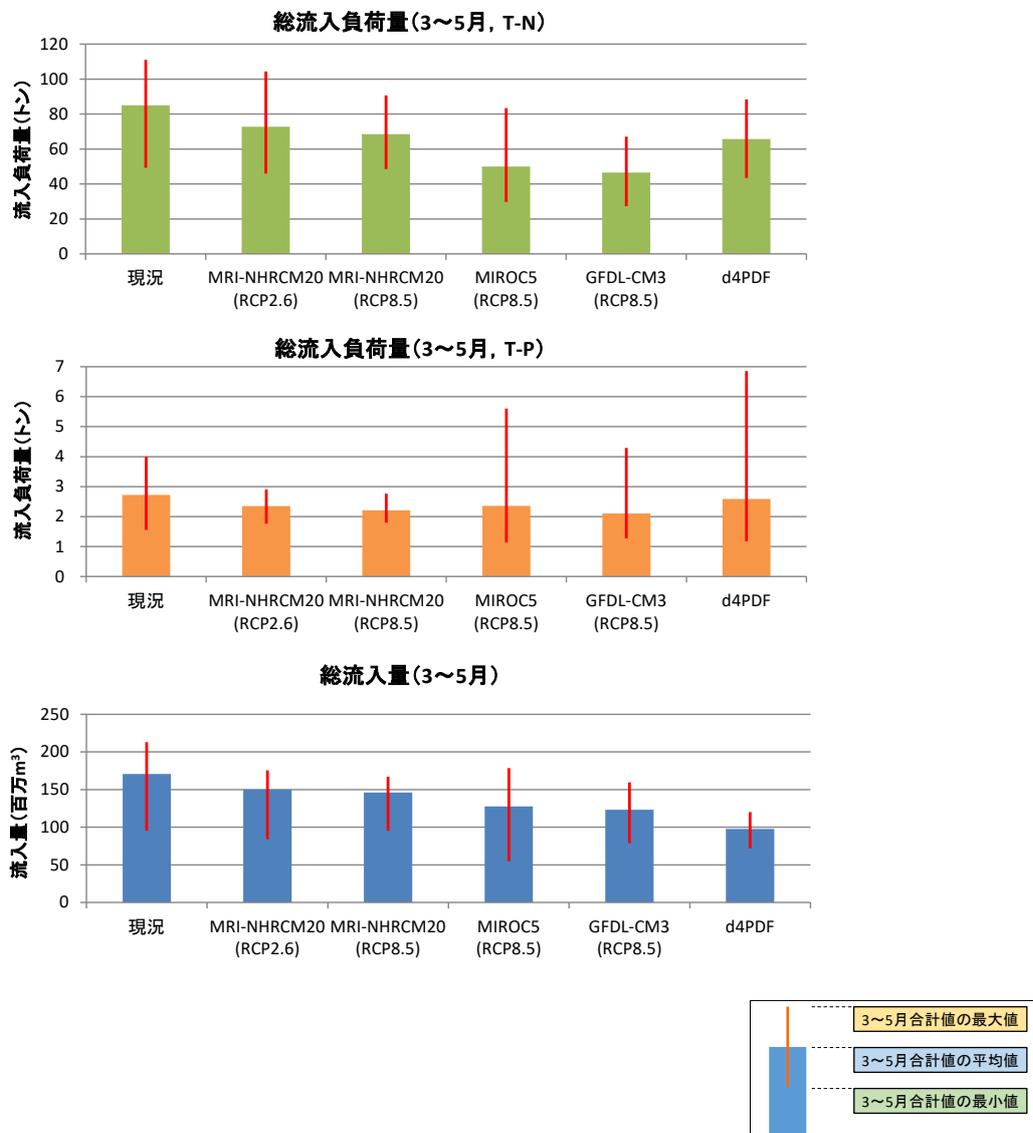


図 6.52 馬場目川における融雪期の負荷量変化(10ヶ年平均、T-N, T-P, 総流入量)

