ダム貯水池水質改善に向けた 水質シミュレーション活用 のためのマニュアル(案)

~基本的な考え方や設定に関する技術資料~

令和3年5月

国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課

まえがき

我が国のダム貯水池では、富栄養化現象に伴うアオコ発生による景観障害やカビ臭発生による 利水障害といった水質障害が発生することがある。国土交通省及び独立行政法人水資源機構が管理するダムを対象として平成 27 年度に実施したアンケート調査によると管理ダム中約4割でこういった問題が発生している。この富栄養化現象に伴う水質障害に対して、各ダム貯水池では様々な水質改善対策を実施している。

ダム貯水池の水質改善対策については、国立の研究機関や各大学などで多くの研究がなされ、

改善技術が進歩していく一方で、貯水量、湛水面積、水深、滞留時間、流入負荷量など各貯水池により条件が異なり、かつ気象条件も異なる中で、画一的な対策を見いだすことは困難であり、各貯水池で発生している水質問題一つ一つに対して、オリジナルの対策を講じていく必要がある。その一方で、国土交通省、独立行政法人水資源機構及び道府県が管理するダムを対象として実施したアンケート調査によると、地方整備局、水資源機構、地方公共団体においてダム貯水池の水質管理を担当する職員は減少傾向にあり、ダム貯水池の水質管理に関する技術の継承が困難になっていくことが懸念される。具体的な数値で見てみると、ダム管理を担当している職員の87%

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

がダム貯水池の水質に係る手引き等の整備を望むと回答しており、その理由として51%の職員が

「現場での技術の継承に困難な部分がある」ことを挙げている。

本マニュアルは、これまで進めてきた取り組みを引き継ぎつつ、ダム貯水池の水質管理に水質シミュレーションを更に積極的に活用していくために、その基本的考え方や留意事項等をとりまとめたものである。

なお、本マニュアルは現時点で得られている知見に基づき構成されたものである。今後の技術 革新や学術的知見の蓄積に留意頂くとともに、水質シミュレーションの実施事例の蓄積を継続し、 必要に応じて見直しを行うものとする。

ダム貯水池水質対策有識者委員会名簿 (順不同、敬称略)

委員長 松尾 直規 (中部大学 名誉教授)

委 員 淺枝 隆(埼玉大学 名誉教授)

- " 梅田 信(東北大学大学院工学研究科 准教授)
- " 古賀 憲一(佐賀大学 名誉教授)
- " 田中 宏明(京都大学大学院工学研究科 教授)
- ッ 中野 伸一(京都大学生態学研究センター 教授)
- " 山下 洋正(国立研究開発法人土木研究所 水環境研究グループ水質チーム 上席研究員)
- " 吉村 千洋 (東京工業大学環境・社会理工学院 准教授)

事務局 津森 貴行(国土交通省水管理·国土保全局河川環境課 流水管理室長)

ル 小澤 盛生 (水管理室 企画専門官)

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

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

委員会開催 第1回委員会 令和3年2月8日 第2回委員会 令和3年2月22日

※委員、事務局の所属役職は、参加当時のものである。

目 次

1.	はじ	めに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-1
	1-1.	目的 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1-1
	1-2.	本マニュアルと既往手引き・マニュアル等との関係	1-2
	1-3.	適用範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-4
2.	ダム	貯水池における水質シミュレーションの基礎 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2-1
	2-1.	ダム貯水池における水理・水質的特徴とその要因	2-1
	2-2.	ダム貯水池の水質管理のための水質シミュレーションの活用 ・・・・・・・・・・・	2-4
	2-3.	水質シミュレーションを実施するにあたっての基本的考え方	2-9
3.	ダム	貯水池における水質シミュレーションの実施・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-1
	3-1.	実施手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-2
	3-2.	データの収集・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-5
	3-3.	データレビュー (ダム貯水池における水質特性の整理)	3-8
	3-4.	モデルの概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-11
	3-	-4-1. 流動モデルの概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-11
		-4-2. 生態系モデルの概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-12
	3-5.	モデルの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-13
	3-	-5-1. メッシュ分割の設定(貯水池形状の設定)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-13
		-5-2. 境界条件(流入・流出・気象条件)の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-15
			3-20
		-5-4. 現況再現性の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3-21
		-5-5. 精度管理	
		モデルによる検討・解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
		-6-1. ケースの設定	
		-6-2. 解析結果の可視化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
		-6-3. 解析結果の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
4.		編	
		参考文献·図書······	
		全国管理ダムにおける水質シミュレーションの実施状況とその目的 ・・・・・・・	
		モデルの構築事例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
		-3-1. 鉛直二次元モデルの例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
		-3-2. 鉛直一次元モデルの例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	4-	-3-3. その他の研究事例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-55

4-4. サブモデルに関する事例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-56
4-4-1. 気泡式循環施設・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-56
4-4-2. 表層水循環装置······	4-56
4-4-3. サイフォン式取水設備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-56
4-4-4. 湧昇流の発生手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-57
4-4-5. 底泥のモデル化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-58
4-4-6. カビ臭発生機構のモデル化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-59
4-4-7. 魚類のモデル化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-60
4-5. 入力条件の設定に関する事例	4-61
4-5-1. SS 沈降速度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	4-61
4-5-2. L-Q 式······	4-61
4-5-3. 入力条件等の資料・データ収集事例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-62
4-6. 将来気候を考慮した入力条件の設定に関する事例	4-67
4-7. モデルの再現性の定量的評価に関する事例 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	4-68
4-7-1. 平均二乗誤差による水温の再現性の定量的な評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-68
4-7-2. ばらつきの誤差評価指標 (RMSE) を用いた精度評価の事例・・・・・・・・	4-72
4-8. 生態系モデルのパラメーター設定に関する情報・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-73
4-9. 将来水質予測・水質改善対策の検討に関する事例	4-77
4-10. 指定湖沼等における水質シミュレーションに関する情報・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-78
- 索 引 -	

本マニュアルの構成

目次構成

本マニュアルは、大きく4つの章により構成している。

1. はじめに

本マニュアルで対象とする水質シミュレーションを活用したダム貯水池の水質管理の目的、位置づけ、適用範囲を記載している。

2. ダム貯水池における水質シミュレーションの基礎

ダム貯水池において着目すべき現象、ダム貯水池の管理への水質シミュレーションの活用方法、水質シミュレーションによる検討を実施する際の基本的な考え方について記載している。

※本マニュアルにおいては、これまで一般的に「曝気(式)循環施設」等と呼称されてきた水質保全施設は、施設の目的を的確に表した「気泡式循環施設」という呼び名を用いることとしている(参考文献等の内容はできるだけ併記し、編集不可能なものは対象外とした)。

3. ダム貯水池における水質シミュレーションの実施手順

ダム管理者が水質シミュレーションを用いたダム貯水池の管理方法を考える際の助けとなることを念頭に、水質シミュレーションを実施する際の手順(データの収集・レビュー、モデルの選定・構築、モデルの計算実施、解析結果の可視化)について記載している。

4. 資料編

実務者が実際に水質シミュレーションに係る各種検討を行う際に参考となる技術的な知 見や情報を掲載している。

各章の構成

本マニュアルの各章における構成を以下に示す。

(箱書き)

各章における検討内容の基本となる事項を記載している。

【解説】

箱書きに記載した事項の背景となる考え方や具体的な実施事項等について、解説を記載 している。

なお、【解説】では、特に重要な部分を (下線)で強調している。

【●章の参考文献】

箱書き、解説に記載した事項に関連する文献として、公表されている基準、手引き、マニュアル、書籍等を章ごとにまとめて記載している。

コラム

ダム貯水池における水質シミュレーションの活用にあたり、ダム管理者の理解の一助になると考えられる項目について紹介している。

1. はじめに

1-1. 目的

本マニュアルは、ダム貯水池の水質管理において水質シミュレーションを活用することを目的とし、水質シミュレーションを用いた検討を行うにあたっての基本的な考え方や一般的事項、留意事項等を示すものである。

【解説】

ダム貯水池の流動・水質現象は、時間的・空間的に広範であり、実際に観測等によって把握できる事象はごく一部である。また、水質改善対策を講じる際も、実際に各種対策を整備し、その効果を比較して、採用する対策を決めるようなことは現実的に困難である。そこで、限られた現地観測データから、ダム貯水池全体の流動・水質現象を再現し、ダム貯水池の水質現象の因果関係の把握や、それを考慮した水質改善対策の検討や効果の予測・評価を行うツールとして水質シミュレーションが用いられている。

本マニュアルは、ダム貯水池で水質シミュレーションを用いた検討を実施するにあたって の基本的な考え方やプロセスを体系化するとともに、その各実施段階において、標準的な検 討方法や留意すべき事項をとりまとめたものである。

なお、本マニュアルは現時点で得られている知見に基づき構成されたものである。今後の 技術革新や学術的知見の蓄積に留意頂くとともに、水質シミュレーションの実施事例の蓄積 を継続し、必要に応じて見直しを行うものとする。

1-2. 本マニュアルと既往手引き・マニュアル等との関係

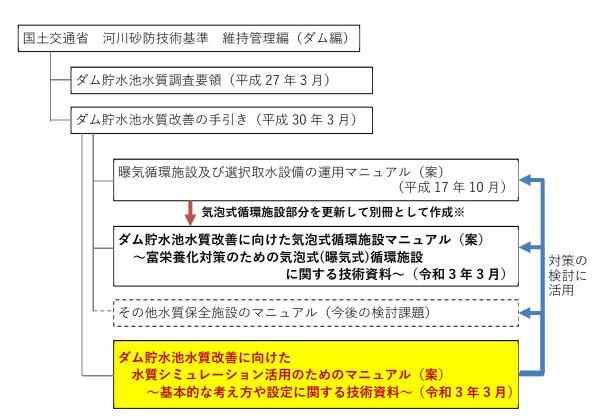
本マニュアルは、「ダム貯水池水質改善の手引き」に示されている水質改善対策の検討等を行うための手法の一つである水質シミュレーションについて、その活用方法、実施手順及び実施に関する技術的事項を体系的に取りまとめたものである。

【解説】

ダム貯水池の水質保全対策については、「国土交通省 河川砂防技術基準 維持管理編(ダム編)」において「第2章 第4節 貯水池の維持管理対策 4.3 水質保全対策」に記載されており、ダム貯水池では、流水の貯留に伴う水理的な変化により、水質変化現象(主に、冷・温水現象、濁水長期化現象及び富栄養化現象等)の発生が頻発、長期化またはそれらが予測される場合に必要に応じて水質保全対策を行うこととされている。

さらに、水質保全対策を検討するにあたっての調査方法は、「ダム貯水池水質調査要領」 に、水質保全対策を実施する上での考え方や検討の手順等は、「ダム貯水池水質改善の手引 き」により具体的に取りまとめられている。

本マニュアルは、このうち「ダム貯水池水質改善の手引き」に示されている、水質変化現象の発生メカニズムの推定や水質改善対策の検討の一つの手法として示されている水質シミュレーションについて、その活用方法や実施手順及び実施に関する技術的事項を取りまとめたものである。



※平成 17 年の運用マニュアル (案) のうち、選択取水設備にかかわる事項については引き続き 平成 17 年の運用マニュアル (案) を活用するため、更新ではなく、別冊としてまとめた。

図 1-1 本マニュアルとその他手引き等との関係(2)を改変)

ダム貯水池で水質変化現象が発生した場合に実施する発生要因の推定、対策検討、効果確認等の一連の作業において、水質シミュレーションの活用が可能な場面を整理したものを図1-2に示す。

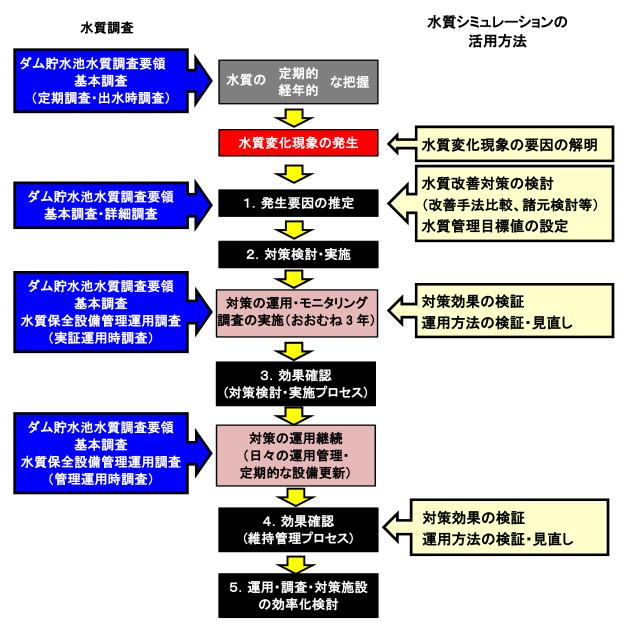


図 1-2 水質変化現象の発生から対策実施の各段階における水質シミュレーションの活用

1-3. 適用範囲

本マニュアルは、河川管理施設として設置されたダム貯水池において水質シミュレーションを実施する際に適用する。

【解説】

本マニュアルは、河川法第3条の規定に基づく河川管理施設のダム(同法第17条に規定する兼用工作物のダム、特定多目的ダム法第2条に規定する多目的ダム、独立行政法人水資源機構法第2条に規定する特定施設を含む。)において、水質シミュレーションを用いたダム貯水池内の水質予測、環境保全措置の検討等に水質シミュレーションを実施する際に適用する。

【1章の参考文献】

- 1)河川砂防技術基準 維持管理編(ダム編): 国土交通省https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri_dam/pdf/ijikanri_dam .pdf
- 2) ダム貯水池水質改善の手引き:国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 30 年 3 月

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

3) ダム事業における環境影響評価の考え方:河川事業環境影響評価研究会 平成12年3月

2. ダム貯水池における水質シミュレーションの基礎

2-1. ダム貯水池における水理・水質的特徴とその要因

ダム貯水池における水理・水質現象をもたらす主な要因は、流入・流出に伴う水・物質 収支、日射等による熱収支、貯水池内での内部生産である。

【解説】

ダム貯水池における水理(流動)、水質現象は、様々な要因によってもたらされているが、 主な要因としては、流入・放流に伴う水・物質収支、日射等による熱収支、貯水池内での内 部生産が挙げられる。

※なお、ダム貯水池における水質シミュレーションとは、これらの事象を常微分方程式や偏微分方程式などの数式を用いて平均化や単純化した数値モデルを用いた予測手法である。(数値モデルの他、事象をモデル化する例として水理実験のことを物理モデルと言う)

(1) ダム貯水池における水理的特徴

ダム貯水池における水理的特徴を表す要素として最も重要なものは、貯水池の物理的・ 化学的・生物的変化に大きな影響をもたらす「水温」である。

<u>貯留水の密度は水温と濁度(SS)の関数</u>であるが、濁度(SS)の影響は極めて高濃度の場合を除いて小さく、殆どの場合、水の密度を支配する主な要素は水温である。

多くのダム貯水池では、夏季に日射により水温成層が形成され、秋~冬季の循環期に破壊されるという周年変化がみられる。水温成層の形成が後述する冷温水現象の要因となる。

(2) ダム貯水池における水質的特徴

ダム貯水池における水質変化(物質循環)をもたらす主な要因は、上流からの流入水質(負荷)、貯水池内での流動に伴う物質の移動、水中での沈降、湖底からの溶出といった物理・化学的変化及び貯水池内での植物プランクトンによる一次生産とそれを取り巻く栄養塩等の物質の挙動である。

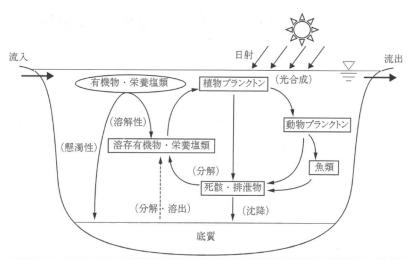


図 2-1 湖沼・貯水池における物質循環 3)

(3) ダム貯水池における水質変化現象

ダム貯水池における水質変化現象(利水面等に影響を及ぼす可能性のある水質に係る現象)として、「ダム貯水池水質改善の手引き」において対象とされている現象は、<u>冷・温水現象、濁水長期化現象</u>(出水濁水長期化現象、渇水濁水長期化現象)、<u>富栄養化現象</u>(生物異常発生、カビ臭発生)、その他の水質変化現象(硫化水素臭発生及び赤水・黒水発生)である。

■「ダム貯水池水質改善の手引き」の対象としている水質変化現象

1)冷·温水現象

「冷水現象」とは、放流水温が流入水温に比べて低温となる現象を指し、ダム貯水池に おいて水温成層が形成されている時に変水層(温度躍層)以深の低温水が放流される場合 等に生じる。冷水障害としては、稲作等の農業や漁業への影響、下流河川の生態系への影響がある。

「温水現象」とは、放流水温が流入水温に比べて高温となる現象を指し、流入量に比べて貯水池容量が大きく水の滞留時間が長いため成層化しやすいダム貯水池において生じやすい。受熱期である夏季に流入水温相当の放流を長期間継続し、放流可能な深度の水温が流入水温よりも高くなることにより生じる場合や秋季から冬季にかけて発生する全循環でダム貯水池全層が流入水温よりも高い水温となる場合に生じる。温水障害としては、下流河川の生態系等への影響が考えられ、近年の環境への意識の高まりとともに注目されることが多くなっている。

2) 濁水長期化現象(出水時/渇水時)

「出水濁水長期化現象」とは、流入濁度に対して高い放流濁度の状態が長期間継続する 現象を指し、出水時にダム貯水池に貯留した濁質を徐々に放流する場合に生じる。また、 大規模出水時や秋季の中規模以上の出水後に循環期に移行する場合には、ダム貯水池が長 期間に渡り全層混合状態となり、ダム貯水池や下流河川で高濁度の状態が継続する場合が ある。

「渇水濁水長期化現象」とは、渇水時にダム貯水池や放流水で高濁度の状態が長期間継続する現象を指し、渇水時の貯水位の低下に伴ってダム貯水池流入部の堆積泥が露出し、流入水が露出した堆積泥を洗掘することにより生じる。

濁水を長期間放流することに伴う障害として、下流河川での水利用への影響、生態系への影響のほか、ダム貯水池及び下流河川における水の濁りによる景観の悪化がある。

3) 富栄養化現象

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

富栄養化現象による影響としては、一次生産の増大による透明度の低下、水色の変化、

pH の上昇等の変化が生じ、さらに現象が進むと、アオコや淡水赤潮等の発生とそれに伴う景観の悪化、カビ臭による放流先の下流河川における水利用への影響等がある。また、富栄養化現象が進行すると、大量発生した植物プランクトンの死骸が沈降・堆積し分解されることなどにより、主に変水層(温度躍層)以深の DO(溶存酸素量)が減少する。 DO の減少が更に進み、嫌気状態になると底泥に堆積した栄養塩類の溶出が顕在化し、富栄養化現象を更に促進させる場合もある。

4) その他の水質変化現象 (硫化水素臭発生)

硫化水素は、腐った卵の臭いに似た特徴的な強い刺激臭(いわゆる「硫黄臭い」と形容されるにおい)があり、高い濃度になると、目、皮膚、粘膜を刺激する有毒な気体である。

ダム貯水池においては、夏季を中心に受熱等により安定した水温成層が形成されると、空気中から水面を通して溶け込んだ酸素の変水層(温度躍層)以深への輸送が抑制されるとともに、植物プランクトンの呼吸や底泥等の有機物の分解により、変水層以深においてDO(溶存酸素量)が低下する。それとともに、ORP(酸化還元電位)が低下し、硫酸還元菌の活動を活性させる範囲(主に-100mV~-200mVと言われている。)になると、主に底泥中に含まれる有機物が分解される際に、硫酸塩が硫酸還元菌による還元作用を受けて硫化水素が発生する。

5) その他の水質変化現象 (赤水・黒水発生)

赤水・黒水は、水の着色現象の一種で、鉄由来やマンガン由来で発生する水の着色現象を指し、流入河川に起因する場合のほか、ダム貯水池の底泥に起因する場合がある。

ダム貯水池の底泥に起因する赤水・黒水の発生は、硫化水素臭の発生の原因と同様に、ORP(酸化還元電位)が低下し、底泥が還元状態になると、底泥に含まれる鉄、マンガンが還元作用を受けて鉄イオンやマンガンイオンとして水中に溶出し、これらが下流河川等に流出して酸化されることにより赤水・黒水が発生する。

鉄イオンやマンガンイオンとして水中に溶出する現象は、ダム貯水池における水の鉛直循環の状況と、その時の水温、DO(溶存酸素量)、pH等の水質条件とが複合して生じるとされている。

赤水・黒水の影響として、洗濯物が着色したり、水道水や食物が着色したり渋味が付く 等の可能性があり、鉄由来の場合では下流河川の河床が赤くなることがある。

2-2. ダム貯水池の水質管理のための水質シミュレーションの活用

ダム貯水池における水質シミュレーションの活用用途は、①水質変化現象の要因解明、 ②水質改善対策の検討、③将来水質予測等である。

【解説】

ダム貯水池における水質シミュレーションは、1-3 ページ図 1-2 に示すように水質変化現象の発生から効果確認までの各検討段階における主な活用用途を以下に記載する。

- (1)冷・温水現象、濁水長期化現象、富栄養化現象等に代表される<u>ダム貯水池で発現する</u> 水質変化現象の要因を解明すること
- (2) 発生している水質問題に対して効果的な水質改善対策を検討すること
- (3) ダム貯水池の将来水質予測を行い、<u>水質管理目標値を設定</u>することや気候変動影響を 検討すること

以下に主な活用用途として挙げた(1)~(3)について概説する。また、全国管理ダムにおける水質シミュレーションの実施状況等を 4-2 ページ「4. 資料編 4-2. 全国管理ダムにおける水質シミュレーションの実施状況とその目的」に示す。

(1) 水質変化現象の要因の解明

水質変化現象の解明は現地実測調査データに基づいてのみ実施されると考えられがちであるが、水質シミュレーションを活用することもできる。

調査データには、様々な時空間スケールのデータがあるが、基本的には"点"のデータである。これにシミュレーションを組み合わせることで効果的な検討が可能となる。

濁水長期化現象のメカニズム解明が比較的わかりやすい例として挙げられる。流入してきた濁水がダム貯水池の中をどのように貫入・拡散していき、ダム下流へ放流されていくのか、といった過程を現地観測だけですべてを捉えることは難しい。

濁質の挙動に関しては、ダム貯水池内でどのような現象が生じているかについて過去の研究等である程度解明されており、一定の仮説を立てることができる。そこで、水質シミュレーションモデルにより、この仮説をモデル化し、実現象を再現して、実測データを用いて再現性の検証を行うことで、生じている現象を時空間的に再現することが可能となる。また、条件の異なる実測データを整備すれば、モデルの検証を実施していくこと等により、シミュレーションの現況再現性の向上を図ることができ、説明性の高い現象解明として活用することもできる。

以上の結果は、対象とするダム貯水池の水質変化現象やその要因の詳細な理解、それを 考慮した的確かつ効果的な対策の検討などに活用することができる。

Plan:メカニズム仮説の設定

- (1)発生源の推定
- (2)発生源~現象との関係性の設定
- (3)仮説検証のための調査計画立案



Do :計画に基づく調査実施

(1)仮説検証のための調査の実施



Action :メカニズム仮説の見直し

- (1)各種データ等の更新
- (2)メカニズムに係る新たな要素(不足 する情報)の抽出及び追加
- (3)メカニズム仮説の修正



Check:メカニズム仮説の検証

- (1)調査結果の分析
- (2)水質シミュレーションによる現象再現・ 感度分析
- (3)メカニズム仮説の確からしさの検証

図 2-2 発生メカニズムの推定に関するPDCAサイクルの概念図 2)

(2) 水質改善対策の検討

水質シミュレーションは、対象とするダム貯水池内の水質改善対策の検討に活用することができる。現在実施されている水質シミュレーションの多くはこれを目的としている。

選択取水施設の設置・運用により冷水対応や濁水長期化対応、アオコやカビ臭の発生に 対する気泡式循環施設の設置等、考えられる対策の効果を比較検討したり、導入する水質 保全施設(気泡式循環施設等)の設置基数や設置箇所を検討したりすることに水質シミュ レーションが活用できる。また、現在導入している水質保全施設の効果の検証や効果的な 運用方法の検討といったことにも活用することができる。