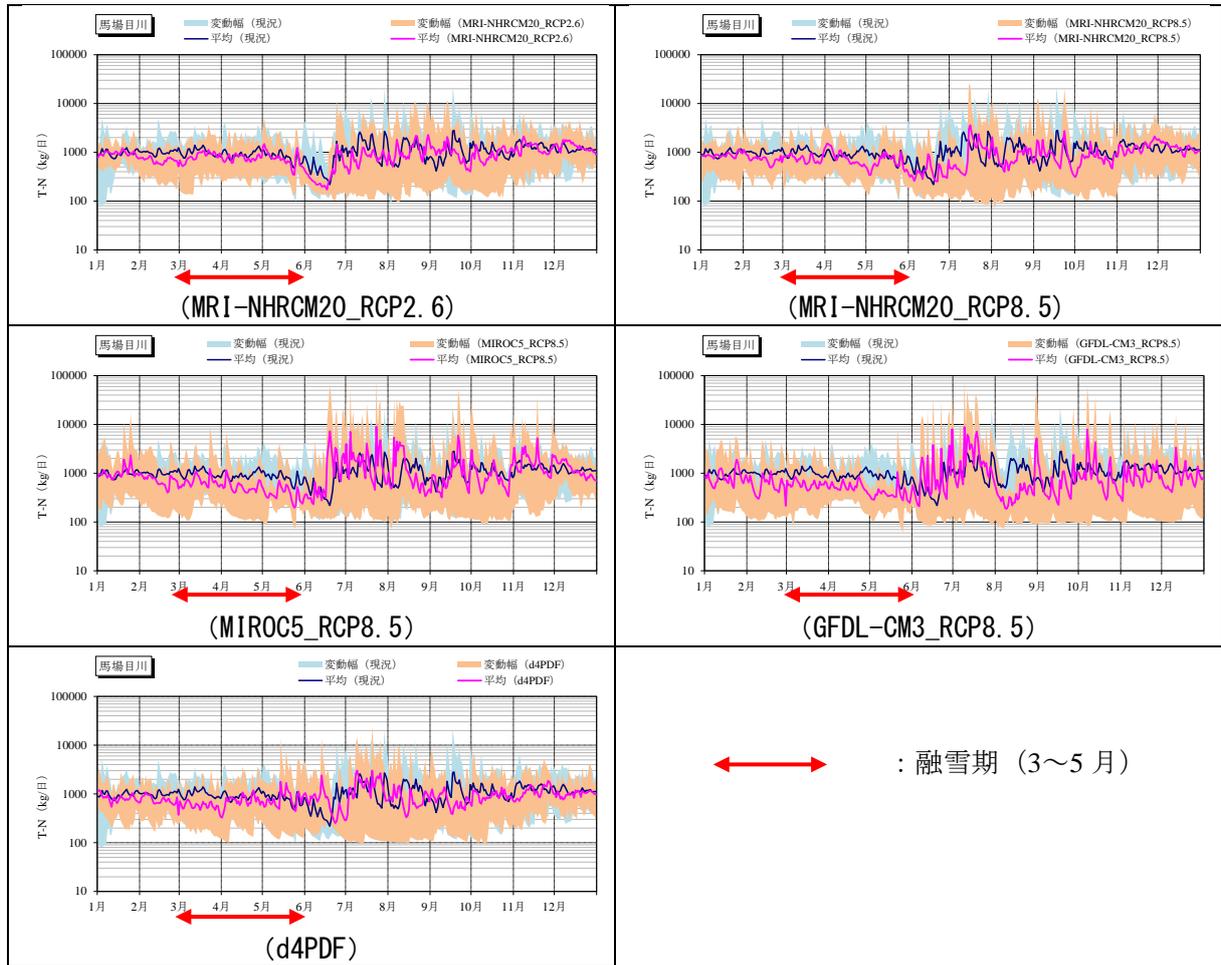


図 6.53 馬場目川における融雪期の負荷量変化(10ヶ年平均・変動幅、T-N)