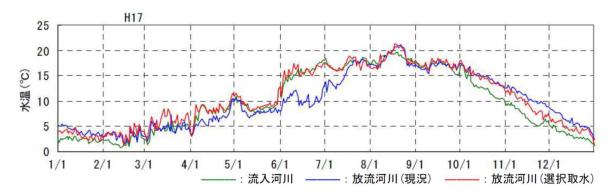


図 2-3 水質シミュレーションによる放流河川水温の比較例(選択取水有無)2)

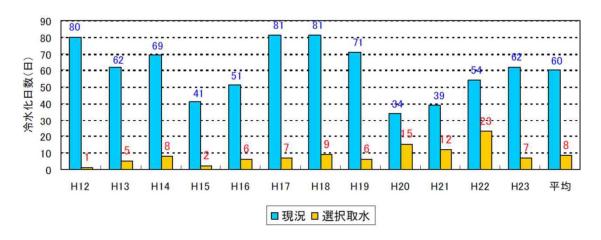


図 2-4 水質シミュレーションによる冷水放流対策(選択取水)の検討例²⁾ ※シミュレーション結果より冷水化日数を算定、選択取水による冷水化日数の軽減を評価

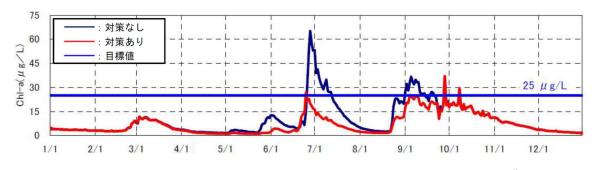


図 2-5 水質シミュレーションによる富栄養化対策の比較例(対策有無)2)

(3) 水質管理目標値の設定 (将来水質予測)

各種水質改善対策を実施した効果を予測し、ダム貯水池の水質管理目標値を定めること に水質シミュレーションを活用することができる。

水質管理目標は、対象とするダム貯水池において発生している水質変化現象や貯水池内及び下流河川における利用状況等に応じて設定することとなるが、水質改善対策の実施内容や規模により、その達成状況がどう変化するのか等を水質シミュレーションによって評価することができる。管理目標によっては、目標の間にトレードオフの関係が成り立っている場合もあり、バランスを考慮しつつ実現可能な目標設定を検討する際等に水質シミュレーションを活用することができる。

また、指定湖沼となっているダム貯水池など、湖沼の環境基準が適用されているダム貯水池において将来の水質目標値を設定するような場合にも水質シミュレーションが活用されている。

さらに、将来の気象条件や流域人口等の状況を考慮した入力条件を設定することで、気候変動等による影響を予測することも可能であり、将来の水質予測にも活用することができる(4-77 ページ「4-9. 将来水質予測・水質改善対策の検討に関する事例」に研究事例を紹介する)。

表 2-1 ダム貯水池における水質管理目標値の設定例

区分	目標の設定例	目標評価指標の設定例
冷·温水現象	・下流河川における冷・温水 現象の発生を抑制する。	 ・放流水温○℃以下を△日間以上継続させない。 ・ ●月~▲月間は放流水温を○℃程度とする。 ・ 放流水温と流入水温の差が●℃以上となる期間を▲日以下とする。
濁水長期化現象	・下流河川における濁水長期 化現象の発生を抑制する。	・ ○月~●月間の平水時の下流河川濁 度を△度以下に維持する。
富栄養化現象	・貯水池内でアオコの大量発生を抑制する。・貯水池内で発生するカビ臭が上水道に影響を与えないようにする。	 夏季(6 月~10 月)のクロロフィルa濃度を●μg/L 以下に維持する。 水道取水地点のカビ臭原因物質の濃度を△ng/L 以下に維持する。

コラム No. 1:水質管理指標としての TOC

■TOC とは(Total Organic Carbon:全有機炭素)

水中に含まれる有機物中の炭素量のことである。900~950℃で水中の有機物質を分解して 有機物中の炭素を二酸化炭素とし、その二酸化炭素濃度を測定することで炭素量を求める。 有機性汚濁の指標として用いられ、水道水質基準にもなっている。

■有機汚濁の指標 COD や BOD との関係

COD や BOD は「水中の有機物の分解に必要な酸素の量」であり、試験方法の特性上、水中の汚濁物質の分解率は100%ではなく、含まれる汚濁物質によって変わり、難分解性有機物(ゆっくり分解される有機物)の測定も困難である。一方、TOC の試験方法では汚濁物質の分解率はほぼ100%であるため、含まれる汚濁物質に関係しない測定値が得られる。

■有機汚濁指標である COD の問題点

湖沼の水質管理において、CODでは水質を十分に評価できない可能性が生じてきている。例えば、琵琶湖においては、下水道整備や工場排水対策等の進捗等によって琵琶湖へ流入する汚濁負荷は低減しているが、湖内の COD は流入負荷と連動した傾向が得られておらず、流域における対策の効果を十分に評価・反映することが困難であるとの報告がある。

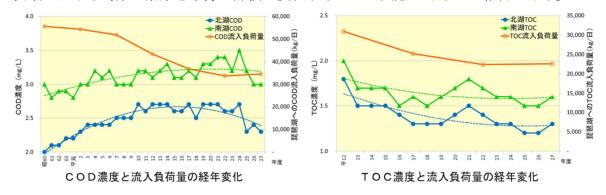


図 2-6 琵琶湖における COD、TOC 濃度と流入負荷量の経年変化 4)

■水質指標として TOC の導入に向けた取組

COD や BOD に代わって、TOC 等、新しい水質指標の導入の必要性が議論されている。 TOC は、流入負荷と湖内の水質において、より相関性の高い指標として効率的な湖沼管理への期待があるほか、TOC は炭素量であり、物質収支を把握することができるため、水域内の魚類や植物プランクトン等による内部生産など、生態系の課題にも対応することが可能である。一方、水域によっては TOC の測定データは十分ではなく、また、BOD、COD による水質管理に問題が生じていない水域も多い。このため、水域毎の水質特性や水質管理上の必要性等を踏まえ、今後の調査・研究、検討等や現場での水質変化に応じて対応していくことが必要である。

2-3. 水質シミュレーションを実施するにあたっての基本的考え方

水質シミュレーションの実施にあたっては、シミュレーションを実施する目的に応じて、 対象とするダム貯水池の水理・水質特性を考慮し、モデルの選定、入力条件の設定、モデルの検証(再現)、得られた結果の評価を適切に行う。

【解説】

ダム貯水池の水質シミュレーションの実施にあたっては、シミュレーションを行う目的を 明確にし、その目的を達成するために、①モデルの選定、②入力条件の設定、③モデルの構 築・検証、④モデルを用いた解析、⑤解析結果の評価の手順で実施する。

水質シミュレーションの実施にあたっては、対象とするダム貯水池の水理・水質特性を考慮し、解析の目的に応じた適切なモデルを選定するとともに、モデルの構築に必要となる入力データを適切に整備する必要がある。また、構築したモデルは、現地での観測データとの比較検証等の作業を通じて、解析の目的に対して必要な信頼性を確保することが重要である。

また、得られた計算結果を評価する際には、シミュレーションモデルでは、実現象を数値 モデルで表現できるように、平均化、単純化等を行っており、実現象そのものを表現してい るわけでないという点や、モデルや入力条件が有する不確実性等に留意して、適切な結果の 解釈・評価を行う必要がある。

次ページ以降、(1)~(5)には、各段階における基本的な考え方、実施に際してのポイントを示す。また、第3章には、具体的な水質シミュレーションの実施手順や各実施段階における標準的な検討方法、留意事項等を記載している。

シミュレーションの目的の設定 シミュレーションを実施する事象(水質変化現象等)の発生 に対して、①水質変化現象の要因解明、②水質改善対策 の検討、③水質管理目標値の設定、等シミュレーションを 実施する目的を明確化(2-4 ページに詳述) ①モデルの選定 ・対象ダム貯水池の水理・水質特性に応じたモデルの選定 解析の目的に応じた適切なモデルを選定 ②入力条件の設定 選定したモデルの解析において必要となる情報を整備 ・必要に応じて追加の現地観測を実施 ③モデルの構築・検証 モデルを構築し、検証(再現性確認)を実施 ・解析の目的に対して必要となる信頼性を確保 ④モデルを用いた解析 ・解析の目的に応じた解析ケースを設定し、構築したモデ ルを用いた解析を実施 ⑤解析結果の解釈・評価 ・解析結果の適切な理解・解釈に基づく評価 ・モデルの限界や不確実性の考慮

対策の検討・実施

図 2-7 水質シミュレーションを活用した水質改善対策検討の概略手順

(1)モデルの選定

前述のとおり、モデルの選定にあたっては、<u>対象とするダム貯水池の特性やそこで発生</u> する水理・水質変化現象等を把握した上で、ダム貯水池の特性や実施したい解析の目的に 応じて適切なモデルを用いることが重要である。

どんな場合でも、<u>複雑・高度なモデルを使用すれば、より正しく精緻な結果が必ずしも</u> 得られるとは限らない。解析の目的に照らして、必要な時空間解像度、解析対象項目を吟味するとともに、解析に用いることができる入力データの整備状況も考慮し、目的に合ったモデルを選定する必要がある。

また、一般的に、モデルは複雑になればなるほど、モデルの構築に要する手間や計算時間が飛躍的に増加し、得られる結果の出力や可視化作業に係る労力も増大する。また、水質シミュレーションモデルでは、多くのパラメーター値を設定する必要があり、高度なモデルになれば、データ収集やモデルの検証に要する労力も増大する。

解析の目的を踏まえ、水質シミュレーションモデルに求める性能(空間解像度、時間解像度、計算項目、計算期間等)を設定し、投入する労力や費用と期待されるアウトプットのバランスも考慮してモデルを選定する。

■ ダム貯水池における水理・水質現象と解析法

ダム貯水池は、一般的には、以下のような特性を有している。

- ①貯水容量に対して流入出量が比較的大きい(滞留時間が比較的短いものが多い)
- ②流下方向に細長く、上流端からダムサイトにかけて徐々に水深が深くなる形状
- ③水表面積に比べて水深が深いものが多い
- ④洪水調節、利水運用等の人為的操作が実施される
- ⑤気泡式循環施設、選択取水施設等の各種の水質対策施設が運用されるものが多い 等また、ダム貯水池における水理・水質現象は、上記のような特性に加えて、様々な時空

間スケールの現象から構成されている。すなわち、ダム貯水池の水理・水文的な特徴や、 平均的な水質レベル、富栄養化の程度といった比較的時間スケールが長く、貯水池全体を 取り扱うような現象から、洪水時の濁水挙動や取水施設近傍の局所的・詳細な現象といっ た、短い時空間スケールの現象など、様々なものがある。

したがって、ダム貯水池における水理・水質現象の解析を行うにあたっては、上記のようなダム貯水池における水理・水質特性、解析の目的とする現象に応じた解析法を適切に 選定することが重要である。

表 2-2 貯水池における水理・水質現象の時空間スケールと解析法(5)に加筆)

水理現象•水理特性	関係要素 (環境境界条件)	時間 スケール	空間 スケール	用いられる解析法
・水理・水文的性格 ・水温・水質植のレベル ・富栄養化の程度 など	・年間流入量, 地理的位置, 地質, 地形, 気候条件・流域の植生及び産業構造など	1 年以上	貯水池規模 以上	・水温成層による定性的分類 ・平均年回転率 ・平均的内部フルード数 ・Vollenweiderの富栄養化指標 など
・水深方向の水温分布特性・濁度を除く水質分布特性	気温の季節的変化流出入水温の季節的変化	季節あるいは	貯水池規模	・システム解析法 (ボックスモデル)
など		月	水深方向に	
・平常時の水温・水質値の変化 など		数日~ 1週間程度	1〜数m 流れ方向に 貯水池長 あるいはそ れ以上	・二層流・三層流モデル ・鉛直一次元モデル
			流れ方向に	・鉛直一次元モデル
・成層破壊時を除く洪水期の水温変化・洪水後の貯留過程におけ	・流出入流量,流出入水温・ 濁度・濃度,気象条件の日 平均変化		1〜数 km 水深方向に 1〜数m	・鉛直二次元モデル
る濁度変化 ・植物プランクトン異常増殖	と ・クトン異常増殖	1日程度	流れ方向に 100~数面m	
時の各種水質変化 ・ばっ気施設による貯水池 循環及びそれに伴う水質 変化など			あるいはそ れ以下	(三次元モデル) ※貯水池横断方向の変化を 考慮する必要がある場合 (取排水施設周辺等の局所
・洪水期における濁度・濃度の流下伝播過程 ・成層破壊時の水温変化表面水温の日変化など	・洪水期の流量・濁度・濃度, 気象条件の時間変化	1時間 あるいは それ以下	水深方向に 1〜数m あるいはそ れ以下	的な流れやそれに伴う水 質変化等)⇒空間スケー ルは横断方向に数 10m あるいはそれ以下

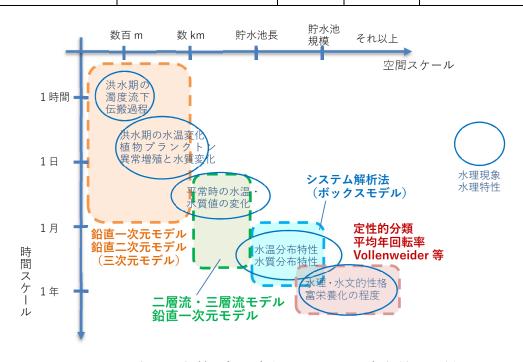


図 2-8 水理・水質現象の時空間スケールと解析法の関係

■ ダム貯水池における水理・水質現象のモデル化

ダム貯水池における水質シミュレーションモデルの基本式は、連続の式、運動量収支式、 物質保存式、熱エネルギー保存式などであり、必要に応じてこれら保存式の組み合わせで モデルが構築される。

これらに共通することは、下式で表現される物理量に関する保存であり、対象とする物理量や変化量は、解析の目的に応じて設定する。

単位時間当たりの物理量の蓄積(変化)

=単位時間当たりの物理量の流入-単位時間当たりの物理量の流出土変換速度**

※変換速度は、単位時間当たりの物理量の変化(物理量/時間)を示す。

ここで、S を物理量(水量や土砂、栄養物質のような質量に加え運動量や熱量なども含む)、t を時間、 Q_{in} と Q_{out} をそれぞれ単位時間あたりの物理量の流入量、流出量、また R を変換速度(藻類の増殖やそれに伴う栄養塩の吸収など)とする。

このとき上記の基礎保存則は次のように定式化される。

$$\frac{dS}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \pm \sum R$$

上式は所定の計算領域(エレメント)に関するものであり、貯水池全体と捉えるとボックスモデル、あるいはメッシュに分割したモデルの各メッシュと見ることができる。

(2-18ページコラム No.2: ダム水質モデルに関する概説を参照)

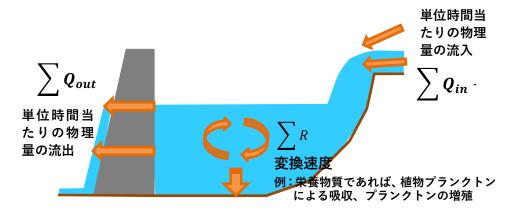


図 2-9 物理量の蓄積(変化)のイメージ(ダム湖を1つのエレメントとした場合のイメージ)

■ ダム貯水池において適用されるシミュレーションモデルの構造

ダム貯水池において適用されるシミュレーションモデルの構造例を図 2-10、表 2-3 に示す。解析の実施にあたっては、例示したモデルの中から、解析目的に応じた適切なモデルを選定する。複雑・高度なモデルを用いれば、より良い結果が得られるわけではなく、目的に応じた解析法を選定することが重要である。詳細な予測結果が必要となり、高次なモデルを用いる場合でも、当初は簡易な手法(低次のモデル)で大まかな傾向を掴んだ上で、必要な部分のみ詳細化(高次のモデル化)するといった手順で実施することが有効な場合もある。

(2-21 ページコラム No.3:モデル構造の選定例を参照)

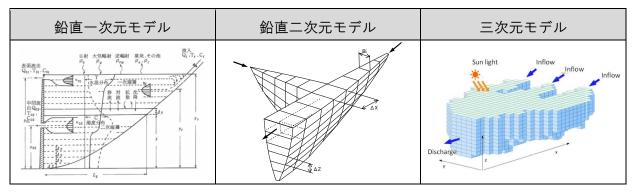


図 2-10 シミュレーションモデル概念図

鉛直二次元モデルと一次元多層モデル/三次元モデルと平面二次元多層モデル

水域を流下方向及び水深方向に分割するモデルの呼称として、「鉛直二次元モデル」「一次元多層モデル」が使い分けられる場合がある。その場合、前者は流下方向及び水深方向の運動方程式を省略することなく計算する場合、後者は、流れの鉛直方向の加速度を無視しても流れ場の再現に問題がない場合に水圧を静水圧分布で仮定する「静水圧近似*」を適用している場合をそれぞれ指している。

同様に、水域を水平方向及び水深方向に分割するモデルの呼称として、「三次元モデル」と「平面二次元多層モデル」が使い分けられる場合、後者は「静水圧近似」を適用している場合を指している。

いずれも水域の分割の仕方が異なるわけではなく、流動モデル上の取り扱いの違いを指している。

なお、本マニュアルで用いている用語「鉛直二次元モデル」「三次元モデル」は、特に断りのない場合、水域分割の仕方を指している。

※静水圧近似:静水圧の関係は、厳密には静止している流体中で成り立つ関係であるが、流れの鉛直方向の加速度を無視しても流れ場の再現に問題がない場合に、水圧を静水圧分布で仮定することができるとする方法。鉛直方向の運動方程式を省略せずに計算しなければ再現が難しい現象を対象とする場合等を除き、実用的に充分現象を再現でき、計算時間の短縮が可能であることから、使用事例が多い。

表 2-3 ダム貯水池における水質シミュレーションモデル(例)(1)を改変)

項目	ボックスモデル	鉛直一次元モデル	ローションモテル(例)(1) を収象) 鉛直二次元モデル	
特徴	・水理量は収支のみ・水質はボックスの平均値・ボックスは複数設定することも可能	・水域を鉛直報告に層に分割し、水理量・水質の鉛直分布を計算 ・水理量・水質は層ごとに求められるが、 水平方向の分布は一様とみなしている	・水域を縦断・鉛直方向にメッシュ分割し、水理量・水質の縦断・鉛直分布を計算・水理量・水質はメッシュごとに求められるが、横断方向の分布は一様とみなしている。	・水域を縦断・横断鉛直報告にメッシュ分割し、水理量・水質の三次元分布を計算・水理量・水質の三次元的な分布が求められる。
適用できる水域の条件	・ボックス内での水質分布が一様とみなせるダム貯水池・流動の時間変化の影響をある程度無視できる。	・水平方向の水質分布が一様とみなせる ダム貯水池 ・水平方向の流動の時間変化の影響があ る程度無視できるダム貯水池 ・比較的形状が単純なダム貯水池	・縦断・鉛直方向に水質変化が生じるダム 貯水池(例えば、河川のように細長いダム貯水池) ・横断方向の流動の時間変化の影響がある程度無視できるダム貯水池 ・支川が枝分かれするような形状が比較的複雑なダム貯水池でもある程度適用可能	・水平方向、鉛直方向に水質分布が生じるダム貯水池(例えば、密度流の生じるダム貯水池、水深の大きなダム貯水池)・平面形状が複雑なダム貯水池・支川が枝分かれするような形状が比較的複雑なダム貯水池でも適用可能
計算対象	・水質のボックス内平均値・水面における熱交換・物質収支(流入出+沈降)・底質からの負荷は考慮可能	・水質メッシュ内平均値・水面における熱交換・水理量、水質の鉛直分布・物質収支(流入出+沈降)・移流と拡散・ 底質からの負荷は考慮可能	・水質のメッシュ内平均値 ・水面における熱交換 ・水理量、水質の縦断及び鉛直分布 ・物質収支(流入出+沈降) ・移流と拡散 ・底質からの負荷は考慮可能	・水質のメッシュ内平均値・水面における熱交換・水理量、水質の三次元分布・物質収支(流出+沈降)・移流と拡散・底質からの負荷は考慮可能
長所	・計算時間が非常に短い・長期的な水質予測が可能	・計算時間が短い ・長期的な水理量・水質予測が可能	・計算時間が三次元モデルより短い・中期的(1~数10年)な水理量・水質予測が可能・密度流による流れを考慮できる。・水温成層を制御するような対策の検討が可能	・現象の三次元的把握が可能・局所的な水理量・水質の特徴が表現できる・密度流や風による流れ等を考慮できる。・より複雑な湖内対策施設の配置計画検討が可能
短所	・全層混合を仮定しているため水温成層が形成される ダム貯水池には適さない。・空間的な水質分布を表現できない。	・平面的な水質変化の把握ができない。・局所的な現象が表現しにくい。	・横断方向の水質変化が表現できない。 ・吹送流など横断方向に分布が生じる流 動を表現できない。	・ 三次元メッシュ分割を行うため、膨大な 計算時間を要する。・ 中~長期計算には不向き。

1		כ
-	5	1

項目	ボックスモデル	鉛直一次元モデル	鉛直二次元モデル	三次元モデル
適用でき る水質変	[現象]富栄養化	[現象]冷•温水、濁水長期化、富栄養化	[現象]冷•温水、濁水長期化、富栄養化	[現象]冷・温水、濁水長期化、富栄養化
化現象及び主な対策	[対策]底泥浚渫効果予測	[対策]選択取水施設の効果予測 気泡式循環装置の効果予測 底泥浚渫効果予測	[対策]選択取水施設の効果予測 フェンスの効果予測 気泡式循環装置の効果予測 底泥浚渫効果予測	[対策]選択取水施設の効果予測 フェンスの効果予測 気泡式循環装置の効果予測 底泥浚渫効果予測
備考	・ボックス内での全層混合を 仮定するため、鉛直方向の 水温・水質の違いを利用す る選択取水や気泡式循環 等の対策の表現が困難で ある。	・1層内での水平方向の水質変化を一様と仮定するため、流下方向の流れを利用するフェンス等の対策の表現が困難である。	 ・縦断・鉛直方向の水質変化を表現可能であり、鉛直方向の水質の違いを利用する選択取水や気泡式循環、縦断方向の水塊の分離を利用するフェンス注)等の対策の表現が可能である。 ・水理解析ルーチンの高度化やメッシュ分割の細密化により計算時間が増大する場合もある。 	 ・縦断・横断・鉛直方向の水質変化を表現可能であり、鉛直方向の水質の違いを利用する選択取水や気泡式循環、縦断方向の水塊の分離を利用するフェンス等の対策の表現できるほか、横断方向の水質変化が表現可能であり、水質保全設備の配置もより詳細に表現できる。 ・流入支川と取水地点の位置関係により横断方向の状況を把握する必要がある場合に対応が可能である。 ・モデルパラメーターの設定範囲等の知見が十分でなく、精度確保のため調査、設定作業が多くなる。

注)出水時の濁水や栄養塩類に富んだ流入水を深層部に導水するための設備

(2)入力条件の設定

水質シミュレーションの実施に必要な<u>入力条件の整備は、その入力条件の精度が水質シミュレーションの計算精度を大きく左右するという点において非常に重要</u>である。モデルがいかに適切なものであっても、<u>入力条件が解析目的や構築するモデルにおいて必要となる情報(データ)*が充分でない場合、計算結果の信頼性は低いものとなる</u>ことに留意すべきである。

モデルを構築する際に、入力条件として不足していると気がつく場合も多く、そのような場合には追加の現地観測を実施して、必要な情報(データ)を取得することも重要で、そうした水質シミュレーションと現地観測の相互運用を行っていくことがダム貯水池の水質管理には重要である。

※充分でない情報 (データ) の例:出水時の現象を解析しようとしているにもかかわらず日データしかない場合、解析しようとする現象において無視できない支川に観測地点が設定されていない場合、出水時の負荷が支配的なダム貯水池の検討において降雨時の観測データを含まない L-Q 式で流入負荷量を与えざるを得ない場合などが挙げられる。

(3) モデルの構築・検証

対象ダム貯水池のシミュレーションモデルを構築するとともに、パラメーターの調整等により、解析の目的達成のために必要となるモデルの信頼性を確保するため、モデルの検証作業を行う。水質シミュレーションでは、多くのパラメーター値を設定する必要があり、実測値に合うようにパラメーターを調整することが必要となる。