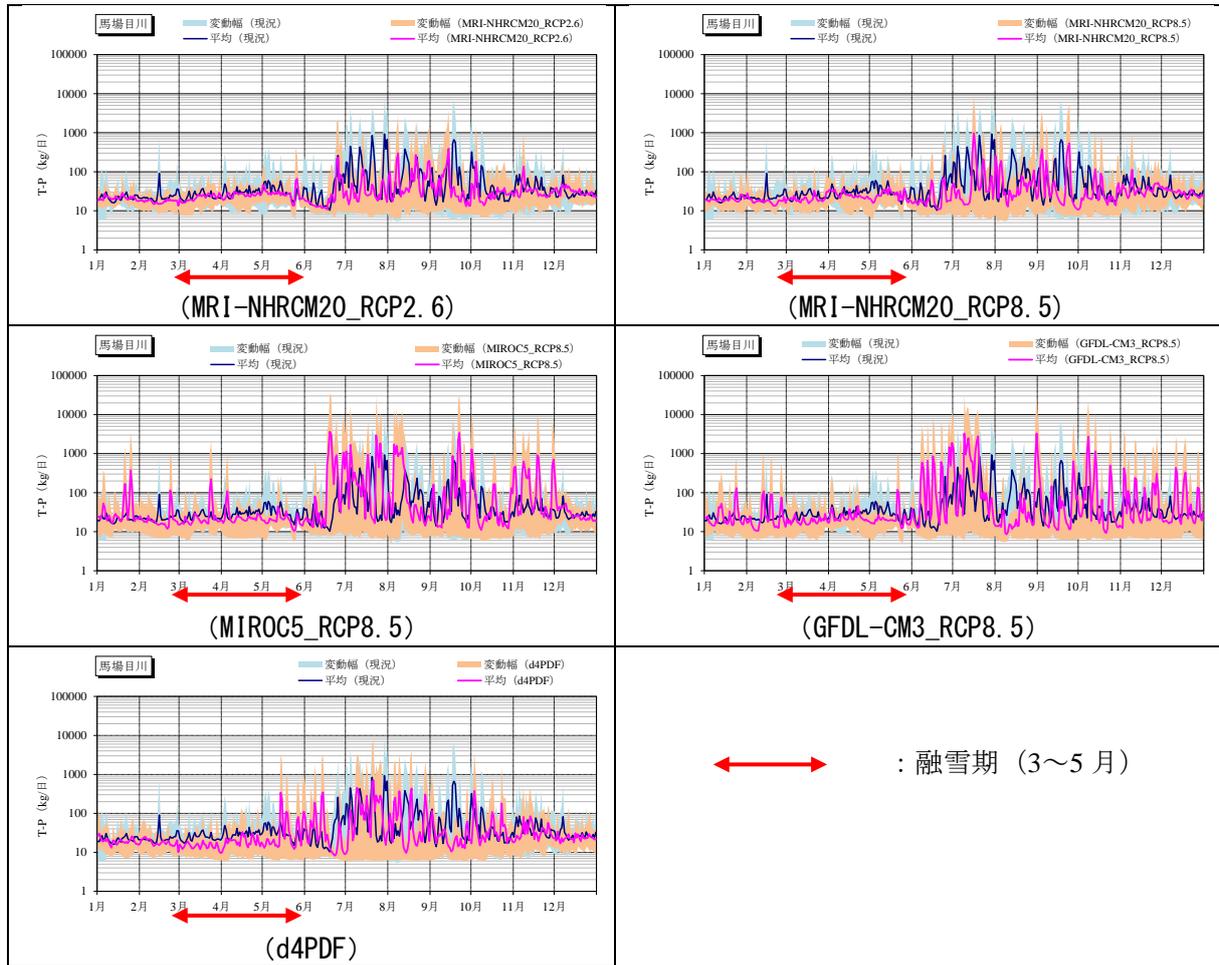


図 6.54 馬場目川における融雪期の負荷量変化(10ヶ年平均・変動幅、T-P)

#### (4) 出水時流入栄養塩等の増加

##### 1) 浮遊物質濃度の変化

- ・ SS について見ると、いずれのケースも現況と比較して顕著な差は見られないが、若干の濃度上昇がみられる（図 6.55）。
- ・ NHRCM20（RCP2.6,8.5）の2ケースよりも MIROC、GFDLの方がやや上昇幅が大きい。

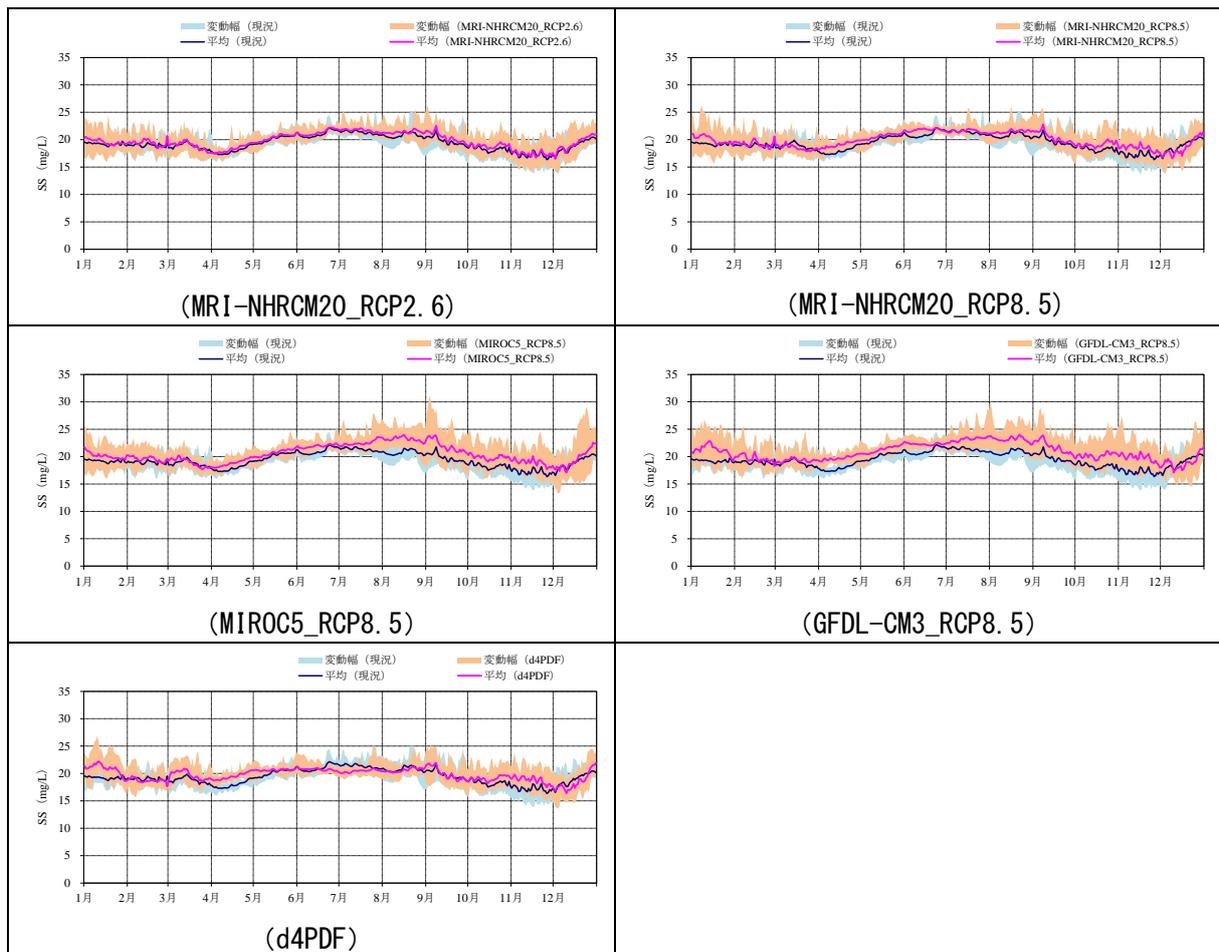


図 6.55 八郎湖における水質変化(10ヶ年平均・変動幅、SS)

## 2) 植物プランクトンの変化

### A) 河川からの栄養塩流入負荷量の変化

- ・ 通年で見ると、現況に比べていずれの将来ケースも流量は減少するが、流入負荷量は傾向が異なり、MIROC では T-N、T-P の両方が、GFDL では T-P が現況よりも多くの負荷量が流入する結果となっており、T-P は増加の程度も大きい。（図 6.56）
- ・ これは、出水時の大きな負荷量流入の影響であり、将来、出水の発生頻度が現況よりも増加するとともに最大規模も大きくなるが、りんについては窒素に比べて、出水時に流入水質が高濃度となる傾向が顕著であることによるものと考えられる。
- ・ 月別の変化を見てもその傾向が現れており、MIROC、GFDL では、夏期～秋期の流入負荷量が多くなっており（図 6.57）、これがクロロフィル a（植物プランクトン）の増加要因となっていることが考えられる。

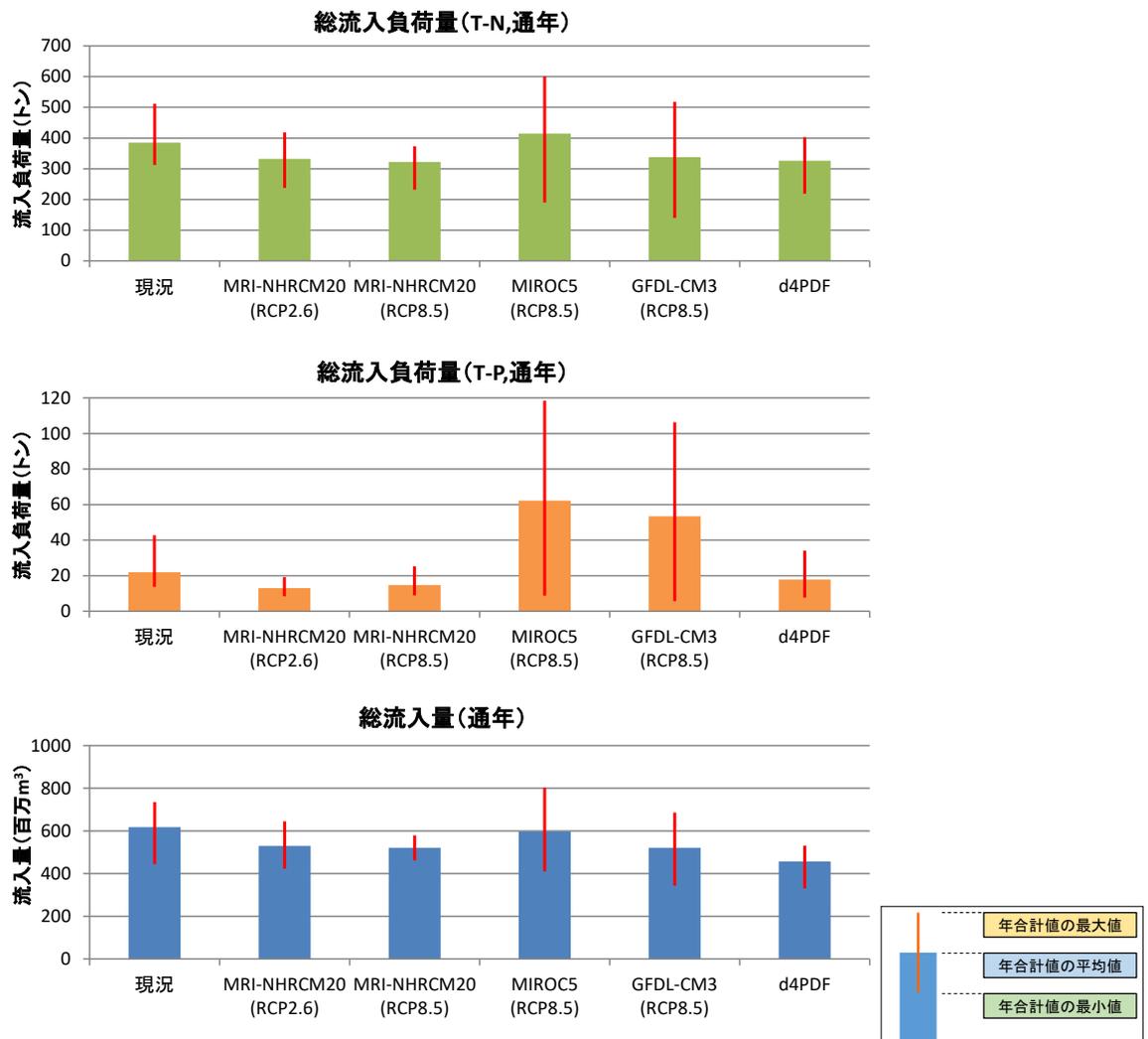


図 6.56 馬場目川における負荷量変化(10ヶ年平均、T-N, T-P, 総流入量)