モデルの検証に際しては、実測値への適合度により評価するが、<u>単に実測値に合っているということだけでなく、季節変化や降雨後の水質変化現象の状況や、対象である貯水池の特徴(例えば夏場の藍藻類の増殖等)が再現されているのかを確認</u>や、水・物質収支の点検(入力条件の設定の妥当性確認)などの総合的な視点から評価することが重要である。

なお、再現しようとする現象やパラメーターの持つ意味を理解することなく、単に実測値に合うように設定したような場合、その計算に関して、たとえ良い再現性を得られたとしても、異なる条件で計算した場合には、良好な計算結果を得られるとは限らず、このような場合にはむしろ不合理な計算結果となり、注意が必要である。

また、検証に用いる実測データも同様に重要である。対象ダム貯水池でモデル化しよう とする現象を検証するに足る充分なデータを用いて検証する必要があり、不足する場合に は追加の観測を検討する必要がある。

(4)モデルを用いた解析

検討の目的に応じた解析ケースを設定し、上記(3)の検証によって信頼性が確保された モデルを用いて解析を実施する。 <u>解析ケースの設定にあたっては、水質シミュレーションを実施する目的を効率的・効果</u> 的に達成し得る視点から設定することが重要である。

解析から得られるアウトプットを明確に設定するとともに、データレビューや検証作業を通じて得られた対象ダム貯水池の特性に関する知見等も活用し、計画的なケース設定を行う。解析を進めながら場当たり的にケース設定すると、無駄なケース設定となる場合や、検討すべきケースを見逃すことにもなりかねないので、留意が必要である。

(5) 結果の解釈・評価

解析結果について、シミュレーションの目的に照らし合わせて解釈・評価を行うととも に、必要に応じて具体的な水質改善対策の計画・検討を行う。

なお、水質シミュレーションでは、実現象を数値モデルで表現できるように、平均化、 単純化等を行っており、実現象そのものを表現しているわけでない。例えば、モデルでは 時空間的に平均的な扱いをしており、地形による局所的な現象などは表現されていない。 構築した水質シミュレーションモデルの再現性や得られた予測結果の解釈・評価にあたっ ては、以上の点に留意する必要がある。

また、モデルそのものに含まれる誤差や、時空間的に限られた入力条件によって構築したモデルが有する不確実性等、様々な不確実性を含んだものであることに留意して、結果の解釈・評価を行う必要がある。

コラム No. 2: ダム水質モデルに関する概説

ダム水質シミュレーションモデルについては、多種多様なモデルが開発されてきた。ここでは、ダム湖内に注目したモデル作成のための基本的な考え方について概説する。

基本となる法則は、連続の式、運動量収支式、物質保存式、熱エネルギー保存式に大別され、必要に応じてこれら保存式の組み合わせでモデルが構築されることとなる。これら総ての法則に共通する原理は、次式で表現される所定の物理量に関する保存式である。

単位時間当たりの物理量の蓄積(変化)

=単位時間当たりの物理量の流入-単位時間当たりの物理量の流出土変換速度*(1)

上式は所定の計算領域(エレメント)に関するものである。

※変換速度は、単位時間当たりの物理量の変化(物理量/時間)を示す。

1 モデルの次元数について

モデルの次元数は3次元、2次元、1次元などが使われることがある。一般的には座標系が提示され計算のための基礎式が提示されているが、そのことについて補足しておきたい。これらの次元は、始めに座標系(軸)ありきで、定式化のプロセスが説明されていることが一般的である。そのために、前提条件が要求されることとなる。

鉛直1次元モデルを例にして説明したい。通常は、鉛直方向(重力方向)に座標を設定し、 所定のエレメントを量子化(空間ステップを設定)して基礎式を構築するのが一般的である。 そのために1次元化するための前提条件として鉛直方向以外の濃度分布は一定であること などを(前提条件として)付与するケースが見受けられる。このことにより、その前提条件 は妥当であるかどうかの吟味が要求されることになり、場合によっては計算結果に対する評 価が劣化することもある。

もう一つのアプローチは、3次元の基礎式を水平方向に積分(平均)化することにより3次元を2次元さらに1次元にまで次元を低くできることである。このことにより、空間の次元を積分化(平均化)することにより取り扱う物理量の意味も異なって来るが、この場合のメリットは平均化の対象となる濃度分布の前提条件(均一)をあえて設定する必要がないことが挙げられる。

また、同様に、ボックスモデルについても、3次元モデルを3次元空間で積分(平均)することによっても得られるが、この場合、完全混合状態という前提条件は必ずしも絶対なものではないことにも留意されたい(濃度分布が均一に近い方が実測値と検証する場合などには容易となることは事実であるが)。特に、密度流の影響が顕著な場合は、平均化手法の有無にかかわらず、いずれの場合にも、その影響について留意しなければならない。

2 流動モデルと水質モデル

ダム湖内のモデルにおいて、流動モデルの基本は、下記のようである。

①質量保存式、②運動量保存式

上記の2式について、式-(1)の表現を使えば、①は質量の輸送方程式、②は運動量の

輸送方程式と表現される。運動量の輸送方程式とは、当然のことであるが輸送される物質量は運動量である。そして、エレメントの内部状態を示す物理量として、圧力と密度が含まれている。運動量輸送についての留意点は、運動量の輸送(流速×流速)に由来する移流項(慣性項)であり、この項は非線形成分を有していることから、条件によってはわずかな擾乱が拡大し、乱流といわれる非定常現象が現れる。乱れ成分の輸送量を解析的に取り扱う(モデル化する)ために時間平均速度を用いて定式化すると残渣成分である乱流に起因する付加的な応力(テンソル)が現れ、平均流に対しては見かけ上、粘性的な挙動を示す(渦運動を減衰させる作用がある)。このことから乱れ成分の輸送量を平均速度勾配に比例するとして、定式化し、その係数は渦動粘性係数と表現されることがある。このようにダム流動に関する流動のモデル式は、まず、時間的に平均化されたものが基本となっていることに注意する必要がある。

ダム水質モデルに関して、流動モデルとの関係で重要な現象の一つに拡散輸送に関するものがある。この拡散については、分子拡散、渦動拡散、そして移流分散が挙げられる。運動量の渦動拡散と物質の渦動拡散は時間平均化によって表現されるものであるが、分散は空間的に平均化することによって付加される見かけの輸送であり、渦動拡散と移流分散は本質的に異なるものである。

③熱保存式

流体が水以外の物質を含んでいなければ、密度は水温で規定されるため、水温分布は、密度分布として、運動方程式に関連づけられることになる。このため、運動方程式と熱保存式の連結モデルが必要となる。流体内部の密度の不均一は、重力差による特有の流れである密度流が発生することになるが、濁質も密度と関連するため、流れの方程式と連結されることとなる。この取り扱いについては、後述する物質保存式のところで補足する。なお、海域では塩分もモデル化が必要となるが、ここでは対象外とする。

④物質保存式

ここでは密度と関連性の強い水温、濁質、気泡に関する保存式について言及する。ダム水質に関連する物質保存式で密度の不均一性の流れに関与する物質は、水温依存の密度、懸濁性物質濃度、そして気泡密度が対象となる。それらの物質に関するダム水質問題は、冷温水問題(水温)、濁水問題(懸濁性物質)、曝気循環問題(気泡密度)に大別され、物質保存式が各々構築されることになる。重要なことは、それらが運動方程式と相俟って相互に関連することとなる。それらを概念図で表現すると図 2-11 のように表される。また、濁質と気泡双方の物質輸送に関しては流体速度に対する相対速度が運動方程式に導入されるとした場合、それらの相対速度は濁質に関しては、沈降速度、気泡に関しては気泡上昇速度が呼称される。いずれにしても、これら物質は濃度に応じて密度流的挙動を示すことがあるので注意が必要である。

図 2-11 における乱れと密度配置との関連について、乱れによる物質混合(乱流拡散)は、

渦動粘性と同様の形式で表現され、密度配置(密度分布)によって拡散が抑制されることに 特徴づけられる。密度分布は乱れにより均一化され、同時に密度分布が乱れを抑制・減衰化 するため、密度を取り扱うモデルにおいては、原理的には密度と乱れの双方を再現できるよ うにモデル化しなければならない。具体例として、ダム貯水池の成層期に水温分布が存在し ている時、風(乱れ)により鉛直混合が進むと水温分布が均一化されるが、乱れが弱い、も しくは成層状態が強ければ混合拡散(乱流混合)が抑制されるため密度成層が安定して持続 されることになる。気泡式循環施設による水質改善効果を把握する際には、原理的には気泡 密度に関する保存式も要求されることになるが、気泡噴流の挙動で用いられる連行現象のよ うに、原理的には運動方程式と気泡密度との関連性も考慮しなければならず、モデル化に際 しての取り扱いは、極めて複雑となる。実務レベルでは本質を見失わない範囲での簡略モデ ルが開発されている。濁水については、出水時の高濁度濁水がダム貯水池に流入する場合、 ダム貯水池の成層条件によっては流入運動量によってダム貯水池へ密度流的に貫入するケ ースも想定される。当然のことであるが出水時の運動量が極めて大きい場合にはダム貯水池 を完全混合状態に近い状態へ移行させることとなり、濁水長期化の一因となることがある。 一方、成層状態下での濁水が貫入するような場合、安定した成層条件下での鉛直方向の拡散 輸送の減衰に加えて、濁水濃度が希薄であれば沈降が支配的となるが、高濃度濁水の密度流 的挙動が卓越する場合のモデル化は一般的には難しい。

以上を総括すると、流れに関する連続の式、運動方程式、密度に関する方程式は、図 2-11 に示されるように相互に関連しあうことである。これらの因果関係を同時に考慮しつつ藻類増殖、栄養塩類等の他の水質項目を対象にして数値計算を行うことは一般的には困難であり、問題分析結果等を介して、必要となる出力条件を加味しつつ、モデルの簡略化など計算コスト等を考慮して総合的に判断する必要がある。

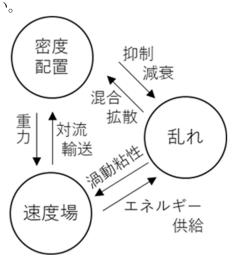


図 2-11 密度流の概念図 6)

シミュレーション結果を観測値と比較検証する際、原理的には、流れに関する結果の検証を踏まえつつ、水質観測データと検証することになる。しかしながら、流れに関するデータ収集が困難であることから、ダム貯水池の流れの計算結果の妥当性は、実務上は水温の検証を行うことで代替するとよい。他の水質観測データを用いて検証を行う場合に比較的容易な手法は、保存系の物質を利用して移流、分散(拡散)の輸送量を見積もることである。海域では、塩分が一般的に用いられるが、ダム貯水池では活用できないので、複数の観測データを用いて総合的に判断せざるをえないのが現状であろう。

コラム No. 3:モデル構造の選定例

適用するモデル構造の選定にあたっては、貯水池の水理・水質的な特性及び水質シミュレーションを実施する目的から適切に選定することが重要である。

例えば、

- ・水温成層などの鉛直方向の水質現象を再現する場合は、鉛直方向に多層化される鉛直一次元モデル、鉛直二次元モデル、三次元モデル 等を選定する必要がある。(ダム貯水池ではこの条件を満たすことが重要となることが多い)
- ・貯水池長が長いダム貯水池で、鉛直方向・流下方向の流動・水質の分布状況を把握する 必要がある場合は、鉛直一次元モデルではなく、それ以上の次元のモデルを選定するこ とが望ましい。
- ・例えば、貯水池形状が枝分かれ形状を呈し、それぞれの枝における水質を検討する必要がある場合(図 2-12①)、流入河川や取水前後の水質を取り扱う必要がある場合(図 2-12②)、水質改善対策の検討において、フェンスの導入を対象とする場合(図 2-12 ③)などは、鉛直二次元モデル以上のモデルを用いる必要がある。
- ・また、気泡式循環施設を導入する際、必要な台数の検討を行うためには、鉛直二次元モ デル以上のモデルを用いた方がよりきめ細かな解析が可能である。
- ・一方、10 年~数十年間等長期間の計算が必要な場合で、貯水池の平均的な水質の変化 を検討する場合等は、鉛直一次元モデル等のシンプルで計算時間の短いモデルを選定す る方がよい場合もある。空間的に詳細な検討が不必要にも関わらず、三次元モデルなど 高次元なモデルを選定すると、モデル構築に要する労力や計算時間が膨大になってしま うため、留意が必要である。

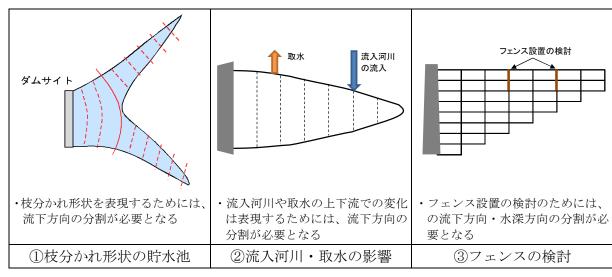


図 2-12 鉛直二次元以上のモデルの選定が必要となる場合の例

コラム No. 4: Vollenweider モデルを用いた富栄養化の可能性の予測

Vollenweider のモデルは、富栄養化現象の発生に関する主要な制限因子であるリンに着目した簡易モデルである。簡易モデルとして、我が国の実務でも多く用いられて来ているものである。このモデルは、図 2-13 のような図中に対象ダムを条件からプロットし、図中の 2 本線との位置関係から富栄養化現象の発生可能性を判定するという使い方が行われている。

しかし、このような一見、統計的モデルであるかのような使い方は、このモデルの本質と 異なるものであり、注意が必要である。Vollenweider のモデルの本質は、湖沼の水環境条件 について定常状態を仮定した湖内リン濃度予測のボックスモデルである。それは以下のよう に導出されたものであり、それを理解した上で図 2-13 のような利用することが望ましい。

湖沼を完全混合状態と仮定したリンの物質収支式は、次のように表される。

$$\frac{dPV}{dt} = Q_i P_i - QP - \frac{V}{H} vP \qquad \cdot \cdot \cdot (1)$$

ここで、V: 湖容量(\mathbf{m}^3)、 Q_i : 流入量(\mathbf{m}^3 /年)、 P_i : 流入リン濃度(\mathbf{g}/\mathbf{m}^3)、Q: 流出量(\mathbf{m}^3 /年)、P: 湖水のリン濃度(\mathbf{g}/\mathbf{m}^3)、H: 平均水深(\mathbf{m}) = V/A、A: 湖底の表面積(\mathbf{m}^2)(近似的に水面積と等しく取り扱うことができる)、v: リンの平均沈降速度(\mathbf{m}/\mathbf{r} 、通常は $10\mathbf{m}/\mathbf{r}$ を用いる)である。

式(1)は、湖水中のリン総量の変動(左辺)が、リンの流入負荷量と流出負荷量及び湖内での沈澱量の差し引き(右辺)であることを表す。これに定常状態($P={\rm const.}$ 及び $Q_{\rm i}=Q$)を仮定し、変形をすると、下式となる。

$$\frac{H}{V}QP_i = P\left(Q\frac{H}{V} + v\right) \cdot \cdot \cdot (2)$$

さらに単位湛水域面積当たりの年間リン流入負荷量 $L=\frac{H}{V}QP_i$ (g/m³/年)、回転率 $\alpha=\frac{Q}{V}$ (1/年)で置き換えると、

$$L = P(\alpha H + v) \cdot \cdot \cdot (3)$$

という Vollenweider のモデル式が得られる。この式の意義は、面積負荷Lという概念を示しつつ、平均水深と回転率 (滞留時間) が湖沼の富栄養化と関係が深いことを示したことにある。さらに、それを図 2-13 のようにグラフ化し、実際の湖沼から収集した情報に基づいて、富栄養化限界を示すリン濃度 (0.03mg/L, 0.01mg/L, 表 2-4 参照) を検証したことが、Vollenweider のモデルの秀逸な点である。

したがって、図 2-13 で「富栄養化現象の可能性が高い(低い)領域」として示されているのは、本モデルから予測される湖水のリン濃度Pがそれぞれ 0.03mg/L より高いか 0.01mg/L より低いかを表しているものであることに改めて注意するべきである。すなわち、式(2)や式(3)に対して

$$P = \frac{L}{\alpha H + v} = \frac{QP_i}{Q + \frac{vV}{H}} \cdot \cdot \cdot (4)$$

として求めた湖水のリン濃度Pにより、富栄養化現象の発生可能性を評価することが、Vollenweiderの合理的な活用方法である。

表 2-4 湖内リン濃度による Vollenweider の富栄養化限界

栄養塩状態	全リン濃度 (mg/L)
極貧栄養	< 0.005
貧~中栄養	$0.005 \sim 0.010$
中栄養	$0.010 \sim 0.030$
中~富栄養	$0.030 \sim 0.100$
富栄養	> 0.100

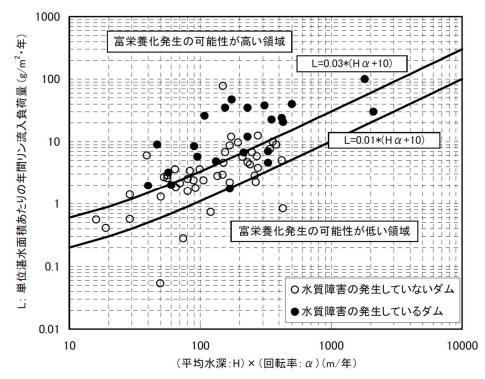


図 2-13 Vollenweider モデルを用いた実際のダム貯水池のプロットと水質障害発生有無との関係 71

コラム No. 5: 実務におけるモデル選定の留意点

現時点で我が国のダム貯水池で実施されている水質シミュレーションは、建設コンサルタント会社への業務委託によって実施されていることが殆どであると想定される。

委託に際しては、発注者がモデルに必要な性能を示し、受注者が保有している独自のモデルをその性能に合わせて改良して実施していると考えられる。これによって新規にモデルを開発する時間と費用をある程度抑制することが可能となっていると考えられる。

ただし、このような形で構築されたモデルは、その使用権限が業務受注者である場合が多い。発注者がこのモデルを継続して使用したい場合には、モデルを新規開発する、広く一般に利用可能なモデルを用いる等が考えられる。

以下に、モデル選定に際しての留意点を示す。

(1) 新規にモデル開発を行う場合の留意点

新たにモデル開発を行う場合は、解析の目的に応じて任意の設定が可能なモデルを構築することができるため、きめ細かい検討を実施することが可能である。一方、高度な専門知識が必要となり、多くの場合、モデルの構築に要する時間・費用は大きくなることに留意する必要がある。

(2) 広く一般的に利用可能なモデルを使用する場合の留意点

パッケージ商品として販売されているモデル(ライセンス料金を支払うことで使用可能) や無償利用可能なモデルを選定する場合は、すぐに検討を開始することが可能であり、モ デルの構築に要する時間・費用を抑制することができると想定される。一方、モデルの有 している機能が実施したい解析目的に合致していない場合(構築されていない水質保全施 設の効果を検証することなどができない等)、適切なモデル解析が実施できない可能性が あることに留意する必要がある。

【2章の参考文献】

- 1) ダム貯水池水質調査要領:国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 27 年 3 月 https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/suishitsu/index.html
- 2) ダム貯水池水質改善の手引き:国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成 30 年 3 月

https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf2/damtyosuichisuisituka izentebikiH30.pdf

- 3) ダム貯水池の水環境 Q&A: 財団法人ダム水源地環境整備センター
- 4) 滋賀県環境・農水常任委員会資料 3:水質評価指標としての TOC 導入に向けた取組について (平成 29 年 12 月 15 日)

https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment/39075.pdf

- 5) 松尾直規:「貯水池における水温、濁度並びに富栄養化現象の予測に関する水理学的研究、昭和57年3月
- 6) 粟谷陽一 第 12 回土木学会夏期研修会講義集 1976 年 http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00027/1976/12-A04.pdf
- 7) 湖沼における水理・水質管理の技術(平成19年3月)湖沼技術研究会
- 8) Vollenweider, R. A.: Input-output models with spacial reference to the phosphorus loading concept in limnologie. Hydrologie, 37, 53-84(1976)
- 9) Vollenweider, R. A.: Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 33, 53-83 (1976)

3. ダム貯水池における水質シミュレーションの実施

前章では、ダム貯水池における水質シミュレーション実施における基本的考え方として、 ダム貯水池において適用される解析法や、様々な構造のモデルの特徴等について紹介した。 本章では、実際に水質シミュレーションを実施する際の実施手順及び各実施段階における 標準的な検討方法や留意事項等を具体的に示す。

記載する内容の多くは、採用するモデル構造に関わらず共通のものであるが、流動モデルの概説やモデルのメッシュ分割作業などモデル構造により作業内容が若干異なる箇所においては、鉛直二次元モデルの場合を例示しながら解説する。

多くのダム貯水池は、水表面積に比べて水深が深く水温成層が形成される、流下方向に細長く横断方向の変化に比べて流下方向の変化が卓越する等の特性を有している。

近年の直轄管理ダムにおける検討では、ダム貯水池の時空間的な変化を表現でき、水質保全対策施設の検討等にもある程度対応可能で、実務的に現実的な計算時間で対応できる「鉛直二次元モデル」が一般的に用いられている。

3-1. 実施手順

ダム貯水池における水質シミュレーションは、解析の目的と対象のダム貯水池の水理・ 水質等の特性を考慮して適用するモデルを選定し、データの収集・分析、モデルの構築、 構築したモデルを用いた検討・解析、解析結果の評価の手順で進める。

【解説】

水質シミュレーションは、「解析の目的の設定」、「モデルの選定」、「データの収集・データレビュー」、「モデルの構築・検証」、「モデルによる検討・解析・解析結果の可視化」、「解析結果の評価」の手順で実施する。

(1)解析の目的の設定

シミュレーションモデルによる検討目的を設定する。(検討の必要性の発生)

ダム貯水池において、冷・温水現象、濁水長期化現象、富栄養化現象等の水質変化現象 が発生した際、水質変化現象の要因解明、効果的な水質改善対策の検討、水質管理目標値 の設定等に水質シミュレーションを活用することができる。

※詳細は、2-4ページ「2-2. ダム貯水池の水質管理のための水質シミュレーションの活用」参照

(2) モデルの選定

解析の目的と対象のダム貯水池の水理・水質等の特性を考慮し、適切なモデルを選定する。次工程でのデータの収集状況等を踏まえ、構築したいモデルに必要なデータが不足する場合は、データの追加収集・調査、モデル選定の見直し等を行う。

モデル選定段階の対象ダム貯水池の水理・水質特性の把握に際しては、ダム等管理フォローアップ制度に基づく定期報告書での分析・整理や、対象とする水質変化現象に関する既往検討報告書等を参考にする他、必要に応じて下記のデータレビュー同様の現地観測データ等の分析を行うことにより実施する。

※適切なモデルの選定の考え方については、2-9 ページ「2-3. 水質シミュレーションを実施する にあたっての基本的考え方」を参照

(3) インプット工程

1) データの収集、データレビュー (ダム貯水池における水質特性の整理)

必要なデータを収集・整理・分析し、対象となるダム貯水池の水理・水質特性を把握する。水質シミュレーションを実施する上で、重要な工程であり、<u>対象ダム貯水池の水質特</u>性を的確に捉えることが以降の工程で効果的に検討する上でのカギとなる。

データレビューは、水質シミュレーションの前段の検討として実施するだけでなく、それ単体で実施し、対象ダム貯水池における水質形成過程の抽出、問題となっている水質変化現象の発生機構やその要因の考察をすることも有用である。

2) モデルの構築・検証

具体的なモデルの構築として、収集した情報からダム貯水池の形状を作成し、流入量、 放流量、流入負荷量や気象などの境界条件を設定し、各種パラメーターを設定するととも に、現況再現計算を行いモデルの検証を行う。なお、現況再現計算とは、既知の年の状況 を水質シミュレーションで計算し、実測データとの比較によってモデルの再現性の検証を 行うことであり、パラメーターの設定等を繰り返して再現性の精度を高めていく。