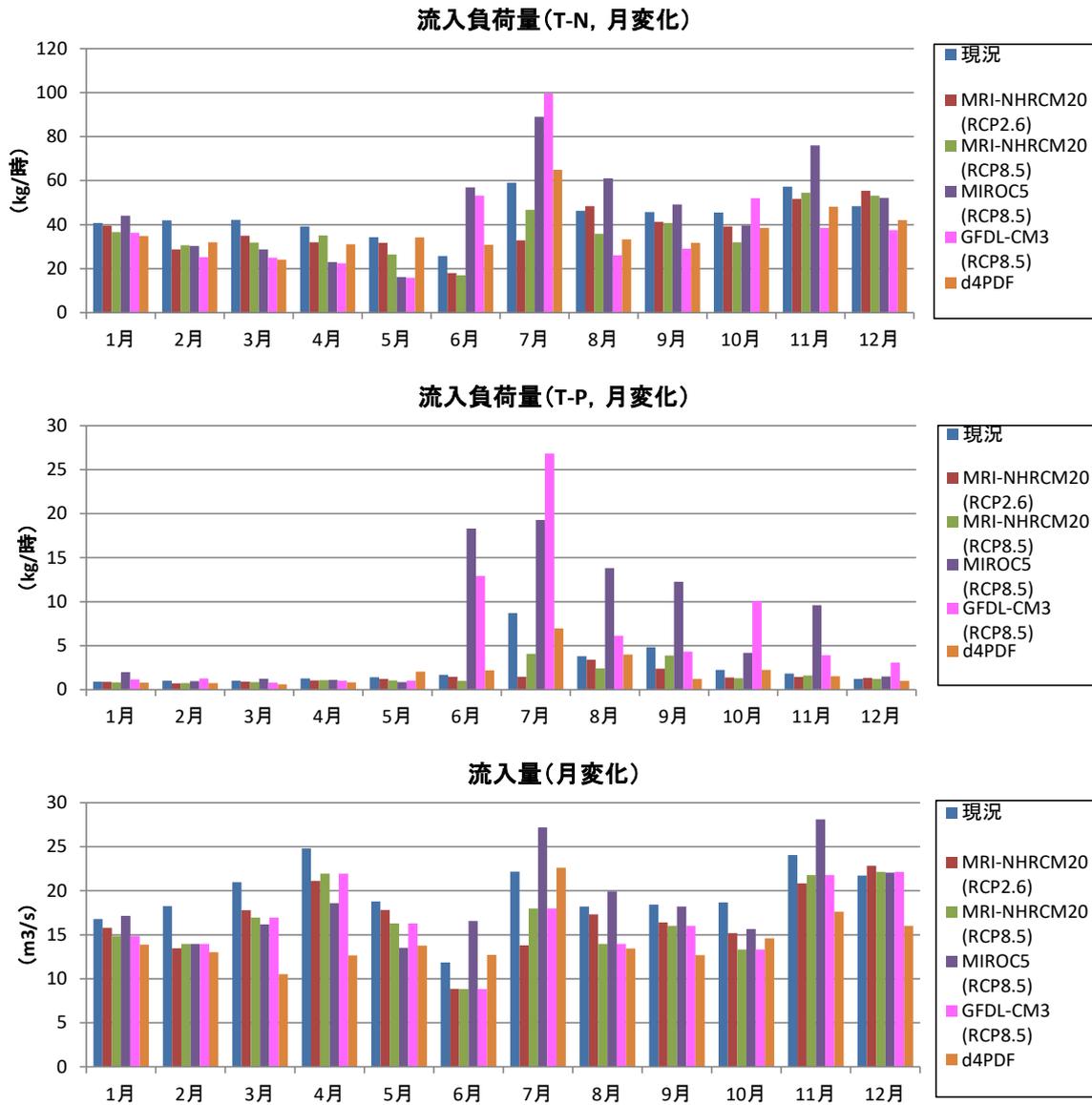


図 6.57 馬場目川における負荷量変化(10ヶ年平均月別、T-N, T-P, 流入量)

## B) 植物プランクトンの変化

- MIROC、GFDL の 2 ケースでは、夏期～秋期のクロロフィル a 濃度（植物プランクトン）が高くなっている。（図 6.58）
- これは、植物プランクトンの増殖が盛んとなる夏期もしくはその前に大きな出水により大きな負荷が流入すると、それを利用して植物プランクトンが増殖し、クロロフィル a 濃度が高くなることを示唆するものである。
- クロロフィル a 濃度の増加が必ずしもアオコ発生に直結するわけではないが、出水時の大きな負荷量流入によりアオコ発生のリスクは増大する可能性がある。

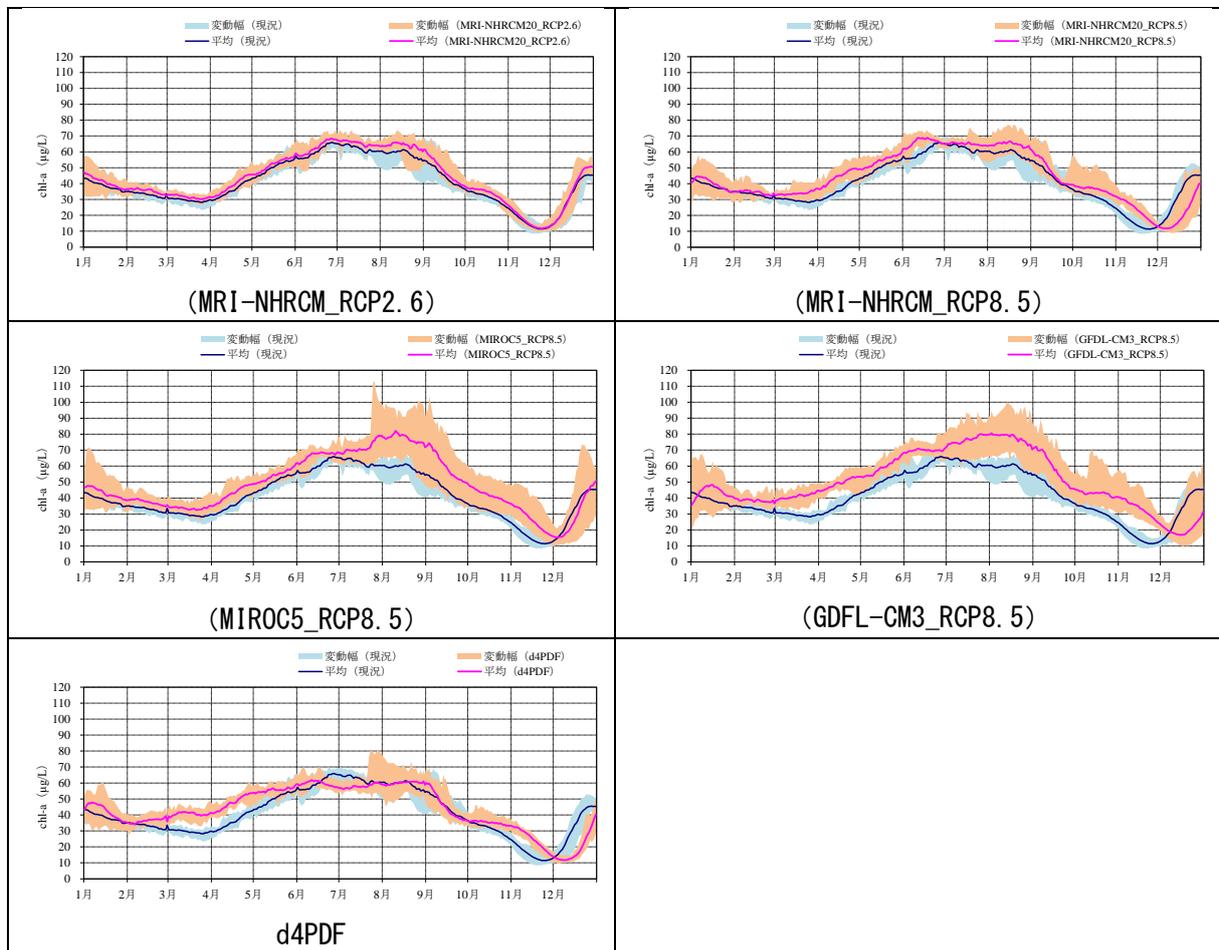


図 6.58 八郎湖における水質変化(調整池・湖心、表層、クロロフィル a-10 ヶ年平均・変動幅)  
(図 6.49 の再掲)

## 6.4 将来予測・影響評価とりまとめ(八郎湖)

### 6.4.1 将来の気象変化

気温(図 6.59 の左)については、現況では年平均気温(計算に用いた 10 年間の平均)が約 11.3℃であるのに対し、将来においては、RCP2.6 のケースで約 0.4℃の上昇、その他の RCP8.5 相当の 4 ケースでは平均約 3.4~7.1℃の上昇となっている。中でも GFDL-8.5 は突出して気温が高くなるケースとなっている。また、現況に比べて、将来ケースの方が各年のばらつきの幅は大きい。

年降水量(図 6.59 の右)は、現況で 1,892mm であるのに対し、将来においては 7mm の減少~582mm の増加となる。中でも MIROC-8.5 は降水量の増加幅の大きいケースとなっている。また、現況に比べて、将来ケースの方が各年のばらつきの幅は大きく、中でも MIROC-8.5、GFDL-8.5 は各年のばらつきが大きいケースとなっている。

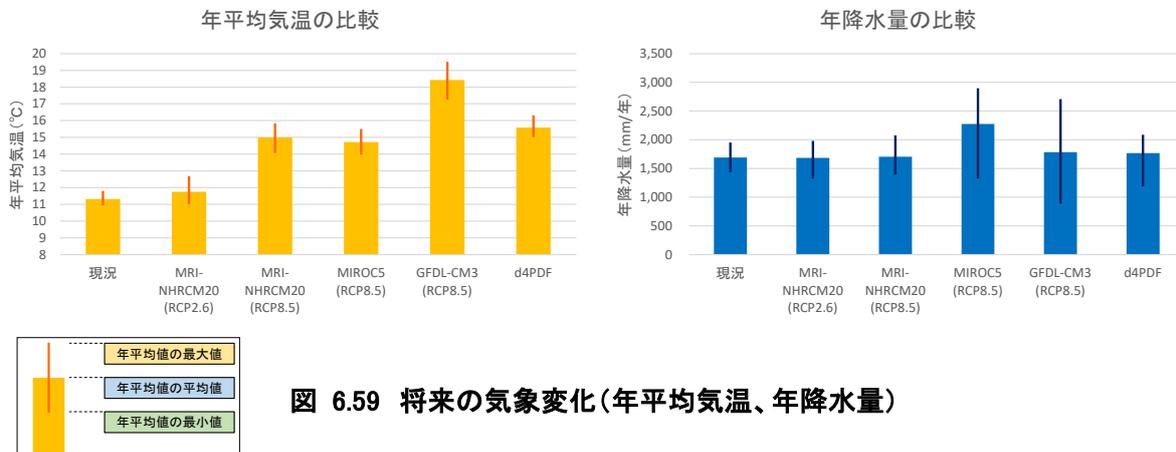


図 6.59 将来の気象変化(年平均気温、年降水量)