(4)計算工程

インプット工程で現況再現性を確保した水質シミュレーションモデルを用いて様々な 検討・解析を実施する。

各種水質改善対策(例:気泡式循環施設)の設置効果の評価(設置有無の比較)、施設設置基数の違いによる水質改善効果の比較評価、複数の水質改善対策による水質改善効果の比較、気候変動影響の予測など、目的に応じてケースを設定し、計算を実施、結果を整理・可視化する。

(5) アウトプット工程

水質シミュレーションを実施した目的に対する評価として、例えば、水質改善対策の検 討が目的であれば、最も効果の発現する対策を平均値やピーク値等の比較で定量的に評価 する。

なお、実際に水質改善対策を講じる際は、水質シミュレーションの結果に加えて、設置・ 維持工事費や各関係者との協議・調整等、総合評価を行った上で実施することとなる。 水質シミュレーションは総合的判断を行うための一つの材料を提供するものである。

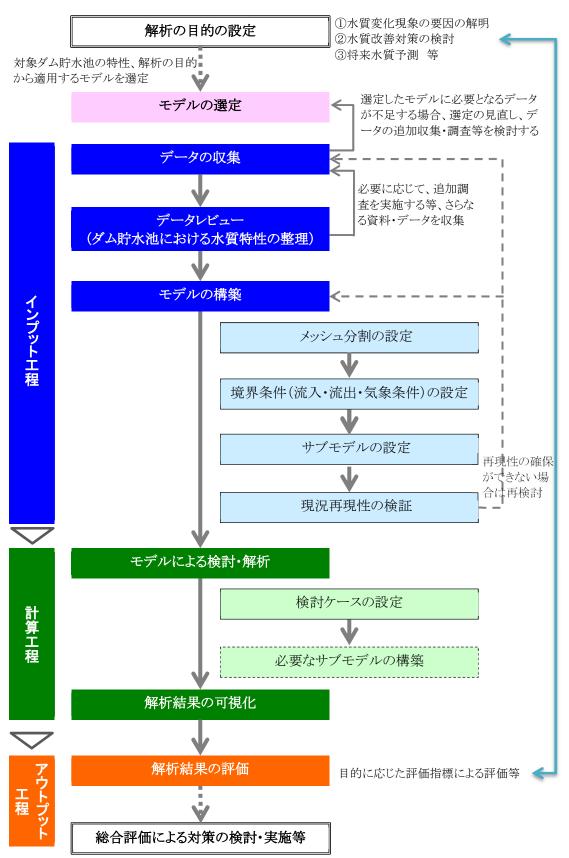


図 3-1 水質シミュレーションの実施手順

・検討が必要な内容(課題)から目的を設定・目的に合わせた検討を実施

3-2. データの収集

データレビュー及び水質シミュレーションの実施に必要な資料・データの収集を行うため、①データレビューに必要なデータ、②入力条件として必要なデータ、③モデルの検証 に必要なデータの視点から実施する。

【解説】

ダム管理データを中心とした各種観測データ、関連資料等を収集する。水質シミュレーション及びデータレビューに必要となる標準的な収集資料・データを3-7ページ表 3-1に示す。 (具体的な資料・データ収集の実施事例を4-62ページ「4. 資料編4-5-3.」に示す)

なお、<u>必要資料・データは標準的なものを示しており、水質シミュレーションを実施する</u> 目的や選定するモデルによっても異なり、また検討の対象となる水質変化現象によっては、 より詳細なデータが必要になる場合もあるため、留意が必要である。

収集したデータは、次節以降に示すデータレビュー、水質シミュレーションの入力条件や 現況再現性の検証データ等に用いる。

時系列データの収集期間は、<u>検討目的を踏まえ、データレビューの実施、水質シミュレー</u>ションの実施(現況再現・予測計算の実施期間)に必要となる期間のデータを収集する。

(1) データレビュー(ダム貯水池における水質特性の整理)

データレビューに必要なデータや既往検討資料等を収集する。

※データレビューの詳細は、3-8 ページ「3-3. データレビュー(ダム貯水池における水質特性の整理)」を参照

(2) モデル入力条件

モデルの入力条件となる気象、地形、水文、水質等のデータを収集する。

気象データは境界条件としてインプットし、流動モデルや水温の熱収支、植物プランクトンの増殖量の計算等に使用する。

ダムへの流入河川での流量・水質調査結果は、ダムへの流入量・流入水質の設定や、それらのデータから L-Q 式 (流入量に応じた流入負荷量を算定する式)を作成し、流入負荷量として設定するといった形で使用する。

各種測量等の貯水池形状データは、ダム貯水池をモデル化する際の基礎資料として使用する。

入力条件の設定方法は、得られている観測データの場所・頻度によって設定方法が異なり、不足する情報の補間や近似等の工夫を行って設定を行う。詳細は、3-14ページ「3-5-2. 境界条件(流入・流出・気象条件)の設定」に記載する。

(3) モデルの構築・検証

貯水位や水温、各水質調査結果は、水質シミュレーションの計算結果と照合する現況再現性の検証データとして使用する。検証データとしての使用方法については、3-21ページ「3-5-4. 現況再現性の検証」に詳述する。

モデルの検証にあたっては各種パラメーターの設定が必要である。パラメーターの設定は、現地観測データを再現できるように、設定していく。設定にあたっては、既往文献等における標準的なパラメーター値の幅等を参考に設定していくが、生態系モデルのパラメーターの中には、観測データからそれらを設定することができるものも存在し、例えば、底質調査結果から酸素消費速度や底泥溶出速度のパラメーターの設定を行う場合などがある。パラメーターの設定に関する調査は、実施されていない場合が殆どであり、現地観測データからパラメーターを設定する場合*は、追加で調査を実施する必要がある。具体的な調査内容・方法については、ダム貯水池水質調査要領(平成27年3月 国土交通省)の詳細調査に水質変化現象ごとに必要な調査が整理されている。

※観測データからのパラメーター設定は、例えば、底質対策を検討する際に、現地の底泥を用いて酸素消費速度調査や溶出速度調査を実施し、パラメーターを設定するケース等がある。上記のとおり、パラメーター設定は、既往文献等における標準的なパラメーター値の幅等を参考に試行錯誤によって設定していく場合が多いが、水質保全対策前後の比較等、できるだけ実態に即したパラメーター設定を行うことが望ましい場合等に観測データに基づく設定がなされる場合がある。ただし、高度な技術を要する観測が必要となる等の理由により実施されない場合も多い。

表 3-1 水質シミュレーション及びデータレビューの整理に必要なデータ等(標準的内容)

12	3-1 水質シミュレー 収集デー		ューの登理に必要なナータ寺	水質シミュレーショ
 分類	内容	細目	備考	ンでの使用例
気象	ダム管理データ	気温	※1:検討に必要な時間スケー	入力条件
		降雨量、積雪量	ルについて収集(日・時間等)	7 (7) 7 (1)
		相対湿度		
		日射量		
		雲量		
	気象庁データ等	上記同様	ダム管理データで不足する項目	<i>II</i>
	7(301)		について最寄りの気象官署のデ	
			ータを収集	
流域の	流域からの負荷	排出汚濁負荷量	流域自治体(下水道計画、生活	"
情報			排水処理計画等)からの収集、も	
			しくはダム等管理フォローアップ	
			定期報告書作成の手引きに記載の方法等により把握	
		土地利用図、メッシュデータ	国土数値情報等から収集	
	工場•事業所状況	事業所排水量•水質	流域自治体から収集	
流入	ダム管理データ	流入量	※1	<i>II</i>
河川	水質調査データ	定期調査結果	調査時の流量も収集	流入負荷量を算出
, ,,	// 頁 直 / /	出水時調査結果	HQ式なども確認	して入力条件
		濁質粒径分布データ	出水時、平常時	入力条件
貯水池	ダム管理データ	貯水位	*1	水収支の検討、再
X1/14E		×1/1/17		現性の検証データ
		取水量	発電施設等 ※1	入力条件
		放流量	ゲート放流 ※1	, , , , , , , ,
	水質調査データ	連続観測データ	*1	再現性の検証デー
		定期調査結果		タ
		出水時調査結果		
		濁質粒径分布データ	出水時、平常時	
		プランクトンデータ(植	細胞数カウント数	
		物・動物)		
	巡視記録		発生エリアを示す平面図等も確	"
	. Lammana L	指標)	認	
	底質調査データ	定期調査結果		調査結果からパラメ
+/≑π.	J. 紙4 人长沙字甲包	ナナラルのおおい土田が	空展 ### 空展 性# 空展 ##	ーターを設定
施設	水質保全施設運用記 録	施設の稼働時間等	稼働期間、稼働時間、稼働基数等	入力条件
貯水池	平面形状データ	測量図面等	水質保全施設や取水施設等の	モデル構築に使用
形状	Т ш//>///	以至四四 (位置も把握できるもの	C / / 旧来(C)()
	地盤標高データ	測量図面・データ等		モデル構築に使用
	HAVL	貯水池 HAVL		地形条件の整合
その他	ダム堤体の概要資料		各種諸元	(基礎資料)
	ダム等管理フォロー	定期報告書のうち、水質		データレビュー
	アップ制度による定	に関係する箇所、委員会		
	期報告書	における審議内容等		
	水質関連の検討業務	過年度業務成果品等	過年度における水質特性整理	
	成果		や水質保全対策検討等の関連	の参考資料
	スの仲間が歩の中田	十分の可定機関数の外	検討業務を確認	11
	その他研究等の成果	大学や研究機関等の論文	当該ダム貯水池が大学等で水質特性や水質予測モデルを用	"
		^	いた研究対象となった場合はそ	
			の成果なども確認	
1				1

3-3. データレビュー(ダム貯水池における水質特性の整理)

水質シミュレーションモデルの構築に必要な要素を整理するため、対象水域の水質がどのようにして成立しているのか、現地観測データや既往検討資料等を用いてその要因について整理・分析し、ダム貯水池の水質形成機構を明らかとする。

【解説】

水質シミュレーションを実施する際は、流域における負荷量の変化も含めて現地で得られた情報(観測データ等)を整理・分析し、ダム貯水池の水質形成の特徴や問題となっている水質現象の因果関係を把握・整理し、それを考慮して、目的に応じた水質シミュレーションモデルを的確に構築する必要がある。そのためにデータレビューを実施することが重要である。

データレビューは、ダム等管理フォローアップ制度に基づく定期報告書における整理を参考(図 3-2 に定期報告書での評価フローを示す)とし、対象ダム貯水池において観測データ等の整理・分析を行い、水質形成過程を抽出し、検討の目的とする水質問題の発生機構やその要因の考察を実施する(3-10 ページ図 3-3 にデータレビューによる整理によって対象ダム貯水池の水質形成機構や水質問題の発生要因について整理した例を示す)。

なお、データレビューは、直接的に水質シミュレーションの実施に関わらないため、水質シミュレーションを実施する際には省略される場合や、定期報告書における分析ほど詳細には実施されない場合もあるが、上述のとおり、水質シミュレーションを実施する目的から、ダム貯水池の水質特性を把握することは、的確な水質シミュレーションの実施をする上で非常に重要である。データレビューを省略すると、評価したい水質問題の発生機構が充分に解明されないままにモデルを構築した結果、的確に現象の再現ができない結果となることもある。

水質シミュレーションによる検討を行うにあたっては、適切なデータレビューを実施し、 的確な対象ダム貯水池の水質形成機構の整理・分析結果に基づいて水質シミュレーションを 実施することが重要である。

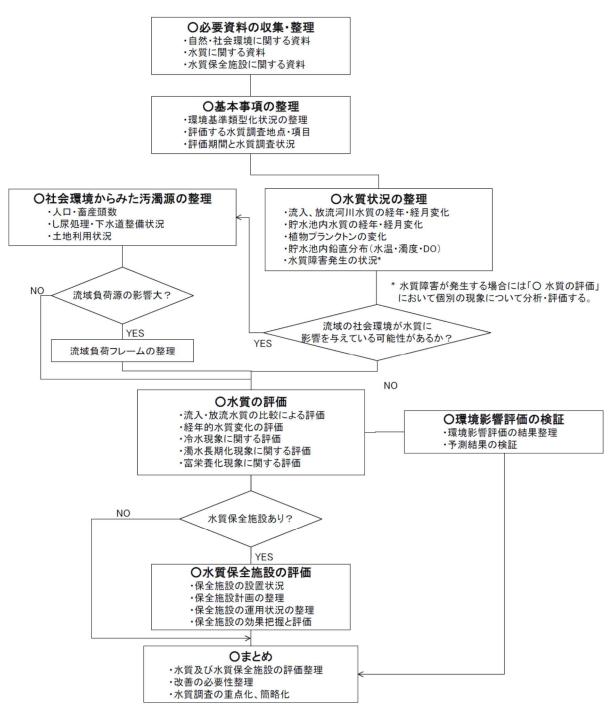


図 3-2 ダム等管理フォローアップ制度における事後評価フロー 1)

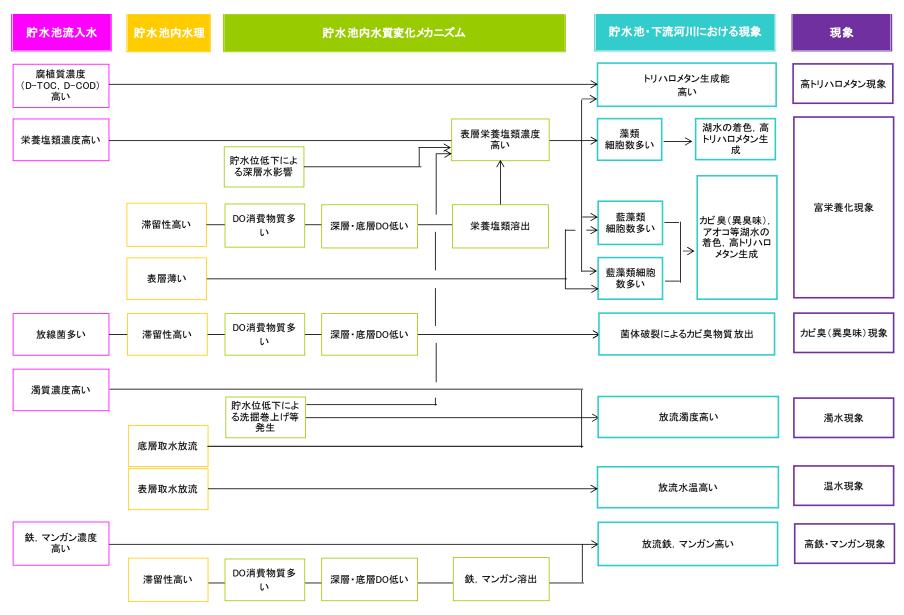


図 3-3 データレビューによる対象ダム貯水池の水質形成機構・水質問題の発生要因の整理例

3-4. モデルの概要

3-4-1. 流動モデルの概要

流動モデルは、流動場を解くモデルで、連続式、運動方程式、熱収支式等で構成される。 ダム貯水池で一般的に用いられる鉛直二次元モデルでは、貯水池を流下方向・水深方向 にメッシュ分割して、モデル化する。

【解説】

多くのダム貯水池は、水表面積に比べて水深が深く水温成層が形成される、流下方向に細長く横断方向の変化に比べて流下方向の変化が卓越する、等の特性を有しており、これらの特性を考慮したモデルとしては、鉛直二次元モデルが標準的と捉えることができる。

鉛直二次元モデルでは、貯水池を流下方向・水深方向にメッシュ分割して、モデル化する。 入力条件として、気象条件・流入出条件を与え、貯水池内の流動の計算を行う。

詳細は、鉛直二次元モデルの構築例を 4-4 ページ「4. 資料編 4-3-1. 」に示している。

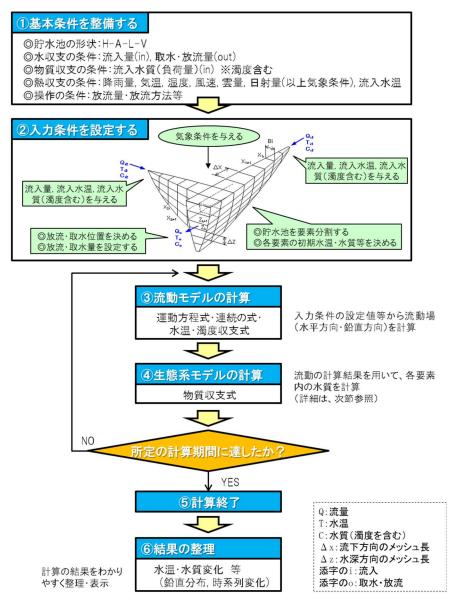


図 3-4 鉛直二次元モデルの概念図

3-4-2. 生態系モデルの概要

生態系モデルは、植物プランクトンの消長を考慮した生態系モデルとして、植物プランクトンの他、必要な水質項目を計算項目に設定する。

【解説】

ダム貯水池で発生する水質問題の多くは、貯水池化したことによって生じる富栄養化現象や底層嫌気化現象であり、それら多くの水質現象に関連する項目として、植物プランクトンがある。そのため、ダム貯水池の水質を計算するモデルとしては、植物プランクトンの消長を中心とした生態系モデルを採用する場合が殆どである。なお、水質シミュレーションでは、植物プランクトンを直接取り扱うのではなく、その現存量を示す水質項目であるクロロフィル a を指標にモデルを構築するのが一般的である。

〇生態系モデルに組み込む水質項目

生態系モデルを構築する際、その中心となるのは、栄養塩(無機態リン・窒素)の摂取による植物プランクトンの増殖、死滅・沈降等を表現すること(下図に特に重要な項目や流れを赤枠・赤字で示す)であり、主に窒素、リンを栄養源として、気象条件(日射、気温(水温))に応じて増殖し、その後枯死して沈降するというサイクルを再現できるように水質項目を設定する。他に、有機汚濁の指標としてのCOD**、底層嫌気化等を把握するための項目として溶存酸素、その他対象ダム貯水池における水質管理上の必要性や解析の目的に応じて必要な水質項目を設定する。以下に、生態系モデルの概念図(一例)を示す。詳細は、鉛直二次元モデルの構築例を4-4ページ「4. 資料編4-3-1.」に示している。

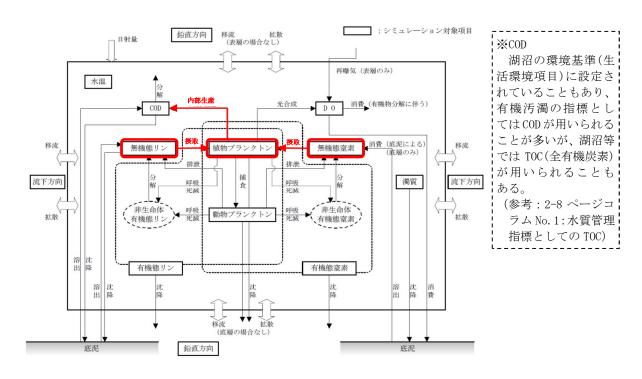


図 3-5 生態系モデルの概念例(2)に加筆)

3-5. モデルの構築

3-5-1. メッシュ分割の設定(貯水池形状の設定)

水質シミュレーションモデルのメッシュ分割サイズは、解析の目的、ダム貯水池の規模・ 形状、流動・水質特性等を考慮して設定する。

【解説】

(1)水平方向(流下方向)

水平方向(流下方向)のメッシュ分割は、水質シミュレーションによる解析の目的やダム貯水池の規模・形状、流動・水質特性を考慮して設定する。

- ・貯水池の堆砂測量結果をもとに設定する
- ・水平方向(流下方向)のメッシュ分割は、100~400m程度を目安注とする
- ・貯水池形状(河川幅)の規模に応じて、段階的にメッシュの上下流方向のメッシュ間隔を変化させている事例もある(40~130m等)
- 注)管理ダムにおける水質シミュレーションの実施事例で設定された事例が多かったことから、 目安として示している。各ダム貯水池の特性によって変わるものであり、これに限定するも のではない。

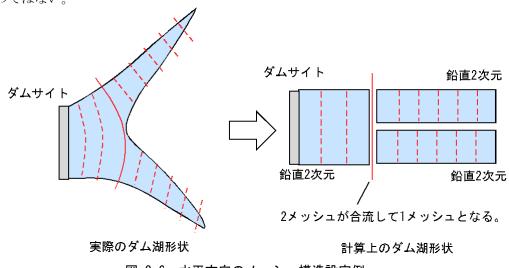


図 3-6 水平方向のメッシュ構造設定例

(2) 鉛直方向

鉛直方向のメッシュ分割は、1m程度を目安^{注)} とし、水深は貯水池の測量結果をもとに設定する。

- ・鉛直二次元モデルを選定する場合、その多くは鉛直の水温分布の再現が必要であり、 その観点から、1m程度を目安とする
- ・0.5m 等それよりも細かい設定で計算している例もあり、対象ダムでの特性や水質 シミュレーションの解析の目的に応じて設定する
- 注)管理ダムにおける水質シミュレーションの実施事例で設定された事例が多かったことから、目安と して示している。各ダム貯水池の特性によって変わるものであり、これに限定するものではない。

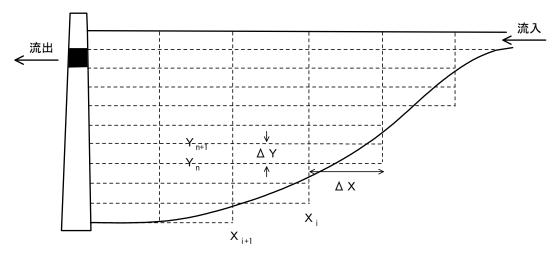


図 3-7 鉛直方向のメッシュ構造設定イメージ

(3) その他留意事項

- ・ダム貯水池における水位 容量関係 (H-V 関係) は、<u>構築したモデルが実際に対象</u> ダム貯水池で運用されている H-V 関係を再現するように設定することが重要である (図 3-8 に H-V の検証結果 (イメージ)を示す)。通常の場合、ダムの水収支データは H-V 関係に基づいて整理されており、実際に運用されている H-V 関係に整合していない場合、充分な水位の再現性が確保されない場合がある。
- ・三次元モデルの場合、50m×50m×鉛直 1m~25m×30m×鉛直 1m などの例がある。 ただし、ダム貯水池の大きさにより必要なメッシュサイズは異なるため、あくまで 参考例であり、各貯水池で考慮したい地形によって設定する。

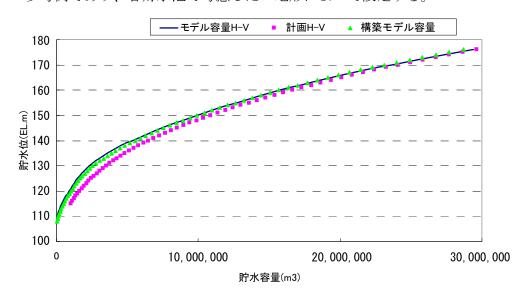


図 3-8 H-V の検証 (イメージ)

3-5-2. 境界条件(流入・流出・気象条件)の設定

水質シミュレーションの入力条件として、貯水池への流入(流量・水質)、貯水池からの 放流(施設毎の放流)、気象等の境界条件を設定する。

【解説】

入力条件は、資料収集によって得られたデータを元に設定を行う。<u>入力条件は水質シミュレーションの結果に大きな影響を与える</u>ものであり、データが不足する場合は、入力条件を取得する目的で現地観測を追加実施することも考慮する必要がある。

入力条件として必要な項目(標準的な項目)を以下に示す。なお、水質シミュレーション モデルは、その対象ダム貯水池の特性に応じて解析項目が異なるため、流入条件もそれに応 じて変化する。

(1)基本的事項

1)整理する時間単位

入力条件を整理する時間単位は、解析を行う目的と対象のダム貯水池の水質特性に応じて設定する必要がある。平常時の通常の水質現象を対象とする場合は日単位での計算を行う事例が多いが、日成層等の日周変化を表現する必要がある場合や降雨時の影響を考慮する場合には時間単位での入力条件が必要である。貯水池の解析においては、「日単位」を基本とし、降雨時のみ「時間単位」で考慮することが多い。

2) 流入・放流条件の設定地点

流入条件、放流条件は、流入・放流地点ごとに設定を行う。

(2) 気象条件

一般的な気象項目を以下に示す。選定したモデルに応じて必要な項目の整理を行う。

1) 気温

ダム管理日報等のダム管理データから設定することを標準とする。ダム管理データに欠 測等がある場合は、最寄りの気象庁データとの相関を求め、これをもとにデータを与える こともある。ダム管理データで観測がない場合は、最寄りの気象庁データを用いる(標高 が大きく異なる場合には、標高補正(≒0.65℃/100m)を考慮することもある)。