現況の 10 年間で第 10 位の日雨量\* (流域平均) 以上の日雨量の生起回数(図 6.60)は、将来気候のいずれのケースにおいても現況を上回り、将来、大雨の生起頻度は増加する傾向である。

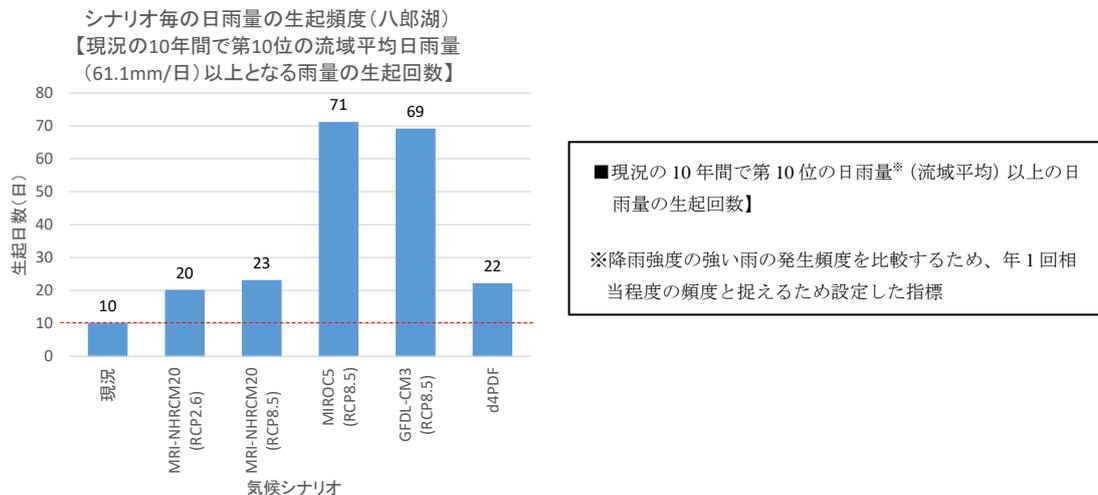


図 6.60 各ケースの日降水量の発生頻度の比較(八郎湖, 流域平均)

## 6.4.2 将来の気候変動によって想定される影響

八郎湖での予測結果および影響評価をとりまとめ、表 6.4 に示した。以下に摘要する。

### (1) 冷水性魚類の生息的水温とのずれ(検討対象魚種:ワカサギ)

八郎湖における主な漁業対象種であるワカサギの成魚の生息に影響を与えると考えられる。

水温(30℃)以上となる状況が、現況では10年間でゼロ日であるのに対し、将来は2~608日(0.2~61日/年)となり、場合によっては高頻度で生じる可能性が示された。

### (2) 植物プランクトンの変化

現況のクロロフィル a 濃度の年最大値が、将来は1.05~1.61倍の濃度になると予測された。また、将来現況の最大値を上回る回数(年)は、2~10回となり、現況に比べてアオコ発生リスクが増加する可能性が示された。

これは、植物プランクトンの増殖が盛んとなる夏期もしくはその前に大きな出水により大きな負荷が流入すると、それを利用して植物プランクトンが増殖し、クロロフィル a 濃度が高くなることを示唆するものである。

降水の極端化による流入負荷特性の変化が、栄養塩の変化、ひいては湖沼の内部生産に影響を与える可能性が考えられる。

### (3) 結氷の変化

結氷の閾値として「日平均気温が0℃を下回る日数」を比較した結果、現況では37日/年であるのに対して、将来は0~29日/年と総じて減少する傾向となり、結氷する日数が減少する可能性が示された。

### (4) 融雪時期の変化

融雪期(3~5月)においては、将来で河川流入量が約12~43%減少し、これによって八郎湖内の回転率が低下する。同時に水温も上昇するため、植物プランクトンは増殖しやすい環境となる。その結果、増殖時期が早まり、春期~夏期の濃度上昇が現況よりも増加するとともに、水温の上昇によって夏期から秋期にかけてクロロフィル a 濃度の低下する時期も遅くなり、アオコ発生のリスクがある期間は、将来長くなる可能性があることが示された。