2) 相対湿度

気温と同様の考え方で設定する。

3) 風速

気温と同様の考え方で設定する。

4) 日射量

ダム管理日報等のダム管理データから設定するが、観測が実施されていない場合には、

経験式(オングストロームの式等)を用いる場合、近傍の気象官署での観測データを用いる場合等がある。

5) 雲量

ダム管理日報等のダム管理データから設定するが、観測が実施されていない場合が多い。 この場合は、近傍の気象官署での観測データを用いる場合が多い。

(3) 流入条件

1) 流入量

ダム管理日報等のダム管理データから設定する。支川を考慮する必要があり、支川毎の 観測が実施されていない場合は、本支川の流域面積比で配分することを標準とする。

支川流域が小さい場合や、合流点がかなり上流にあり合流後のデータでダム貯水池への 流入を与えている場合は、当該支川を考慮しなくてもよい。一方、支川の影響が大きい場 合や水質変化現象の重要なポイントになっている場合等は、考慮する必要がある。

ダム上流で利水者による取水等がある場合は、ダム管理データによる流入量がこれを考慮したものかをチェックする必要がある。考慮されていない場合は、利水者からデータの提供を受け、これを考慮して補正する必要がある。

2) 水温

流入水温の設定は、水温と気温の相関式より設定する。

相関関係の分析に用いる気温は、水温観測日の前1日~数日の平均値を用いることが多く(貯水池への流入までの時間の影響を考慮)、複数ケースでデータの整理を行い、良好な相関関係が得られる平均日数を用いる。なお、流入河川における水温の連続観測データが取得できる場合はこれを優先する。

なお、<u>出水時は急激な流入水温の低下がみられる場合等があり、上記の取り扱いでは出水時の再現性が確保できない場合がある</u>。こうしたことに対応するため、気温との相関でなく、出水時の特別な設定を行っている例がある。具体的には、出水時には水温が低下する傾向を分析により設定し、通常より一定水温低く設定したり、比流量との相関を考慮したりするなどの工夫をしている例がある。

3) **濁度**(SS)

流量と負荷量の相関式(L-Q式)により設定する。

濁水問題を取り扱う場合は、浮遊性物質(SS)を粒径で複数区分に分けて、それぞれの区分で沈降速度を別々に設定できるようにモデルを構築すると再現性を高めることができる場合がある。

なお、水の濁りについての水質指標として、濁度及び浮遊性物質 (SS) がある。<u>濁度</u>は、濁りの程度を示す指標であり、物質量ではないため、物質収支を考慮するモデルの中

では浮遊物質量(SS)等として計算する。したがって、観測値として濁度を用いた検討を行う場合は、濁度と浮遊性物質(SS)の関係を分析し、換算式を作成した上で、それぞれのデータを取り扱う必要がある。

なお、本書については、濁度と浮遊性物質(SS)は換算可能な濁りの指標として捉え「濁度(SS)」と表記している。

4) 窒素(N)

窒素は、モデルで考慮している形態別に区分して設定する。流量と負荷量の相関式 (L-Q式) で設定する。L-Q式を全窒素 (T-N) で与え、その後形態別に分ける場合、形態別 (有機態、無機態) で L-Q 式を設定する場合等があるが、データの存在状況、解析目的、L-Q式の精度等を勘案して適切に設定する。

なお、窒素は降雨時に濃度が薄まるなど流量との相関関係が無い場合や、典型的な季節変化がみられる場合などがあり、そのような場合は、個別に水質変化特性を分析し、適切な取り扱いを検討することが必要である。

5) リン (P)

リンも窒素と同様に、モデルで考慮している形態別に区分し、流量と負荷量の相関式 (L-Q式) で設定する。

6) 化学的酸素要求量(COD)

流量と負荷量の相関式 (L-Q 式) により設定する。懸濁態 (P-COD)、溶存態 (D-COD) 等に分離する場合は、窒素やリンでの設定方法と同様に設定する。

※有機物の指標として、CODの代わりにTOC(全有機炭素)等が用いられることもある。 (2-8 ページ「コラム No.1:水質管理指標としてのTOC」参考)

7) クロロフィルa (Chl.a)

クロロフィル a は植物プランクトンの現存量としての解析対象項目である。

通常、河川においては、止水性植物プランクトンの発生は殆どないが、実際の水質変化 現象との乖離を防ぐために、一定の濃度*を与えることが多い。

※出水時や水温低下時等、貯水池内の Chl.a 濃度が一時的に低くなるタイミングで、濃度が低くなりすぎるのを防ぐため、 $0.1\sim1\mu g/L$ 程度を一定値で与えるといった取り扱いがなされている。

8) 溶存酸素 (DO)

流入地点での溶存酸素量は飽和状態として、水温との関係式を用いて設定する。ただし、 上流域の状況等によっては飽和状態でない場合は、飽和 DO 濃度に実測値等からの飽和率 を乗じる方法もある。

9) その他 (鉄、マンガン等)

鉄やマンガン等の重金属類をモデルに組み込んでいる場合は、そのモデルで考慮する項目に応じて L-O 式等により設定する。

(4) 流入負荷量式 (L-Q 式) の外挿の問題について

相関式 (L-Q 式) を作成する際は、できるだけ外挿とならないように出水時のデータを含めて作成することが望ましい。出水時のデータが少なく、平常時のデータで作成した L-Q 式を用いざるを得ない場合、出水時の流入負荷を十分に評価出来ていないケース(過小・過大評価)もあるので、留意が必要である。

このような場合には、外挿によって求めた流入負荷量式を用いて計算した貯水池内の計算結果と実測値との比較(出水時、出水後)を行い、流入負荷量式の妥当性を確認するとともに、必要に応じて、式の見直しを含めた計算上の取り扱いについて検討することや、出水時調査を追加実施し、L-Q式の精度向上を図るなどの措置を検討する方法等が考えられる。さらに、算出された年間流入負荷量を原単位法*で算出した流域からの排出汚濁負荷量と比較し、オーダーの検証を行う等により精度を確保する方法等が考えられる。

※汚染源それぞれの原単位に、該当するデータ(フレーム)を乗じることで汚濁負荷量を算定する方法のこと。例えば、非特定汚染源の場合、都市、農業、森林 地域等それぞれの単位面積あたりの年間の負荷量(原単位)に、その土地利用別面積等(フレーム)を乗じて負荷量を算定する。

(5) 流出条件

1) 流出量

ダム管理日報等のダム管理データから放流施設別に設定する。 利水者による取水等がある場合は、データの提供を受け、設定する。

2) 流出水質

流出水質は、流出量と流出箇所のメッシュでの計算結果から設定されるため、入力条件 として設定する必要はない。

(6) 初期条件

1)流動

貯水池内の流動に関する初期条件を実測値から設定することは難しいため、一定の流 入・放流条件を与えて助走計算を行う等により、初期条件を設定する。

2) 水質

計算の初期条件の設定は、計算開始時点に近い実測値をもとに行うことが一般的であるが、実測値は時空間的に粗いデータであるため、データの内挿や助走計算等の工夫によって、初期条件の設定が計算結果に影響を及ぼさないように留意する。

具体的には、計算開始時点の前後の実測値から内挿によって初期条件を作成する、あるいは検討したい期間に対して初期条件の影響がなくなる程度遡って計算を開始する(この場合は上記 1)の流動に関する初期条件も同時に解決される)といった方法などが考えられる。

コラム No. 6 分布型モデルによる流域からの流入量・流入水質の設定方法

分布型モデルを用いて流域からの流入条件を設定する方法について紹介する。

本マニュアルでは実測データを用いた方法(表 3-2 参照)により、流域からの流入条件を 設定することを標準としているが、これに対し、分布型モデルを用いて設定する方法がある。

例えば、実測値に基づく方法では、流域の土地利用や負荷の発生条件などが変化する場合や、将来の気候変動により気象条件が変化した場合の影響を考慮することが困難であるが、 分布型モデルによる方法では、様々な条件の変化に応じた予測を行うことが可能である。

また、流量や水質等の実測データがない(または乏しい)流入河川からの流入量・流入水質を設定することが可能である。

項目	本マニュアルでの標準的手法	分布型モデルによる手法
流入量	ダム管理データから設定	流域をメッシュ分割し、標高や土地利
流入水温	定期水質観測時の水温と近隣のアメダス	用等の流域条件をモデル化し、気温・
	等気象データの相関関係から設定	降雨を入力条件として、流入水量・水
流入負荷量	L-Q 式等、水量と負荷量の関係から設定	温・水質等を計算する。

表 3-2 水質シミュレーションの流入条件の設定方法

湖沼を対象として事例収集を行った結果、分布型モデルを用いて流域からの流入量、流入水質を設定している事例が見られた。収集事例における分布型モデルの概念図を以下に示す。 複数の要素モデルを組み合わせることで、流域での水・物質の発生、流下過程を解析することができるようになっている。4-67ページ「4. 資料編4-6.」には、分布型モデルを用いて将来気候における降雨形態の変化を考慮した事例を示している。

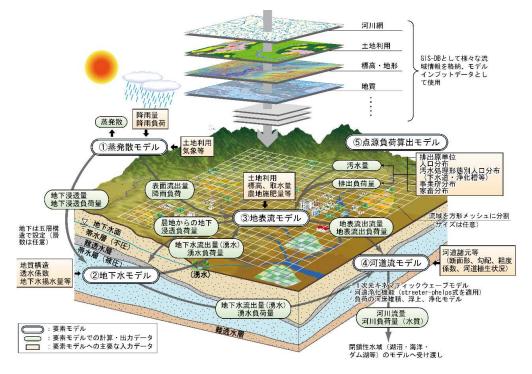


図 3-9 分布型モデルの例 3)

3-5-3. サブモデルの設定

解析の目的から、必要に応じて、サブモデルを設定する。

【解説】

水質シミュレーションの実施目的によっては、標準的なモデルではその再現が不充分な場合があり、そのような場合はサブモデルを構築する必要がある。

サブモデルとしては、<u>水質改善施設による流れを取り扱うサブモデルや、水質変化現象を</u> 詳細に取り扱うサブモデルなどがある。

なお、サブモデルにおける研究成果などを 4-56 ページ 「4. 資料編 4-4. サブモデルに関する事例」にそれぞれ示す。

(1) 水質改善施設を取り扱うためのサブモデル

以下に挙げるような、水質改善施設による流れを取り扱うモデルなどがある。

① 気泡式循環施設

散気装置により放出された気泡の浮力により上昇流を生じさせ、貯水池の鉛直循環 を促す装置である。

②表層水循環装置

表層水移送装置(あるいは、プロペラ式循環装置)は表層に漂う植物プランクトン や栄養塩類をポンプ吸引して、ホースにより深層に放出する装置である。

③サイフォン式取水設備

近年、ライフサイクルコストの観点から連続サイフォン式取水設備が採用されている。 連続サイフォン式取水設備は、逆 V 字形状のサイフォン管を貯水池水深方向に連続 して配置し、任意の異なる水深からの同時取水が可能となる施設である。

④ 湧昇流の発生手法

運転コストを抑えた水質改善策として、自然エネルギーを利用して低い運転コスト で安定した湧昇流を形成させる新たな手法について提案されている。

(2)水質現象をより詳細に取り扱うためのサブモデル

底泥のモデル、カビ臭発生機構や魚類をダム貯水池の水質シミュレーションに組み込んだ事例がある。

3-5-4. 現況再現性の検証

再現対象期間の計算を行い、水質変化現象を再現できるようにモデルパラメーターを調整し、モデルの再現精度を検証する。再現性の検証は、総観的・定性的な評価を基本とし、解析目的を勘案した場合に表現すべき現象が一定精度で再現できているかを確認する。

【解説】

水質シミュレーションの現況再現計算は、既知の期間を対象に実施する。現況の境界条件等を入力条件として、水質変化現象を再現できるようにパラメーター調整を行い、実測データと比較する事で検証を行う。

検証は、実現象を再現できるようにパラメーター調整することにより実施する。

再現性の評価は、総観的・定性的な評価を基本とする。検証時の視点としては、以下のようなポイントを参考にするとよい。次節にて、流動モデル・水質モデルそれぞれの検証について一般的な実施内容を示す。

- ・季節変化や降雨後の変化等、水質の変化傾向の再現性
- ・鉛直分布の傾向の再現性(特に水温や溶存酸素等)
- ・複数地点での傾向の確認(3地点程度以上での確認が望ましい)
- ・植物プランクトンの消長現象の的確な傾向の再現性 (Chl.a の季節変化、形態別栄養塩の変化等)

(1) 再現性検証の実施にあたっての留意点

1) 再現計算の対象期間の設定

再現計算を実施する期間を設定する。

設定にあたっては、<u>検討の目的も勘案し、設定期間の位置付けを考慮して、適切に設定</u>する必要がある。

- ・平常時なのか、特異な現象の年を計算したいのか等、検討目的に応じた設定(既往最大渇水年、大きな出水を含む年等)
- ・検討対象ダム貯水池の現象を適切に再現できているかどうかを確認できるよう、様々な条件の複数年を設定(連続する数年、渇水年/平水年/豊水年等)

2) パラメーターの調整

パラメーター調整は、実測値を再現できるよう、試行錯誤により実施する。

一般的には同様のモデルを用いた既往検討におけるパラメーター設定幅等を参考に調整を行う。良好な再現性が得られず、<u>現況再現性を確保するためにパラメーターを一般的に用いる範囲から大きく逸脱して設定せざるを得ない場合は、対象とするダム貯水池の水質現象を再現する重要な要素を見落としている可能性</u>が考えられる。その場合は、水質形成機構の見直しを行い、水質現象の要因分析を行い、それに応じた入力条件の設定や、モデルの見直しなども検討する必要がある。

また、水質シミュレーションは水域をメッシュ分割し、そのメッシュに対しての解を得ている。メッシュサイズは、ダム貯水池では水平方向に 100m~数百メートル、鉛直方向に約 1m の格子サイズであり、水質シミュレーションによって得られる解析値は、このメッシュに対する"平均値"である。また、所定の時間解像度に対する時間平均値でもある。一方、現地観測データ(時空間的には"点"のデータ)とはスケールが異なることに留意が必要である。そのため、現地観測データでの水質値の変動(特に急激な高い値)を水質シミュレーションで再現することが難しい場合もあり、無理に再現しようとすると、適切でないパラメーターを設定することになり、結果として信頼性のない結果になってしまう可能性もある。

パラメーター値の調整にあたっては、当該パラメーター値の変更によって想定される変化 (沈降速度を小さくすれば対象水質項目の濃度が高くなる等)が正しく計算結果に反映されているかに留意しながら進めることが重要である。

また、実測値の精度についても検証が必要であり、<u>実測値を絶対的なものと捉えること</u>はせず、他の水質項目との関係や多地点の観測結果との比較、前後の観測日のデータや対象ダム貯水池における変動幅の考慮等、実測値そのものについても注意深く取り扱うべきである。

このように計算値と実測値の性質の違いを理解した上で、対象ダム貯水池において再現 しようとする現象が再現されているかどうか等、総合的な視点で適切に検証作業を行うこ とが重要である。

なお、鉛直二次元モデルにおけるパラメーターの設定範囲例を「4. 資料編」に示す。

3) 高度な検証等

再現性の検証は一般的には再現計算の対象年を対象にモデルパラメーターの調整等により検証するキャリブレーション (誤差の最小化) により実施されることが殆どである。 さらにより高度な検証として、そのキャリブレーションを行ったパラメーター等の調設定で、異なる数箇年を対象に検証を行うことで、そのモデルの信頼性を客観的に説明することができる (ベリフィケーション)。

また、主要なパラメーターの感度分析を行い、どのパラメーターの影響が強いのかを把握することで対象ダムの特性を把握することができ、検証にも役立つことがある。

4) モデルの見直し等

水質保全対策を実施する前後で貯水池の水質環境が変化(優占する藻類の変化など)し、 用いるべきパラメーターが変わる可能性もあるため、こうした点にも留意する必要がある。 また、水質モデルは一度作成するとそれで完成と捉えられがちであるが、気象、流域の 変化に伴う入力条件の変化や、貯水池内の状況変化等に応じて、モデルの境界条件の見直 し、モデルパラメーターの見直し等、モデルにフィードバックすることが必要になる場合 もあるため、留意が必要である。

(2)流動モデルの検証

流動モデルの検証は、流れの再現性を検証することであり、物質輸送や拡散(分散)輸送を左右することから、極めて重要な検証項目である。しかしながら、検証対象となる流速分布や混合特性を現地観測データから取得することが困難であることから、これに代わる検証作業として、水温を用いることが多い(塩分などの保存物質で検証ができる場合はその方が望ましいが、ダム貯水池では困難なため)。また、濁水長期化現象が発生しているダムや降雨直後の流入状況を詳細に把握する必要がある場合は、濁度(SS)も併用する必要がある。

(2-18ページコラム No.2: ダム水質モデルに関する概説を参照)

なお、水温は生態系モデルの計算対象項目の多くの項目の支配因子となっており、水質の再現性を確保する上でも、充分な再現性を確保することが重要である。

1) 水位

水位の再現性検証は、連続式の総括的な確認でもある。具体的には、計算期間全体の経 時変化グラフと観測データの重ね合わせを行い、全体傾向としての挙動を点検する。貯水 位の変化に追随して計算結果も変化しているか、降雨時の水位上昇と下降変化に問題はな いか等を確認する。

水位の再現性が悪い(水収支が実現象と合っていない)と、水質等他の物理量の保存性にも影響することがあるため、充分な再現性を確保することが重要である。



図 3-10 計算水位と実測水位の重ね合わせイメージ

2)表層水温

計算期間全体の経時変化グラフと観測データの重ね合わせを行い、全体傾向としての挙動を点検する(図 3-11 参照)。特に季節的な変化が表現できているかについて確認を行う。 鉛直二次元モデル以上のモデルでは、観測点が複数ある場合は、それぞれの観測地点で検証を行うとよりモデルの信頼性が高まる。

なお、定量的指標の例として、「平均二乗誤差」を用いた例もあり、4-68ページ「4. 資料編 4-7-1. 」に示している。



図 3-11 表層水温の計算結果と観測結果の重ね合わせイメージ

3) 鉛直水温分布

現地観測にて、鉛直水温分布の観測が実施されているタイミングに合わせて、モデルの計算結果を抽出して、水温の鉛直分布の重ね合わせを行い、成層の形成される高さ、強度の傾向を検証する。特に成層ができる時期と全循環する時期の変化が表現できているかについて確認を行う。鉛直二次元モデルより高次なモデルでは、観測点が複数ある場合は、すべての観測地点で検証を行うとよりモデルの信頼性が高まる。

なお、次ページに具体的な鉛直水温分布の比較例を示す。

4) 濁度(SS)鉛直分布

濁度(SS)鉛直分布の観測データが充実している場合には、水温と同様に鉛直分布の 重ね合わせを行い、特に出水時、出水後の濁度(SS)分布が再現されているかを検証す るとよい。複数の出水を含むデータに対して検証を行うとよりモデルの信頼性が高まる。 また、前述のとおり、ダム貯水池における水の密度は水温と濁度(SS)の関数であり、 低濁水の場合、密度は水温のみにより規定されるが、高濃度の濁水が流入する場合、貯水 池内の流動現象に対する濁度(SS)の影響が無視できない場合がある。

(2-18 ページコラム No.2: ダム水質モデルに関する概説を参照)

なお、次ページには鉛直分布の比較例の具体例として、水温での鉛直分布状況の比較例を示す。濁度(SS)でも比較方法は同様である。

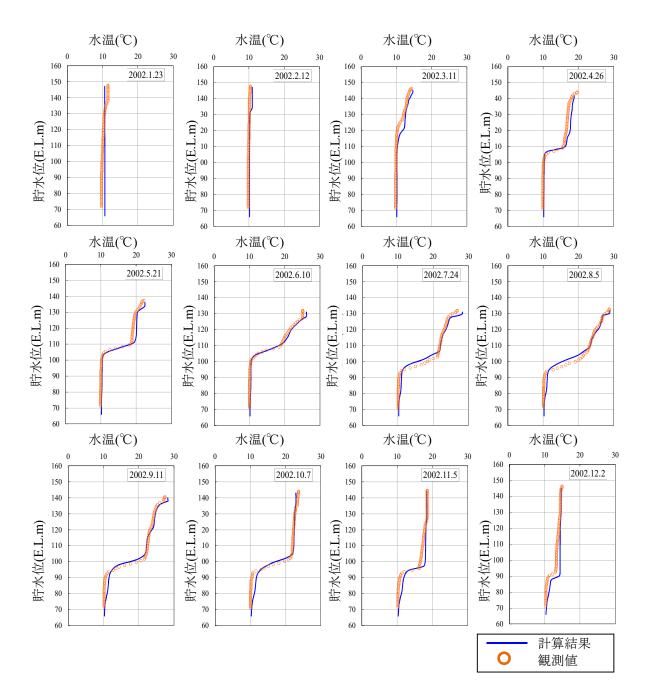


図 3-12 鉛直分布状況の比較例(水温)

(3) 生態系モデルの検証

検証を行う水質項目は、3-12 ページ図 3-5 に示される生態系モデルによって表現されている水質変化メカニズムを考慮し、植物プランクトンの消長を表すクロロフィル a を中心にそれに関係の深い水質項目である窒素やリンの挙動、溶存酸素 (DO) の鉛直分布の季節変化等の視点から確認を行う。

生態系モデルでは、植物プランクトンの増殖・死滅、各項目の沈降・分解といった各項目間の物質収支のやり取りが組み込まれており、1つのパラメーターを変化させた場合に複数の項目の再現性に影響が及ぶ場合が多い。一般的な検証手順としては、クロロフィルaとその消長に深く関連する窒素・リンについての再現性を確保した後、植物プランクトンの内部生産の影響を受ける COD、植物プランクトンによる生産・消費及び COD による消費の影響を受ける DO の順でパラメーターを調整する場合が多いと想定される。

検証の際に注目すべきポイントを項目ごとに以下に記載する。

なお、鉛直二次元モデル以上のモデルでは、検証はできるだけ複数地点で実施することが望ましい。もし1地点しか観測データが得られない場合は、その地点だけの再現性を高めるための偏ったパラメーター設定とならないように留意する必要がある。

1) クロロフィルa (Chl.a)

植物プランクトンの指標であり、高濃度になればなるほど観測データに局所性が生じる項目であることに留意して検証を行う。一般的には水温の上昇とともに濃度も上昇し、秋から冬にかけて減少するが、このような一年のサイクルを再現できているかについて確認する。観測データで特異的に高いデータが存在する場合があるが、モデルでは多くの場合はこのような現象を再現することは不可能であり、特異的に高い値を無理に再現しようとして、適切でないパラメーター設定とならないように留意する必要がある。

3-28 ページ「図 3-13 クロロフィル a の検証例」に検証例を示す。

2) **窒素**(N)・リン(P)

植物プランクトンの増殖に重要な項目であり、クロロフィル a の再現性と深く関連する項目である。これら栄養塩の存在量が植物プランクトンの増殖総量を規定している。そのため、全窒素(T-N)、全リン(T-P)の年間オーダーをチェックし、平均的な濃度レベルやおおよその変化傾向を再現できているかを確認する。例えば、平均的な濃度が実測値よりも高い場合は、栄養塩過多となっており、流入負荷量または底泥からの溶出量や沈降速度等の設定を見直す必要がある。全窒素、全リンのオーダーを確認したら、次は、各態別の確認を行う。植物プランクトンは無機態窒素(I-N)、無機態リン(I-P)を消費して増殖を行うため、無機態窒素、無機態リンの挙動とクロロフィル a の変化傾向が一致しているのか(クロロフィル a が増加しているときに無機態窒素、無機態リンが低下)を確認す

る。

また、底泥からの溶出の影響を適切に表現できているかを確認するために、鉛直分布や 底層の濃度の経時変化などを確認する。

さらに、出水時の影響(特にリンにおいて*)が大きいダム貯水池では出水後の濃度変化が再現できているかどうかなどを確認する。

※一般的にリンは出水時に高濃度となる傾向が窒素よりも強いため

3) COD(化学的酸素要求量)

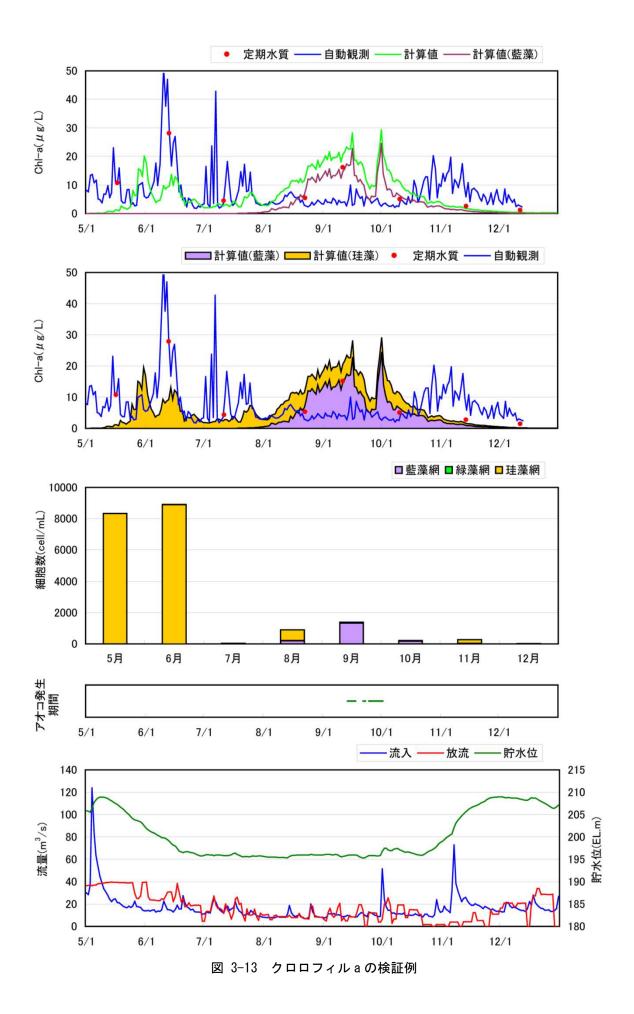
COD は目標水質との比較等に用いられることが多い項目であるが、植物プランクトンの内部生産の影響を受けるため、上記に示したクロロフィルaや窒素・リン等の再現性が確保された上で、検証・評価する手順が妥当である。

出水時の影響が大きいダム貯水池では出水後の濃度変化が再現できているかどうかなども確認する。

4) DO (溶存酸素量)

DO は大気とのやり取り、植物プランクトンの光合成に伴う酸素生産、植物プランクトンの呼吸、COD の分解による消費、底泥による消費等の影響を受ける項目であることから、上記項目の再現性が確保された上で、検証・評価する手順が妥当である。

検証は、表層 DO の経時変化や鉛直分布の季節変化などを確認することにより実施する。



3-5-5. 精度管理

モデル精度の管理は、現況再現性の検証に加え、精度管理として、水収支、物質収支の 確認を行う。

【解説】

構築した水質シミュレーションモデルが妥当なモデルとなっているかをどのようにして 確認するかを一般化することは非常に難しい。シミュレーションモデルで取り扱っている水 理・水質現象が非常に複雑な機構であり、計算自体は計算機 (PC) の中で計算時間ピッチ ごとに実施されていくため、結果を出力して何か別の方法で算出した値と照合するといった こともできない。

マクロ的に妥当なモデルとなっているかという視点では、水・物質収支を確認することが 有意義である。

構築したモデルが適切に対象ダム貯水池の水理・水質現象を再現できるモデルとなっているかどうかは、前述の現況再現性の検証で述べた方法で実施するが、極端なパラメーター設定となっていないか、計算が不安定になっていないかといったことは、経験豊富な技術者や学識者の照査(プロフェッショナルジャッジ)によってチェックする方法が現実的である。モデル精度の管理は、実行可能なマクロチェックとして、水・物質収支の確認を行うとともに、経験豊富な技術者や学識者の照査(プロフェッショナルジャッジ)によって確保する。

(1)水・物質収支の確認

1)水収支

計算期間全体、出水期間等の流入量と放流量、それに伴う水位変化についてチェックし、 与えた流入量、放流量によって貯水位が再現できているかを確認する。

問題がある場合は、元データとなる流入量、放流量、貯水位、取水量等の水収支データ やモデルでのダム形状データなどを確認する。

2)物質収支

計算対象としている水質項目ごとに物質収支をチェックする。具体的には、水質項目ごとに貯水池への流入、貯水池からの流出、貯水池内での沈降、底泥からの溶出、貯水池内での分解や他の水質項目への変化等、変化経路ごとに例えば年総量を出力し、収支が取れているか、一部の経路が異常に大きな数値となっていないか等のチェックを行う。また、データレビューで整理した水質特性との整合性が取れているかも確認するとよい。

単純なチェック(全体に収支が取れているか)は標準的に実施することができるが、各 経路の値が妥当かどうか等は、経験豊富な技術者のチェックによって実施する。

(2) 経験豊富な技術者や学識者の照査 (プロフェッショナルジャッジ)

ダム貯水池の水理・水質現象、水質シミュレーション等に関して、豊富な経験を有する 技術者や学識者の照査 (プロフェッショナルジャッジ) によって総合的なチェックを行っ て、精度を確保する。

3-6. モデルによる検討・解析

3-6-1. ケースの設定

水質シミュレーションの実施目的に合わせて、検討ケースを設定する。

【解説】

水質シミュレーションの実施目的別に考えられる検討ケースの設定例を以下に示す。

検討ケースは、水質シミュレーションの実施目的を効率的・効果的に達成する視点から評価を行うために必要かつ充分なケースを設定する。

(1) 水質変化現象の要因の解明

水質変化現象の要因解明の視点からは、現況再現計算において検討を実施するものであるが、その際、検証しようとする水質変化現象の要因となる条件について、様々なバリエーションのある条件での計算を実施することが効果的である。例えば、濁水問題を取り扱う場合は、複数の規模の異なる出水を対象に検証を実施することが挙げられる。

あるいは、一定の精度が確保されたモデルが構築された上で、その主要な要因について 複数の条件をケースとして設定し、感度分析的にそれぞれの条件の変化による影響の程度 を検討することが挙げられる。例えば、濁水が流入するタイミングにおける貯水位、水温 成層の形成状況等を複数設定して計算を実施し、濁水長期化現象に与えている影響の大き さについて検討を行うなどが考えられる。

(2) 水質改善対策の検討

水質改善対策による効果の検討を行うためのケース設定を行う。以下のようなケースが 例として挙げられる。

- 1)水質保全対策の無い場合と有る場合の比較
- 2)水質保全対策の種類別、複数対策がある場合の採用組み合わせの比較 等
- 3) 同一対策手法における諸元、設置位置・基数の比較
- 4) 同一対策手法における効果的な運用方法の検討
- 5) 運用実績に対する効果検証

ケース設定にあたっては、比較対象とするそれぞれの条件を設定する場合の他、水質改善対策の規模を複数設定して、感度分析的に検討する方法も挙げられる。

(3) 水質管理目標値の設定 (将来水質予測)

将来水質予測は、気象・水文条件は現況再現計算と同じにし、流域からの流入負荷量や 貯水池内での水質改善対策を設定し、水質予測を行うケースが一般的である。現況と同じ 気象条件で計算を行うことで、純粋に各種対策による効果や流域の社会経済条件(負荷条 件)の変化を評価することが可能である。このような予測を行う場合、気象条件によって 水質改善効果の大小が異なることから、特徴の異なる複数年を対象として実施することが 望ましい。

また、複数の管理目標の設定を検討するようなケースで、それぞれの目標がトレードオフの関係にあるような場合は、水質改善施設の運用方法等について、複数の検討ケースを設定して感度分析的に検討を行い、検討結果を踏まえて、バランスを考慮しつつ実現可能な目標設定を検討するといった活用方法もある。

なお、気候変動影響予測など、将来の変化した気象条件に対する影響予測を行う場合は、 別途気象の変化による流域からの流出量・水温・負荷量等を算定する必要がある(具体的 事例を 4-67 ページ 4. 資料編 4-6. に詳述)。

将来予測に際しては、流域条件、気候変動の影響などについて、複数のシナリオを設定 して比較するようなケース設定を行うこともある。

3-6-2. 解析結果の可視化

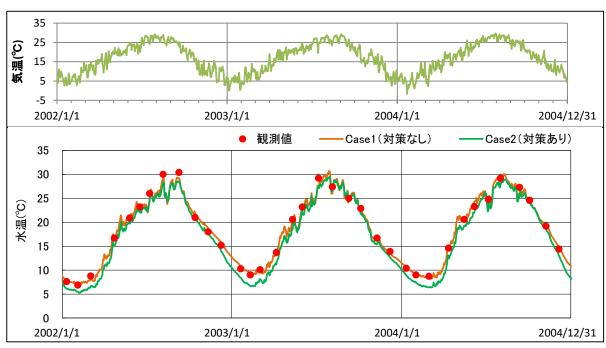
水質シミュレーションの解析結果は、解析目的に応じた評価を的確かつ効果的に実施できるよう、分かりやすく可視化して表現する。

【解説】

解析結果の可視化には様々な方法あり、水質シミュレーションの実施目的や表現したい内容に応じた、いくつかの可視化方法を以下に例示する。

(1) グラフ化 (経時変化)

表層水温について気温との関係も合わせて、経時変化をグラフ化した例を示す。経時的な変化を示すことで年間の季節変動の状況を確認することができる。気温の変動に合わせ、表層水温の変化も生じている。また、観測値を合わせてプロットすることで再現性の確認も可能である。予測結果の評価に際しては、設定したケース別に表示し、変化傾向や指標値の満足状況等を比較する。

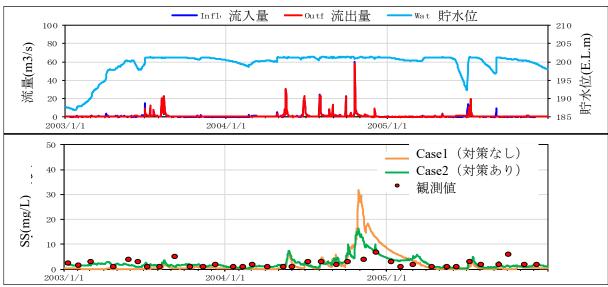


Case1,2:ケースは各検討の目的に応じて複数ケースの設定をしたイメージ

設定例:水質保全対策のあり・なし等

図 3-14 表層水温の経時変化状況の表示例

SS について、流入量・流出量・貯水位を合わせて、経時変化をグラフにした例を示す。 流入量や水位の低下に合わせて SS 濃度が変化している様子がわかる。



Case1,2:ケースは各検討の目的に応じて複数ケースの設定をしたイメージ

設定例:水質保全対策のあり・なし等

図 3-15 SS の経時変化状況の表示例

(2) グラフ化 (鉛直分布)

月別の水温鉛直分布状況をグラフ化した例を示す。毎月の現地観測に合わせて、その時 点の計算結果を抜き出し、プロットすることで、水温躍層の再現状況を確認することがで きる。

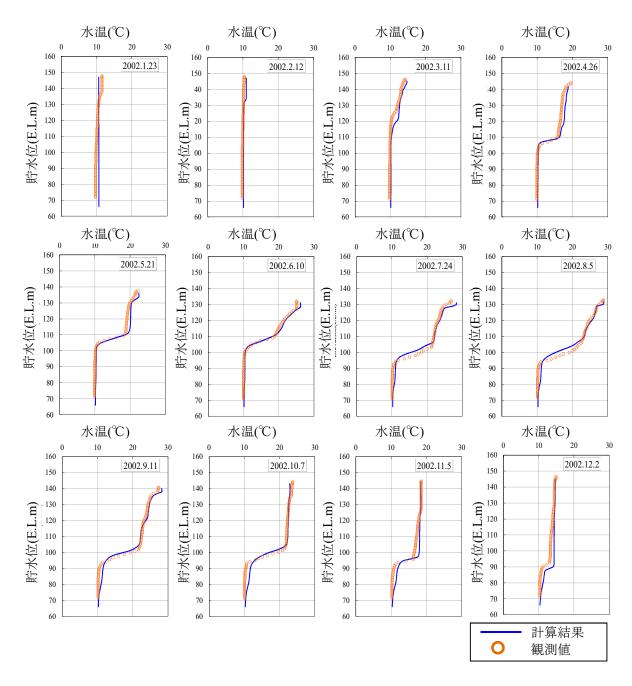


図 3-16 鉛直水温分布状況の例

(3) イソプレット図表示(面分布の可視化)

イソプレット図は、ある場面を面的に捉えた表現で、通常の観測データ数ではこのような表現は難しいため、水質シミュレーションの結果を有効に使った可視化手法である。

以下は、ある瞬間(日)の水温分布状況を面分布の可視化にした例である。観測データは観測地点におけるデータであるため、鉛直分布図等(例:図 3-16)の表現にとどまるが、シミュレーション結果の全メッシュのデータを出力・図化することで、貯水池内の流下・水深方向の水温分布を面的に見ることができる。

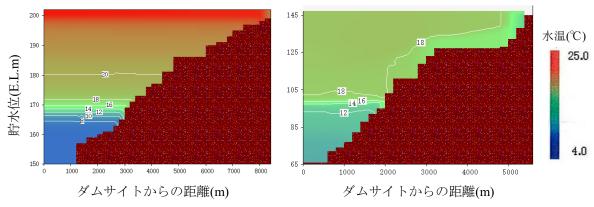
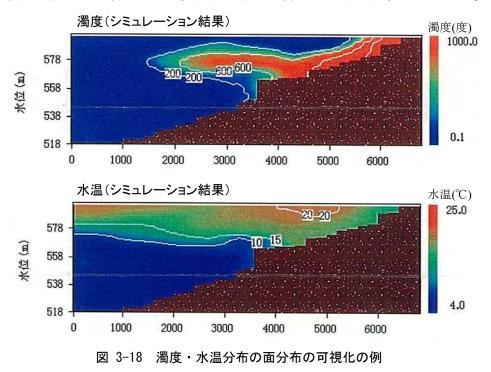


図 3-17 水温分布の面分布の可視化の例

以下は、濁度と水温のシミュレーションの結果をイソプレット図で可視化した例である。 水温躍層が形成される層を濁水が貫入する様子が分かりやすく表現されている。



以下は、ある地点の鉛直分布の経時変化をイソプレット図で可視化した例である。

観測データは月1回等の観測日におけるデータであるが、シミュレーション結果の毎日 データを出力・図化することで、鉛直分布の経時変化を可視化することができる。下図で は、水温躍層の移り変わりの様子が分かりやすく表現されている。

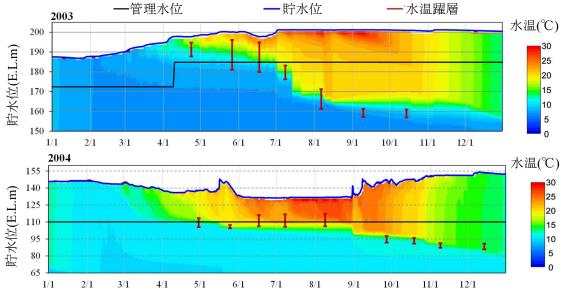


図 3-19 鉛直水温分布の経時面分布の可視化の例

3-6-3. 解析結果の評価

水質シミュレーションの解析結果は、解析の目的に合わせて評価を行う。

評価にあたっては、用いたモデルで表現できる現象の限界、解析結果に内在するさまざまな不確実性に留意して実施する。

【解説】

水質シミュレーションの結果の評価は解析の目的に応じて取りまとめ、評価を行う。

得られた計算結果を評価する際には、<u>シミュレーションモデルでは、実現象を数値モデルで表現できるように、平均化、単純化等を行っており、実現象そのものを表現しているわけでないという点や、モデルや入力条件が有する不確実性等に留意して、結果の解釈・評価を行う必要がある。なお、必要に応じて、学識者へのヒアリング等を実施する。</u>

(1) 水質変化現象の要因の解明の評価

データレビューにより、対象ダム貯水池において対象とする現象のメカニズムについて 分析・整理し、仮説を立てた上で、モデルを構築し、検証する。

検証には、実測データを用いるが、調査データは、時空間的に基本的には"点"のデータであるので、立てた仮説に基づいて構築したモデルが実現象を表現できているかを評価する。

PDCA サイクルにより、条件の異なる実測データを整備し、モデルの検証を継続的に実施していくこと等により、精度を高めていくことができる。

(2)水質改善対策の検討の評価

各種水質改善対策による水質改善効果を比較・評価し、どのケースが最も効果的である かを評価する。

一般的には、年平均値、75%値等の統計値での評価や、貯水池水質や放流水質が基準値や評価値を満足(超過)する日数で評価を行う。

さらには、概略的にイニシャルコスト、ランニングコストを算出して、単位費用あたり の水質改善効果などを算出すると、この結果を踏まえて対策を選定する際に役立つ。

なお、水質シミュレーションによる解析結果は、それのみが対策を決定づけるもので はなく水質シミュレーションの結果を踏まえて、対策技術の実現性(技術的評価や関係 者との調整)、コスト等も含めて総合的に評価することが重要である。

(3) 水質管理目標値の設定(将来水質予測)の評価

現況と比較して、将来の水質を評価する。水質管理目標値を設定する場合は、評価を行う水質管理指標(環境基準等)に応じ、年平均値、75%値等の統計値での評価や、貯水池

水質や放流水質が基準値や評価値を満足(超過)する日数等で評価を行う。

将来の気候変動影響予測のように、気候変動による将来気象変化による影響や流域の社会経済条件の変化による影響を評価したい場合は、流域条件、気候変動の影響などについて、複数のシナリオを設定し、それぞれの場合に評価したい視点・項目を設定して、統計値や閾値との比較、確率的な評価等により評価を行う。

(4)計算結果の解釈(モデルの限界や不確実性)における留意点

既述のとおり、<u>得られた計算結果を評価する際には、シミュレーションモデルでは、実</u>現象を数値モデルで表現できるように、平均化、単純化等を行っており、実現象そのものを表現しているわけでないという点に留意が必要である。

モデルでは一定の仮定の下で実現象をモデル化し、パラメーターによって、近似的に実現象を表現しようとするものであり、この時点で一定の誤差を含んでいる。

また、<u>モデルで表現されている時空間スケール</u>(日平均、分割したメッシュ内の空間平均)を理解して結果を解釈することが重要である。

また、<u>モデルで設定された入力条件、例えば流入水質は実際の値を与えているわけでは</u>なく、L-Q 式等によって推定した水質を与えており、一定の誤差を含んでいることを理解しておく必要がある。

【3章の参考文献】

- 1) ダム等管理フォローアップ定期報告書作成の手引き,平成 26 年 4 月,国土交通省水 管理・国土保全局河川環境課
- 2) ダム貯水池水質改善の手引き:国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課、平成30年3月

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

3) 上原・湯浅・吉田・佐藤:流域水循環モデルの構築と印旛沼流域への適用 水文・水 資源学会研究発表会要旨集 19(0), 50-50, 2006

4. 資料編

4-1. 参考文献·図書

水質シミュレーションは、専門性の高い分野の技術であり、現象のモデル化や数値計算の プログラミングの知識だけでなく、水理・水質現象の基本原理を理解している必要がある。 これに関連して本マニュアルを作成する際に参考にした文献や図書を紹介する。

- ・ダム貯水池水質改善の手引き(平成 30 年 3 月) 国土交通省 水管理・国土保全局 河 川環境課
- ・ダム貯水池水質調査要領(平成27年3月) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課
- ・ダム等管理フォローアップ定期報告書作成の手引き(平成 26 年 4 月) 国土交通省 水 管理・国土保全局 河川環境課
- ・小河内貯水池の水質管理に関する共同研究成果報告書ー貯水池管理のハンドブックとして一(平成30年3月) 東京都水道局 首都大学東京
- ・湖沼における水理・水質管理の技術(平成19年3月) 湖沼技術研究会
- ・貯水池の冷濁水並びに富栄養化現象の数値解析モデル (その1) (その2), 昭和62年3月, 建設省土木研究所
- ・水理公式集 平成11年版 十木学会
- · 水理公式集 2018 年版 土木学会
- ·湖沼工学 岩佐義朗
- · 数值水理学 岩佐 義朗著
- ・環境流体汚染 松梨順三郎編著 池田有満/海老瀬潜一/中田喜三郎 共著
- ・水圏の環境 有田正光編著 中井正則/道奥康治/池田裕一/中村由行/村上和男 共著
- ・水理学・流体力学 禰津家久著
- ·流体解析 I 河村哲也著
- ・ダム貯水池水質用語集、関ダム水源地環境整備センター
- ・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、平成 27年8月、国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室 http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0856.htm

4-2. 全国管理ダムにおける水質シミュレーションの実施状況とその目的

全国の管理ダムで水質シミュレーションを実施した事例を収集し、シミュレーションの実 施目的やモデルの設定状況などを整理した。

(1) 収集・整理の対象ダム

ダム貯水池での水質シミュレーションを実施した事例の収集を行い、整理を行った。整理対象としたダムは、国土交通省及び水資源機構管理ダム 32事例、都道府県管理ダム3 事例である。

(2) 整理結果

収集した事例を整理した結果を以下に示す。

1) 実施目的

水質シミュレーションの実施目的は、富栄養化対策の検討が半数以上であった。水質変化現象の要因解明としては、濁水長期化現象の解析例が多かった。

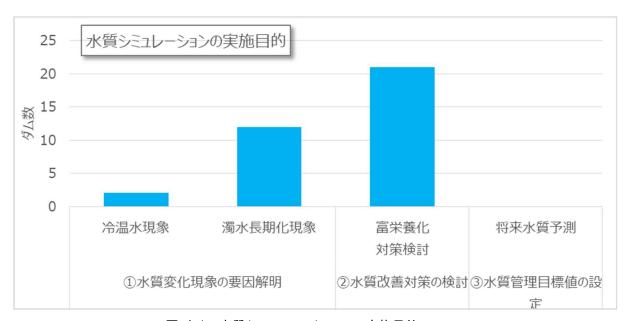


図 4-1 水質シミュレーションの実施目的

2) モデルの種類

水質シミュレーションモデルの構築事例は殆どが鉛直二次元モデルであった。

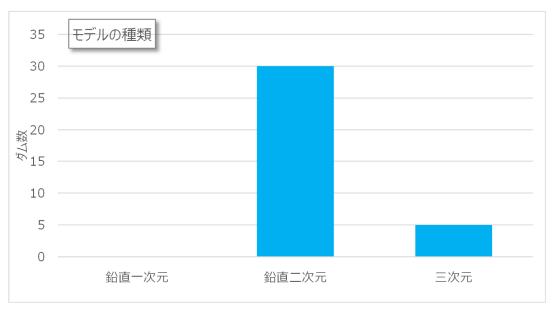


図 4-2 構築されている水質シミュレーションモデルの種類

3)計算対象年数

水質シミュレーションの計算対象年は、3年以上10年未満が最も多く、10年以上のケースも1年以下のケースもあった。

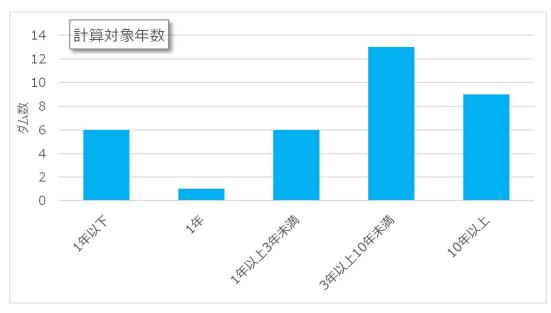


図 4-3 水質シミュレーションの計算対象年数

4-3. モデルの構築事例

4-3-1. 鉛直二次元モデルの例

鉛直二次元モデルの一般的な構築例としての一例を次ページより示す。

2. モデルの概要

2.1. 本モデルの特徴

従来の貯水池における水質予測に実用上用いられているモデルは鉛直一次元モデルや一次 元多層モデルが主流であったが、それらのモデルでは、鉛直方向の運動方程式を簡略化し て解いているなどの限界があった。

しかし、近年の計算処理能力の向上は目覚しく、貯水池水質予測のように計算対象期間が長い計算に対しても乱流解析や動圧解析といった高度な水理モデルの導入が可能となってきた。そのため、本モデルでは動圧解析として SIMPLE 法、乱流解析として k-εモデルを採用し、貯水池内の流動を精度良く再現できるようにした。