表 6.4 八郎湖における影響評価のまとめ

予測結果	水環境の変化	影響を評価するための指標	検討対象※1	影響評価	備考	
<b>■水温の上昇</b> ・気温の上昇に応じて水温は上昇する。 ・現況に比べて、将来（21世紀末）において、RCP2.6で年平均0.4℃の上昇、RCP8.5※2では年平均2.8℃～5.6℃の上昇と予測された。 ・特にRCP8.5では、水温が高い夏期で上昇幅が大きく、夏期の水温に相当する年75%値で、3.6℃～5.9℃の上昇と予測された。	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	—	—		
		②底泥からの窒素、リンの溶出	—	—		
	湖水温の上昇		③冷水性魚類等の生息適水温とのずれ	●	・既往知見より、ワカサギの成魚の生息に影響を与える高水温閾値として「30℃以上」を評価基準として評価した。 ・表層水温が30℃以上となる日数が、現況では10年間でゼロ日であるのに対し、将来は2～608日（0.2～61日/年）となり、場合によっては高頻度で生じる可能性が示された。 ・水温によるワカサギ生息への影響が懸念される。	・植物プランクトン種の変化は検討していない。
			④植物プランクトンの変化	●	・水温変化に伴う変化としては、夏期にピークを迎える植物プランクトン（クロロフィルa）の増殖が、水温上昇に伴い早期化することが挙げられた。 ・水温変化のみに起因するピーク値の変化は顕著ではなく、最大値の変化には、水温上昇よりも夏期またはそれ以前の流入負荷の増加が効いてくることが示唆された。（⑬参照）	
			⑤魚類等の生息水深の変化	—	—	
			⑥底泥からの窒素、リンの溶出	●	・底泥からの溶出は水温の上昇とともに多くなることから、水温上昇の程度と対応して、現況と比べて将来では、底泥からの溶出量（湖全体）は、窒素で1～18%、リンで2～21%増加すると予測された。この増加量について、湖に供給される窒素（無機態窒素）、リン（無機態リン）の総負荷量と比べるとそれぞれ0.4～6%、0.5～6%となった。特に、植物プランクトン量が多くなる8月の時期はこの傾向が顕著となった。 ・栄養塩の増加は植物プランクトン増殖の要因になることから、アオコ発生リスクの増加に影響する可能性があることが示された。	
	湖面結氷の変化	⑦湖面結氷の短期化	○	・八郎湖における過去の結氷の情報を整理し「日平均気温が0℃を下回る日数」を指標として評価した結果、現況では37日/年であるのに対して、将来は0～29日/年と総じて減少する傾向となり、結氷する日数が減少する可能性があることが示された。		
<b>■融雪期の変化</b> ・気温の上昇に伴い、現況では生じていた3～5月において融雪による流量増加が、将来は小さくなり、河川流入量が約12～43%減少すると予測された。その傾向は、気温上昇が大きくなるほど顕著である。	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	●	・融雪期（3～5月）の河川流入量が減少することにより、流入栄養塩量は減少するが、回転率が低下し、同時に水温も上昇するため、植物プランクトンは増殖しやすい環境となり、増殖時期が早まり、春期～夏期の濃度上昇が現況よりも増加するとともに、水温の上昇によって夏期から秋期にかけてクロロフィルa濃度の低下する時期も遅くなる。 ・将来、アオコ発生のリスクがある期間は、長くなる可能性があることが示された。		
		⑨春先の栄養塩供給量の減少	●			
		⑩春先の融雪水量の減少	●			
<b>■河川流量の変化（出水時）</b> ・通年で見ると、現況に比べて将来流量は減少するが、流入負荷量は増加する場合もあると予測された。 ・将来は、降水減少の極端化により、出水頻度の増加やピーク流量の増大が起り、それに起因する高濃度負荷流入、流入負荷量の増加が予測された。	降雨強度の変化による出水時流入栄養塩の増加	⑪浮遊物質量、透明度の変化	●	・現況と比較して顕著な差は見られないが、将来、浮遊物質量は増加する。 ・浮遊物質量やクロロフィルa濃度の増加に伴い、透明度が低下する可能性が考えられる。		
		⑫植物プランクトンの変化	●	・現況のクロロフィルaの年最大値が、将来は1.05～1.61倍の濃度になると予測された。また、将来現況の最大値を上回る回数（年）は2～10回となり、現況に比べてアオコ発生リスクが増加する可能性が示された。 ・増殖が盛んとなる夏期もしくはそれ以前に大きな出水により多量の栄養塩が流入すると、それを利用して植物プランクトンが増殖するが、秋以降等であれば、大きな負荷が流入してもその影響は限定的であると想定された。 ・降水の極端化による流入負荷特性の変化が、栄養塩の変化、ひいては湖沼の内部生産に影響を与える可能性が考えられる。		
<b>■河川流量の変化（平常時）</b> ・通年で見ると、現況に比べて将来の降水量は、MIROC8.5では増加、その他のケースでは現況とほぼ同程度と予測された。 ・一方、気温は将来上昇するため、MIROC8.5では流入量は現況とほぼ同等、その他のケースでは減少すると予測された。	降水量の減少による平常時流入量の減少	⑬植物プランクトンの変化	●	⑫に同じ		

※1：検討対象の凡例

- ：定量評価：気候変動関連性が高く、比較的定量的にその影響がわかりやすく表現できると考えられるもの
- ：定性評価：定量化は困難と考えられるものの気候変動との関連と生物生態系や人に対する影響を定性的に検討しておくことが望ましいと考えられるもの
- ：該当なし

※2：文中のRCP8.5にはd4PDF（4℃上昇シナリオ）も含んでコメントしている。