また、本モデルでは、貯水池内水質現象をより詳細に表現し分析ができるように、生態系モデルについても、従来の一般的なモデルよりも高度化を図った。具体的には、無機態窒素についてアンモニア態、亜硝酸態、硝酸態の 3 態窒素での予測、植物プランクトンの予測における細胞内の栄養素(セルクオタ)の考慮などを行っている。

【本モデルの特徴】

① 水理解析モデルの特徴

- ・ 動圧を考慮した SIMPLE 法を導入することにより、水理解析の高度化を図っている。 また、水位差を圧力として見込むことにより水面勾配の影響についても考慮している。
- ・ 乱流モデルとして k-εモデルを導入し、貯水池内の混合現象をより詳細に表現している。 また、風による貯水池内の混合現象への影響についても考慮している。
- ・ 本モデルは鉛直二次元モデルであるが、ブロックを組み合わせることにより、複雑な貯水池形状についても計算可能なモデルとしている。

② 生態系モデルの特徴

- ・ 植物プランクトンの光合成速度の制限因子として、栄養塩を直接用いるのではなく、植物プランクトンの細胞内に蓄積された栄養素(セルクオタ)を導入した予測計算としている。
- ・ 無機態窒素について、アンモニウム塩、亜硝酸塩、硝酸塩の3態窒素を予測可能なモデルとしている。
- 有機物質を懸濁態成分、溶存態成分に分割して予測可能なモデルとしている。
- ・ 植物プランクトンや動物プランクトンを POC や DOC などと同じように炭素換算により予測計算するモデルとしている。
- ・ 炭素換算植物プランクトンにクロロフィル a 換算係数を乗じることで、クロロフィル a 濃度を予測可能なモデルとしている。

③ 環境保全対策等

・ 環境保全対策として一般的である選択取水及び曝気(気泡式)循環について効果予測が 可能なモデルとしている。

2.2. 水理解析モデルの概要

(1) 水理解析モデルの基礎式

基礎方程式は、三次元の連続式、ブシネスク近似した運動方程式、 $k-\epsilon$ モデル式(乱れエネルギーkとエネルギー散逸率 ϵ の輸送方程式)、相対密度差(水温)と SS の輸送方程式から成る。これらの三次元方程式を横断方向に積分すると、川幅 B と側岸部におけるフラックス項を含む鉛直二次元の基礎方程式が得られる(鈴木・石川ら(2000)1より)。

連続式

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = 0$$

水平方向運動方程式

$$\frac{D(Bu)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(v_L B \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} B \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\left(n_x \cdot n_y \right)}$$

鉛直方向運動方程式

$$\frac{D(Bw)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(v_L B \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{eff} B \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Bg \delta + \frac{\tau_z}{\left(n_s \cdot n_v \right)}$$

乱れエネルギーk の輸送方程式

$$\frac{D(Bk)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_L}{\sigma_k} B \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_k} B \frac{\partial k}{\partial z} \right) = BP_r - Bg \frac{v_{eff}}{\sigma_t} \frac{\partial \delta}{\partial z} - B\varepsilon + \frac{F_k}{(n_s \cdot n_v)}$$

乱れエネルギーの散逸率Eの輸送方程式

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_L}{\sigma_{\varepsilon}} B \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_{\varepsilon}} B \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = C_1 B \frac{\varepsilon}{k} P_r - C_2 B \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{F_{\varepsilon}}{(n_{\varepsilon} \cdot n_{v})}$$

水温Tの輸送方程式

$$\frac{D(BT)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_L}{\sigma_\delta} B \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_t} B \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{F_T}{\left(n_s \cdot n_y \right)}$$

浮遊物質濃度(SS)Cの輸送方程式

$$\frac{\partial(BC)}{\partial t} + \frac{\partial(BuC)}{\partial x} + \frac{\partial(B(w - w_s)C)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_L}{\sigma_C} B \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_C} B \frac{\partial C}{\partial z}\right) = \frac{F_C}{(n_s \cdot n_v)}$$

また、上記において

$$P_r = v_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$v_{eff} = v + v_t = v + C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$v_L = 0.01 (\Delta x)^{4/3}$$
 (リチャードソンの 4/3 乗則)

である。ここに、 $\tau_x: x$ 方向に働く河床面(潤辺)せん断応力、 $\tau_z: z$ 方向に働く河床面(潤辺)せん断応力、 $(n_s \cdot n_y):$ 側岸部に垂直な単位ベクトル n_s と横断方向の単位ベクトル n_y の内積である。なお、k- ϵ モデル定数は以下の一般値を用いる。

$$C_u = 0.09$$
 $C_1 = 1.44$ $C_2 = 1.92$ $\sigma_k = 1.0$ $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$

¹ 鈴木・石川ら; 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動,水環境学会誌,第 23 巻,第 10 号,pp624-637,2000 年

(2) 合流処理

本モデルでは、貯水池が枝分かれしている場合には各枝をブロックに分割し、各枝は下流 メッシュに対して平行で合流するものと考えて解析する。ブロックを組み合わせることに よって、貯水池形状が複雑な場合についても対応可能である。

合流箇所についても、その他の箇所と同様に連続式 (圧力補正式)・運動方程式・輸送方程 式を解析する。

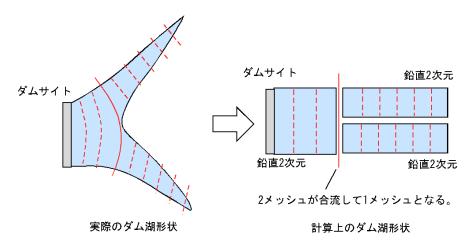


図 2.1 ダム湖の支川分岐の考慮

(3) QUICK スキーム導入による精度向上

水温の鉛直方向の移流項については、数値拡散の影響が大きいため、差分法として高精度 である Quick スキームを導入し、鉛直方向の移流拡散を抑制し、水温分布の再現性を向上 させている。

QUICK 法は、数値拡散による影響を軽減するため、メッシュ境界の水温の設定を、流速の方向に応じて上流 2 点、下流 1 点の 3 点より 2 次式を用いて推定する。 2 次式としては、 ラグランジェ補間多項式を用いる。

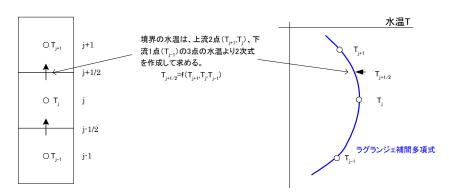


図 2.2 Quick 法の説明図

(4) 日射及び熱損失の基礎式

- ① 日射による輻射熱の基礎式
- ◆総輻射熱Φ。[KJ/m²/day] ····日積算量

$$\Phi_0 = (1 - a_r)\Phi_s$$

 a_r :水面反射率

Φ。: 日射量

◆水面における輻射熱Φ_w [KJ/m²/day]

$$\Phi_{vs} = \beta \Phi_0$$

β:水面吸収率

◆標高 y に到達する輻射熱 Φ。 [KJ/m²/day]

$$\Phi y = (1 - \beta)\Phi_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}\$$

η:水面反射率

② 水面からの熱損失の基礎式

◆水面からの熱損失 Φ_L [KJ/m²/day] ····日積算量

$$\Phi_L = \Phi_e + \Phi_c + \Phi_{ra} \quad [KJ/dt]$$

Φ,:貯水池表面からの熱損失

Φ。: 蒸発による熱損失

Φε: 伝導による熱損失

 $\Phi_{ra} = \Phi_{rw} - \Phi_{a}$:有効逆輻射

 Φ_a : 大気輻射

Φ, : 逆輻射

◆Rohwer \bigcirc 式 $\Phi_e + \Phi_c$ [KJ/m2/day]

$$\Phi_e + \Phi_c = (0.000308 + 0.000185W)\rho(e_s + \Psi e_a) \left\{ L_v + CT_s + \frac{269.1(T_s - T_a)}{(e_s - \Psi e_a)} \right\}$$

W:風速[m/s]

e_s:表層水温に相当する飽和蒸気圧[mmHg]

e_a: 気温に相当する飽和蒸気圧[mmHg]

Ψ:相対湿度

L_v:蒸発の潜熱[KJ/Kg]

T。: 表層水温[℃]

T_a: 気温[℃]

 $e_s[hPa] = 6.112 \exp\{17.67T_s/(T_s + 243.5)\}$

 $e_a[hPa] = 6.112 \exp\{17.67T_a/(T_a + 243.5)\}$

なお、1[hPa]=13.5951×980.665E-4 [mmHg]

 $L_v = 595.9 - 0.54T_s$

igloSwinbank の式 Φ_{ra} [KJ/m²/day]

 $\Phi_{ra} = 0.97k \left\{ T_w^4 - 0.937 \times 10^{-5} \times T_a^6 \left(1.0 + 0.17 C_d^2 \right) \right\}$

k: Stefan Bolzman 常数[KJ/m²/day/K]

T, :表面水温[K]

 T_a : 気温[K]

 C_d :雲量

③ 放熱補正係数 C の考慮

水と大気の熱収支は、土研モデルに準じているが、そのまま計算した場合に、放熱が大きく、 貯水池の水温が実測に比べて低く計算される場合があるため、上記の水面からの熱損失 (Rohwer の式、Swinbank の式) に補正係数 \mathbb{C} を乗じて熱収支のバランスをとる。

(5) 流動層厚の考慮

ダムの流入口付近では、放流口より広い範囲(流動層厚)で流動が起こり、その流速分布 はガウス分布で近似できるとされている。本モデルでは以下に示すように放流口における 流動層厚を考慮できる。

①流動層厚の設定

流動層厚 $\delta[m]$ は選択取水数 G、重力加速度 g を用いて次式によりあらわす。選択取水数 G は表層・底層取水時は 0.324、中層取水時は 0.134 とする(白砂・安芸 2)。

$$\delta = \left(\frac{Q}{G\theta\sqrt{g\varepsilon}}\right)^{1/3}$$

δ:流動層厚[m]

Q:流量[m³/s]

 θ :有効流入角[ラジアン]

円形 2π

半円形 π

直線形 π/2

g: 重力加速度 $[m/s^2]$

ε:密度勾配[l/m]

 $\varepsilon = \frac{\rho_o - \rho_y}{\rho_o \cdot y}$

ρ。: 流出点の密度

 ρ_v :流出点からy離れた点の密度

G: 選択取水数[-]

※計算上の密度勾配は、流出メッシュの1メッシュ上と1メッシュ下の密度より設定した。

² 白砂・安芸:「貯水池の濁水現象とその水理学的軽減対策」発電水力 No. 128, p3-25, 1973

②流速分布の設定

取水流速については、Huber ら³によって提案されたガウス分布を用いる。標準偏差 σ は分布全体の 95%が流動層内に収まるように σ = δ /3.92 で与える。

表層取水の場合は、流動層の一部が水面上に出てしまい、この前提が成立しなくなる。ここでは、堀田ら4によって提案された以下の方法により補正する。

【表層取水の場合の補正方法】

取水口の中心流速(最大流速)と取水流動層下端の流速(最小流速)の比(取水流動層下端の V/Vmax)が、取水流動層厚が水面以下で収まる場合と等しくなるように以下の式を用いて修正する。

$$\sigma' = \sigma \cdot \frac{\left(\delta + 2x\right)}{\delta} = \frac{\delta}{3.92} \cdot \frac{\left(\delta + 2x\right)}{\delta}$$

σ:修正前の標準偏差

σ': 修正後の標準偏差

δ:流動層厚

x: 水面上の流動層厚

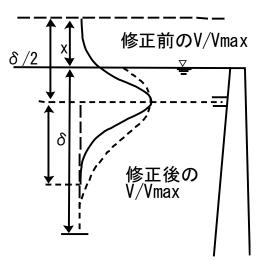


図 2.3 表層取水流速の修正

流速分布は以下のとおりガウス分布で与える。

$$u_y = u_{o \max} \quad \exp\left\{-\frac{(y - y_{out})^2}{2\sigma_o^2}\right\}$$

3 Hurber, W. C., Harleman, D. R. F., and Ryan, P. J. :Temperature prediction in stratified reservoirs, *J. Hydr. Div.*, HY4, 654-666, 1972

4 堀田哲夫:「選択取水設備の取水性能と水質への影響に関する一考察」ダム工学 Vol. 15, No. 1, 28-36, 2005

③ピアー張り出しの影響

直線型取水ゲート等にみられるピアーの張り出しについては、図 の高須ら5による実験があり、張り出し長 P と取水幅 L の比が大きくなるにしたがって、流動層厚が増大するとの結果が得られている。本モデルでも図 をもとに、ピアーの張り出しによって流動層厚を補正した。

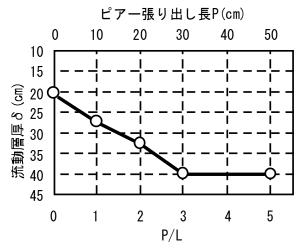


図 2.4 ピアー張り出し長と取水流動層厚の関係

⁵ 高須修二:「選択取水設備の機能比較」ダム技術 No. 35, p15-23, 1989

(6) 確率的沈降モデルへの対応

ダム湖における微細土砂の沈降現象は従来用いられてきたストークスの沈降則に必ずしも 従わないことが指摘されている。本モデルではストークスの沈降則に加え、図 2.5 に模式 的に示している濁質沈降のモデルを用いることができる。

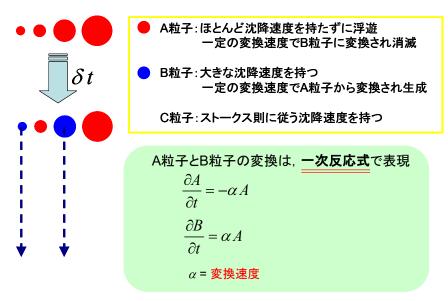


図 2.5 確率的沈降モデルの概要図

※ 確率的沈降モデルに従うA、B粒子とストークスの沈降則に従うC粒子とのしきい値、及び変換速度 α の設定は沈降試験によって設定する方法が適切である。

(7) 壁面境界の処理

x軸(流下方向)に働く剪断応力は次式で与える。

$$\tau_x = f_b \cdot \alpha u \cdot |\alpha u| = \alpha^2 f_b u |u|$$

ここに、fb は摩擦係数、係数 α は河岸付近の流速が横断平均流速より小さいことを考慮する係数であり、本モデルでは文献より $\alpha=0.8$ としている。

なお、鉛直方向の河岸剪断力($= \tau y$)は小さいので無視した。また、境界面に対して垂直な流速はゼロとした。

2.3. 生態系モデルの概要

(1) 予測水質項目とモデル概念

生態系モデルにおける水質予測項目は中田6を参考に以下のとおりとした。植物プランクトンについては、細胞内における栄養塩保持量(セルクオタ)を考慮している。また、有機体物質は懸濁態、溶存態に分割し、無機態窒素は 3 態で計算できる。生態系モデルの概念図を図 2.6 に示す。

表 2.1 生態系モデルにおける予測水質項目

・植物プランクトン(炭素量)	・DOP(溶存態有機リン)
・動物プランクトン(炭素量)	・DON(溶存態有機窒素)
・リンセルクオタ**)	・PO ₄ -P(リン酸塩)
・窒素セルクオタ	・NH ₄ -N(アンモニア態窒素)
・POC(懸濁態有機炭素)	・NO ₂ -N(亜硝酸態窒素)
・POP(懸濁態有機リン)	・NO3-N(硝酸態窒素)
・PON(懸濁態有機窒素)	・DO(溶存酸素)
・DOC(溶存態有機炭素)	・COD(有機物)

※)セルクオタ:細胞内栄養保持量

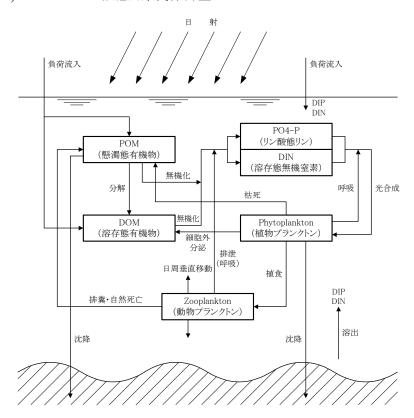


図 2.6 生態系モデルの概念図

⁶ 中田喜三郎; 生態系モデル(定式化と未知のパラメータの推定法), 海洋工学コンファレス論文集, vol8, 1993, pp99-138

(2) 生態系モデルの基礎式

生態系モデルの各水質項目(植物プランクトン、リン、窒素など)の基礎方程式は次式とする。

$$\frac{\partial (Bf)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Buf) + \frac{\partial}{\partial y} (Bvf) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_L}{\sigma_f} B \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_f} B \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \left(\frac{d(Bf)}{dt} \right)^*$$
時間変化項 移流項 拡散項 生物学的生成項

ここに、B:川幅、f:富栄養化関連水質項目、u,v:水平及び鉛直方向流速、 v_L 、 v_{eff} :水平及び鉛直方向の渦動粘性係数、 σ_f :定数である。

各水質項目における生物学的生成項は表 2.2 に示すとおりである。

表 2.2(1) 生態系モデルの基本構造

	表 2.2(1) 生態糸セアルの基本構造									
	水質項目	変化量	増殖(光合成)	細胞外分秘	呼吸(植物 pl.) ・排泄(動物 pl.)	動物プランクトン による摂食	枯死 (植物 pl.)・ 自然死亡(動物 pl.)	沈降	摂取	懸濁態有機物の摂食
植物プラ	植物プランクトン 〔mg·C/L〕	$\frac{d[P]}{dt} =$	$+\underbrace{v_1 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot [P]}_{\mathbf{B}_1}$	$-\mu_3 \cdot [P]$ B ₃	$-v_3 \cdot [P]$ B_5	$-\sum_{B_4}^{NZ} (\mu_8 \cdot \nu_4 \cdot [Z])$	$-\underline{m}\cdot [P]^2$ B_6	$-w_{P} \cdot \frac{\partial [P]}{\partial z}$ B_{7}		
ンク	細胞内リン保持量 〔mg-Ph/L〕	$\frac{d[SQP]}{dt} =$	$-(Ph:C_P)\cdot B_1$			$-B_4 \cdot \frac{[SQP]}{[P]}$	$-B_6 \cdot \frac{[SQP]}{[P]}$	$-w_P \cdot \frac{\partial [SQP]}{\partial z}$	$+ \underbrace{\mu_4 \cdot (Ph : C_P) \cdot [P]}_{B_2^{Ph}}$	
トン	細胞内窒素保持量 〔mg-N/L〕	$\frac{d[SQN]}{dt} =$	$-(N:C_P)\cdot B_1$			$-B_4 \cdot \frac{[SQN]}{[P]}$	$-B_6 \cdot \frac{[SQN]}{[P]}$	$-w_P \cdot \frac{\partial [SQN]}{\partial z}$	$+\mu_5 \cdot (N:C_P) \cdot [P]$ B_2^N	
	動物プランクトン 〔mg-C/L〕	$\frac{d[Z]}{dt} =$			$ \begin{array}{c c} -v_5 \cdot [Z] \\ \hline B_{10} \end{array} $	$\left(\sum^{NP} \mu_8\right) \cdot v_4 \cdot [Z]$ B_4	$-\frac{\delta \cdot [Z]^2}{B_{11}}$			$+\frac{[POC]}{\sum\limits_{NP}^{NP}[P]+[POC]}\cdot v_4\cdot [Z]$ B ₈
懸濁能	懸濁態有機物 〔mg-C/L〕	$\frac{d[POC]}{dt} =$					$+\sum^{NP} B_6 + \sum^{NZ} B_{11}$	$-\frac{w_{POC}}{\frac{\partial [POC]}{\partial z}}$ B ₁₅		$-\sum^{NZ} B_8$
懸濁態有機物	懸濁態リン 〔mg-Ph/L〕	$\frac{d[POP]}{dt} =$					$+\sum^{NP} ((Ph:C_P) \cdot B_6)$	$-w_{POP} \cdot \frac{\partial [POP]}{\partial z}$		
	[mg-N/L]	$\frac{d[PON]}{dt} =$					$+\sum^{NP}((N:C_P)\cdot B_6)$	$-w_{PON} \cdot \frac{\partial [PON]}{\partial z}$		
	溶存態有機物 〔mg-C/m³〕 〔mg-C/L〕	$\frac{d[DOC]}{dt} =$		$+\sum^{NP}B_3$						
ì	容存態リン酸塩 〔mg-Ph/L〕	$\frac{d[D - PO_4]}{dt} =$		$+\sum^{NP} ((Ph:C_P)\cdot B_3)$	$+\sum^{NP}((Ph:C_P)\cdot B_5)$		$+\sum^{NP} \left(B_6 \cdot \frac{[SQP]}{[P]}\right)$		$-\sum^{NP}B_2^{Ph}$	
į	[mg-Ph/L]	$\frac{d[P - PO_4]}{dt} =$						$-w_{P-PO4}\cdot\frac{\partial \big[P-PO_4\big]}{\partial z}$		
無	[mg-N/L]	$\frac{d[NH_4]}{dt} =$		$+\sum^{NP}((N:C_P)\cdot B_3)$	$+\sum^{NP}((N:C_P)\cdot B_5)$		$+\sum^{NP} \left(B_6 \frac{[SQN]}{[P]}\right)$		$-\sum^{NP}B_2^{NH4}$	
無機態窒素	[mg-N/L]	$\frac{d[NO_2]}{dt} =$								
素	硝酸態窒素 〔mg-N/L〕	$\frac{d[NO_3]}{dt} =$							$-\sum^{NP} B_2^{NO3}$	
	溶存酸素 [mg·O/L]	$\frac{d[DO]}{dt} =$	$+\sum_{1}^{NP} ((TOD: C_P) \cdot B_1)_{1}$		$\frac{\sum_{P}^{NP} ((TOD : C_P) \cdot B_5)}{D_2}$ $= \frac{\sum_{P}^{NZ} ((TOD : C_Z) \cdot B_{10})}{D_3}$					

表 2.2(2) 生態系モデルの基本構造

	水質項目	変化量	排糞	日周鉛直移動	無機化	分解余剰	溶出・底泥による DO 消費(底層のみ)	硝化	脱窒(底層のみ)	再曝気 (表層のみ)
植物プ	植物プランクトン 〔mg-C/L〕	$\frac{d[P]}{dt} =$								
ノランク	細胞内以保持量 〔mg-Ph/L〕	$\frac{d[SQP]}{dt} =$								
クトン	細胞内窒素保持量 〔mg·N/L〕	$\frac{d[SQN]}{dt} =$								
	動物プランクトン 〔mg-C/L〕	$\frac{d[Z]}{dt} =$	$-\underbrace{(1-e)\cdot v_4\cdot [Z]}_{\mathbf{B}_9}$	$ \pm w_2 \cdot \frac{\partial [Z]}{\partial z} $ $ B_{12} $						
懸濁	懸濁態有機物 〔mg-C/L〕	$\frac{d[POC]}{dt} =$	$+\sum^{NZ}B_9$		- v ₉ · [POC] B ₁₃	B_{14}				
懸濁態有機物	懸濁態リン 〔mg-Ph/L〕	$\frac{d[POP]}{dt} =$	$+\sum^{NP}((Ph:C_P)\cdot B_4)$		- v ₁₀ · [POP]					
物	[mg-N/L]	$\frac{d[PON]}{dt} =$	$+\sum^{NP}((N:C_P)\cdot B_4)$		- v ₁₁ · [PON]					
	[mg-C/L]	$\frac{d[DOC]}{dt} =$			- v ₁₂ · [DOC] B ₁₆	+ B ₁₄				
	溶存態リン酸塩 〔mg-Ph/L〕	$\frac{d[D - PO_4]}{dt} =$	$+\sum^{NP} \left(B_4 \cdot \frac{[SQP]}{[P]}\right)$		$+v_{10}\cdot[POP]$	$+v_{14}\cdot [P-PO4]$ B_{26}	$\frac{+v_{13}/h}{B_{28}}$			
	懸濁態リン酸塩 〔mg-Ph/L〕	$\frac{d[P - PO_4]}{dt} =$				- B ₂₆				
	アンモニア態窒素 〔mg-N/L〕	$\frac{d[NH_4]}{dt} =$	$+\sum^{NP} \left(B_4 \cdot \frac{[SQN]}{[P]}\right)$		$+v_{11}\cdot[PON]$		$+v_{15}/h$ B_{29}	$\frac{-k_{NH4} \cdot [NH_4]}{B_{17}}$		
無機態窒素	亜硝酸態窒素 〔mg·N/L〕	$\frac{d[NO_2]}{dt} =$						$+B_{17}$ $-k_{NO2} \cdot [NO_2]$ B_{18}^{\dagger}		
	硝酸態窒素 〔mg-N/L〕	$\frac{d[NO_3]}{dt} =$						+ <i>B</i>	- v ₁₆ ·[NO ₃]/h (底層のみとする)	
	溶存酸素 〔mg-O/L〕	$\frac{d[DO]}{dt} =$			$ \begin{array}{c} -\underbrace{(TOD:C_{POC})\cdot B_{13}}_{D_4} \\ -\underbrace{(TOD:C_{DOC})\cdot B_{16}}_{D_5} \end{array} $		$\frac{-k_B/h}{D_8}$	$ \begin{array}{c c} -3.43 \cdot B_{17} \\ \hline D_{6} \\ -1.14 \cdot B_{18} \\ \hline D_{7} \end{array} $		$+ ka \cdot (DO_S - [DO]) / h_S$ D_9

 $**v_{10}=(1+\kappa)v_9$, $v_{11}=(1+\kappa)v_9$ とした

植物プランクトン: P[mg-C/L]

$$\frac{dP_i}{dt} = B_1 - B_3 - B_5 - B_4 - B_6 - B_7 + q_p$$

 B_1 : 光合成

 B_3 :細胞外

 B_5 : 呼吸

 B_4 :動物プランクトン摂食

 B_6 : 枯死

 B_7 : 沈降

 q_n :外部負荷

$$B_1^i = \alpha_1^i \cdot EXP(\beta_1^i \cdot T) \times \min \left\{ \frac{[SQP^i]}{[SQP^i] + (P_b : C_P)^i \cdot [P^i]}, \frac{[SQN^i]}{[SQN^i] + (N : C_P)^i \cdot [P^i]} \right\}$$

$$\times \frac{I(Z)}{I_{opt}^{i}} \cdot EXP \left(1 - \frac{I(Z)}{I_{opt}^{i}}\right) \times \left[P^{i}\right]$$

$$\left(I(Z) = I_0 \cdot EXP\left\{-\left(k_0 + k_s \cdot \sum_{i=1}^{NP} \left[Chl - a^i\right]\right) \cdot z\right\}\right)$$

$$B_3^i = 0.135 \cdot EXP \left\{ -0.00201 \cdot (chl - a : C_P)^i \cdot [P^i] \right\} \times [P^i]$$

$$B_5^i = \alpha_2^i \cdot EXP \{ \beta_2^i \cdot T \} \times [P^i]$$

$$B_4^i = \alpha_3^i \cdot EXP \Big\{ \beta_3^i \cdot T \Big\} \cdot \left[1 - EXP \Big\{ \lambda \cdot \left(\underset{\text{index}}{\pi} * - \sum_i^{NP} \left[P^i \right] - \left[POC \right] \right) \right\} \right] \times \frac{\left[P^i \right]}{\sum_i^{NP} \left[P^i \right] + \left[POC \right]} \times \left[Z \right]$$

$$B_6^i = m^i \cdot \left[P^i\right]^2$$

$$B_7^i = W_P^i \frac{\partial [P^i]}{\partial Z}$$

パラメーター	単位	説明
α_1^i	1/日	植物プランクトン種iにおける最大増殖速度
$oldsymbol{eta_1^i}$	1/℃	植物プランクトン種iにおける光合成温度係数
$(P_h:C_P)^i$	mgPh/mgC	植物プランクトン種 i における Ph/Cp
$(N:C_P)^i$	mgN/mgC	植物プランクトン種 i における N/Cp
$(Chl-a:C_P)$	μ gChl-a/mgC	植物プランクトン炭素量を Chl - $\mathrm{a}(\mu \mathrm{g/L})$ に換算する 係数
I_{opt}^i	$ m MJ/m^2$	植物プランクトン種iの最適日射量
k_0	1/m	湖沼に固有な消散係数
k_s	1/m/(μ g/L)	Chl-a によって減衰する比例定数
α_2^i	1/日	植物プランクトン種iにおける呼吸速度
$oldsymbol{eta_2^i}$	1/℃	植物プランクトン種iにおける呼吸速度の温度係数
α_3^i	1/日	植物プランクトン種 i に対する動物プランクトン摂 食速度
$oldsymbol{eta_3^i}$	1/°C	植物プランクトン種 i に対する動物プランクトン摂 食速度の温度係数
λ	1/(mgC/L)	Ivlev 定数
π^*	mgC/L	動物プランクトンに摂食される植物プランクトンいき値
m^i	1/(mgC/L)/日	植物プランクトン種iにおける枯死速度の定数
W_P^i	m/ ∃	植物プランクトン種iにおける沈降速度

② 栄養塩保持量:SQP[mg-P/L],SQN[mg-N/L]

a)SQP:リン保持量

$$\frac{d\left[SQP^{i}\right]}{dt} = B_{2}^{Ph-i} - \left[P_{h}:C_{P}\right]^{i} \cdot B_{1}^{i} - \left(B_{4}^{i} + B_{6}^{i}\right) \frac{\left[SQP^{i}\right]}{\left[P^{i}\right]} - W_{P}^{i} \frac{\partial \left[SQP^{i}\right]}{\partial Z}$$

 $[P_{\scriptscriptstyle h}:C_{\scriptscriptstyle P}]\cdot B^i_{\scriptscriptstyle 1}$: 光合成によるサブシステントクオタ分減少

$$B_2^{Ph-i} = UP_{\max}^i \cdot \frac{\left[D - PO_4\right]}{K_P^i + \left[D - PO_4\right]} \cdot \left\{PQP_{\max}^i - \frac{\left[P_h : C_P\right]^i \cdot \left[P^i\right] + \left[SQP^i\right]}{\left[P_h : C_P\right]^i \cdot P^i}\right\}$$

$$/(PQP_{\max}^{i}-1)\cdot[P_{h}:C_{P}]^{i}\cdot[P^{i}]$$

UPⁱ :最大摂取速度

 K_P^i : 摂取に関する半飽和定数

 PQP_{max}^{i} :細胞内のとりうるセルクオタの最大値

b)SQN:窒素保持量

$$\frac{d\left[SQN^{i}\right]}{dt} = B_{2}^{Ni} - \left[N:C_{P}\right]^{i} \cdot B_{1}^{i} - \left(B_{4}^{i} + B_{6}^{i}\right) \frac{\left[SQN^{i}\right]}{\left[P^{i}\right]} - W_{P}^{i} \frac{\partial \left[SQN^{i}\right]}{\partial Z}$$

$$B_{2}^{N-i} = UN_{\max}^{i} \cdot \left\{ \frac{\left[NH_{4} \right]}{K_{NH4}^{i} + \left[NH_{4} \right]} + \frac{\left[NO_{3} \right]}{K_{NO3}^{i} + \left[NO_{3} \right]} EXP^{-\phi i \cdot NH4} \right\}$$

$$\cdot \left\{ PQN_{\max}^{i} - \frac{\left[N:C_{P}\right]^{i} \cdot \left[P^{i}\right] + \left[SQN^{i}\right]}{\left[N:C_{P}\right]^{i}P^{i}} \right\} / \left(PQN_{\max}^{i} - 1\right) \cdot \left[N:C_{P}\right]^{i} \cdot \left[P^{i}\right]$$

パラメーター	単位	説明
UP_{\max}^i	1/日	植物プランクトン種 i におけるリンセルクオタの最大摂取
OI max	1/ 🖂	速度
K_P^i	mgP _h /L	植物プランクトン種 i におけるリンセルクオタ摂取の半飽
K_P	IIIgI h/L	和定数
PQP_{\max}^{i}	_	植物プランクトン種iにおける細胞内の最大リンセルクオタ
1 21 max		保持量
UN_{\max}^{i}	1/日	植物プランクトン種 i における窒素セルクオタの最大摂取
OT v max	1/ 🖯	速度
$K^i_{_{NH4}}$	mgN/L	植物プランクトン種iにおける窒素摂取に関するNH4の半飽
NH 4 IIIgIV/I	mgrv/L	和定数
K^i	K_{NO3}^i mgN/L	植物プランクトン種iにおける窒素摂取に関するNO3の半飽
NO3		和定数
PQN_{\max}^{i}	_	 細胞内の最大窒素セルクオタ保持量
- Z¹' max		APAIGITY AV AV MINE
φ^i	1/(mg/L)	植物プランクトン種 i における硝酸塩の摂取に関するアン
φ	1/(IIIg/L)	モニウム塩濃度による抑制効果

③ 動物プランクトン: Z[mg-C/L]

$$\frac{d[Z]}{dt} = B_4 + B_8 - B_9 - B_{10} - B_{11} \pm B_{12} + q_z$$

 B_{\star} :植物プランクトン摂食

B_c : POC の摂食

Bo : 排糞

B₁₀ : 排泄

 B_{11} : 死亡

 B_{12} :日周垂直移動

$$B_{4}^{i} = \alpha_{3}^{i} \cdot EXP \left\{ \beta_{3}^{i} \cdot T \right\} \cdot \left[1 - EXP \left\{ \lambda \left(\pi^{*} - \sum_{i}^{NP} \left[P^{i} \right] - \left[POC \right] \right) \right\} \right] \times \frac{\sum_{i}^{NP} \left[P^{i} \right]}{\sum_{i}^{NP} \left[P^{i} \right] + \left[POC \right]} \times \left[Z \right]$$

$$B_{8}^{i} = \alpha_{3}^{i} \cdot EXP \left\{ \beta_{3}^{i} \cdot T \right\} \cdot \left[1 - EXP \left\{ \lambda \left(\pi^{*} - \sum_{i}^{NP} \left[P^{i} \right] - \left[POC \right] \right) \right\} \right] \times \frac{\left[POC \right]}{\sum_{i}^{NP} \left[P^{i} \right] + \left[POC \right]} \times \left[Z \right]$$

$$\begin{split} B_9 &= \left(1 - e\right) \cdot \left(B_4 + B_8\right) \\ B_{10} &= \alpha_4 \cdot EXP \big\{\beta_4 \cdot T\big\} \cdot \big[Z\big] + \eta \cdot \left(B_4 + B_8\right) \end{split}$$

$$B_{11} = \delta [Z]^2$$

$$B_{12} = \frac{W}{b_m} \cdot \frac{\partial([Z] \cdot b)}{\partial z}$$
 ($b: 川幅、 $b_m: [Z]$ 定義点における川幅)$

$$B_{11} = O[Z]$$
 $B_{12} = \frac{W}{b_m} \cdot \frac{\partial ([Z] \cdot b)}{\partial z}$ ($b : 川幅、 $b_m : [Z]$ 定義点における川幅)
ただし、 $W = \begin{cases} W_{down} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{DL}t\right) & (0 \le t \le DL) \\ -W_{up} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{(1-DL)}(t-DL)\right) & (DL \le t \le 1) \end{cases}$$

$$DL = a_{DL} + b_{DL} \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{365} (day - day_{DL \max}) \right)$$

パラメーター	単 位	説明
е	_	動物プランクトンの同化効率
$lpha_4$	1/日	動物プランクトンの代謝速度
$oldsymbol{eta}_4$	1/°C	動物プランクトンの代謝速度の温度係数
η	_	摂食活動に伴うエネルギーの消費率
δ	1/(mgC/L)/日	動物プランクトン自然死亡速度の定数
W_{down}	m/日	日周鉛直移動最大下降速度
W_{up}	m/∃	日周鉛直移動最大上昇速度
DL	日	日の出から日の入までの時間 (日長)
a_{DL} , b_{DL} , $day_{DL\max}$	日	日長を規定するパラメーター

④懸濁態有機物:POC[mg-C/L]

$$\frac{d[POC]}{dt} = \sum_{i=1}^{NP} B_6^i + (B_{11} + B_9 - B_8) - B_{13} - B_{14} - B_{15} + q_{POC}$$

 B_6^i : 枯死

B₁₁ : 自然死亡

B₉ : 排糞

 B_8 :動物プランクトンによる POC の摂食

 B_{13} :細菌による分解

 B_{14} : 分解余剰物

B₁₅ : 沈降

$$\begin{split} B_{13} &= \alpha_5 \cdot EXP \big\{ \beta_5 \cdot T \big\} \cdot \frac{\big[DO\big]}{DO_0 + \big[DO\big]} \cdot \big[POC\big] \\ B_{14} &= \kappa B_{13} \\ B_{15} &= W_{POC} \, \frac{\partial \big[POC\big]}{\partial Z} \end{split}$$

パラメーター	単 位	説明
$\alpha_{\scriptscriptstyle 5}$	1/日	POC の分解速度
$eta_{\scriptscriptstyle 5}$	1/°C	POC の分解速度の温度係数
DO_0	mg/L	POC 分解の DO 半飽和定数
К	_	余剰物生成の割合 (DOC への変換割合)
W_{POC}	m/日	POC の沈降速度

⑤ 懸濁態有機リン: POP[mg-P/L]

$$\begin{split} \frac{d\big[POP\big]}{dt} &= \sum_{i=1}^{NP} \left\{\!\! \left(\!P_h:C_P\right)^i \cdot B_6^i \right\} \! + \sum_{i=1}^{NP} \left\{\!\! \left(\!P_h:C_P\right)^i \cdot B_4^i \right\} \!\! - B_{23}^{Ph} - B_{24} + q_{POP} \\ &\qquad \qquad \sum_{i=1}^{NP} \left\{\!\! \left(\!P_h:C_P\right)^i \cdot B_6^i \right\} : \, \text{枯死} \\ &\qquad \qquad \sum_{i=1}^{NP} \left\{\!\! \left(\!P_h:C_P\right)^i \cdot B_4^i \right\} : \, \text{動物プランクトンに摂食されて植物プランクトンから放出された分} \end{split}$$

B^{Ph} : 分解 (全部無機化)

B₂₄ : 沈降

$$\begin{split} B_{23}^{Ph} &= \alpha_6 \cdot EXP \big\{ \beta_6 \cdot T \big\} \cdot \frac{\big[DO\big]}{DO_1 + \big[DO\big]} \cdot \big[POP\big] \\ B_{24} &= W_{POP} \, \frac{\partial \big[POP\big]}{\partial Z} \end{split}$$

パラメーター	単 位	説明
$\alpha_{\scriptscriptstyle 6}$	1/日	POP の分解速度
$oldsymbol{eta_6}$	1/°C	POP の分解速度の温度係数
DO_1	mg/L	POP 分解の DO 半飽和定数
W_{POP}	m/∃	POPの沈降速度

⑥懸濁態有機窒素:PON[mg-N/L]

 $\sum_{i=1}^{NP} \left\{ \! \left(\! N : C_P \right)^i \cdot B_4^i
ight\} : 動物プランクトンに摂食されて植物プランクトンから放出$

された分

 B_{23}^N :分解

B₂₅ : 沈降

$$B_{23}^{N} = \alpha_{7} \cdot EXP \{ \beta_{7} \cdot T \} \frac{[DO]}{DO_{2} + [DO]} \cdot [PON]$$

$$B_{25} = W_{PON} \frac{\partial [PON]}{\partial Z}$$

パラメーター	単位	説明
α_7	1/日	PON の分解速度
$oldsymbol{eta}_{7}$	1/°C	PON の分解速度の温度係数
DO_2	mg/L	PON 分解の DO 半飽和定数
W_{PON}	m/日	PON の沈降速度

⑦溶存態有機物:DOC[mg-C/L]

$$\frac{d[DOC]}{dt} = \sum_{i=1}^{NP} B_3^i + B_{14} - B_{16} + q_{DOC}$$

B₁₄ : 分解余剰物

B₁₆ :無機化

$$B_{16} = \alpha_8 EXP \{ \beta_8 \cdot T \} \cdot \frac{[DO]}{DO_3 + [DO]} \cdot [DOC]$$

パラメーター	単 位	説明
$\alpha_{_8}$	1/日	DOC の無機化速度
β_{8}	1/℃	DOC の無機化速度の温度係数
DO_3	mg/L	DOC 無機化の DO 半飽和定数

⑧溶存態リン酸塩:D-PO₄-P[mg-P/L]

$$\frac{d[D - PO_4 - P]}{dt} = \sum_{i=1}^{NP} \left(-B_2^{Ph-i} \right) + \sum_{i=1}^{NP} \left\{ \left(P_h : C_P \right)^i \cdot B_5^i \right\} + B_{23}^{Ph} + \sum_{i=1}^{NP} \left(B_4^i \cdot \frac{\left[SQP^i \right]}{\left[P^i \right]} \right)$$

$$+\sum_{i=1}^{NP} \left(B_6^i \frac{\left[SQP^i\right]}{\left[P^i\right]}\right) + \sum_{i=1}^{NP} \left\{ \left(P_h: C_P\right)^i \cdot B_3^i \right\} + B_{28} + B_{26} + q_{D-PO4-P}$$

$$\sum_{i=1}^{NP} \left(-B_2^{Ph-i} \right)$$
 : セルクオタ摂取

$$\sum_{i=1}^{NP} \left\{ (P_h : C_P)^i \cdot B_5^i \right\} : 植物プランクトン呼吸分$$

$$\sum_{i=1}^{NP} \left(B_4^i \cdot \frac{\left[SQP^i \right]}{\left[P^i \right]} \right)$$
: 摂食によるセルクオタ減少分

$$\sum_{i=1}^{NP} \left(B_6^i \frac{\left[SQP^i \right]}{\left[P^i \right]} \right)$$
 : 枯死によるセルクオタ減少分

$$\sum_{i=1}^{NP} \{ (P_h : C_P) \cdot B_3 \} : 細胞外分泌分$$

$$B_{28} = \alpha_9 \cdot EXP \{ \beta_9 \cdot T - \gamma_p [DO] \} / h$$

$$B_{26} = \alpha_{10} \cdot EXP \{ \beta_{10} \cdot T \} \cdot [P - PO_4 - P]$$

パラメーター	単 位	説 明
α_9	g/m²/日	d-PO ₄ -P 溶出量
$oldsymbol{eta_9}$	1/°C	d-PO ₄ -P 溶出量の温度係数
γ_P	1/(mg/L)	d-PO ₄ -P 溶出の DO 依存率
α_{10}	1/日	P-PO ₄ -P の分解速度
$oldsymbol{eta}_{10}$	1/°C	P-PO ₄ -P の分解速度の温度係数

⑨懸濁態リン酸塩:P-PO₄-P[mg-P/L]

$$\frac{d[P - PO_4 - P]}{dt} = -B_{26} - B_{27} + q_{P - PO4 - P}$$

 B_{26} : 分解余剰

 B_{27} : 沈降

$$B_{27} = W_{P-PO4-P} \frac{\partial [P - PO_4 - P]}{\partial Z}$$

<パラメーター>

パラメーター	単 位	説明
$W_{P-PO4-P}$	m/ 日	P-PO ₄ -P の沈降速度

< P-P0₄-P の予測手法 参考>・・・流入 P-P0₄-P の情報・データが乏しい場合

貯水池内において、平水時はおおむね溶存態成分が大部分を占めていると考えられるが、出水時には主に懸濁態成分が流入する。懸濁態成分は SS に吸着した形で流下するため、SS 濃度と同等の速度で沈降すると考えることができる。

任意の出水時において、流入地点での P-P0₄-P 濃度/SS 濃度の比率 [P-P0₄-P/SS] を求め、SS 濃度にこの比率を乗じることで、P-P0₄-P 濃度を推定することを考える。 P-P0₄-P 濃度 (mg/L) = SS 濃度 (mg/L) × $[P-P0_4-P/SS]$

貯水池内においても、この式により $P-P0_4-P$ 濃度を推定し、貯水池内や放流における $P-P0_4-P$ 濃度の出力結果が得られるため、流入 $P-P0_4-P$ の情報・データが乏しい場合は この手法の適用が妥当であると考えられる。

なおこの場合、上記に示した d-P0₄-P への「分解余剰」による減少などは考慮せず、 単純に SS 濃度の一次関数として振るまい、植物プランクトンやセルクオタなどの変動 には影響しないものとする。

⑩アンモニア態窒素:NH₄[mg-N/L]

$$\begin{split} \frac{d \left[NH_{4} \right]}{dt} &= \sum_{i=1}^{NP} \left(-B_{2}^{NH4-i} \right) + \sum_{i=1}^{NP} \left\{ \! \left(N:C_{P} \right)^{i} \cdot B_{5}^{i} \right\} + B_{23}^{ON} + \sum_{i=1}^{NP} \left(B_{4}^{i} \cdot \frac{\left[SQN^{i} \right]}{\left[P^{i} \right]} \right) \\ &+ \sum_{i=1}^{NP} \left(B_{6}^{i} \cdot \frac{\left[SQN^{i} \right]}{\left[P^{i} \right]} \right) + \sum_{i=1}^{NP} \left\{ \! \left(N:C_{P} \right) \cdot B_{3}^{i} \right\} + B_{29} - B_{17} + q_{NH4} \end{split}$$

$$\sum_{i=1}^{NP} \left(-B_2^{NH4} \right)$$
 : セルクオタ摂取分

$$\sum_{i=1}^{NP} \left\{ (N:C_P)^i \cdot B_5^i \right\}$$
:植物プランクトンの呼吸分

$$\sum_{i=1}^{NP} \left(B_4^i \cdot \frac{\left[SQN^i \right]}{\left[P^i \right]} \right)$$
: 摂食によるセルクオタ減少分

$$\sum_{i=1}^{NP} \left(B_6^i \frac{\left[SQN^i \right]}{\left[P^i \right]} \right)$$
 : 枯死によるセルクオタ減少分

$$\sum_{i=1}^{NP} \{ (N:C_P) \cdot B_3^i \} : 細胞外分泌分$$

アンモニア態窒素の摂取分

$$\sum_{i=1}^{NP} B_{2}^{NH4-i} = \sum_{i=1}^{NP} \left[B_{2}^{Ni} \cdot \frac{\left[NH_{4} \right]}{K_{NH4}^{i} + \left[NH_{4} \right]} / \left\{ \frac{\left[NH_{4} \right]}{K_{NH4}^{i} + \left[NH_{4} \right]} + \frac{\left[NO_{3} \right]}{K_{NO3}^{i} + \left[NO_{3} \right]} \cdot EXP \left(-\varphi^{i} \cdot NH_{4} \right) \right\} \right]$$

$$B_{29} = \alpha_{11} \cdot EXP \{ \beta_{11} \cdot T - \gamma_N \cdot [DO] \} / h$$

$$B_{17} = \alpha_{12} \cdot EXP(\beta_{12} \cdot T) \cdot \frac{[DO]}{DO_4 + [DO]} \times [NH_4]$$

パラメーター	単 位	説明
α_{11}	g/m²/日	NH4溶出量
$oldsymbol{eta}_{11}$	1/°C	NH4溶出量の温度係数
γ_N	1/(mg/L)	NH4溶出の DO 依存率
α_{12}	1/日	NH4の硝化速度
eta_{12}	1/°C	NH4の硝化速度の温度係数
DO_4	mg/L	NH4 硝化の DO 半飽和定数

⑪亜硝酸態窒素:NO₂[mg-N/L]

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = B_{17} - B_{18} + q_{NO2}$$

B₁₈ : 硝化 NO₂→NO₃

$$B_{18} = \alpha_{13} \cdot EXP(\beta_{13} \cdot T) \frac{[DO]}{DO_5 + [DO]} \times [NO_2]$$

<パラメーター>

パラメーター	単 位	説明
α_{13}	1/日	NO2の硝化速度
$oldsymbol{eta}_{13}$	1/°C	NO ₂ の硝化速度の温度係数
DO_5	mg/L	NO2 硝化の DO 半飽和定数

⑫硝酸態窒素:NO₃[mg-N/L]

$$\frac{d[NO_3]}{dt} = \sum_{i=1}^{NP} \left(-B_2^{NO3}\right) + B_{18} - B_{19} + q_{NO3}$$

B₁₉ : 脱窒

硝酸態窒素の摂取分

$$\sum_{i=1}^{NP} B_{2}^{NO3}^{i} = \sum_{i=1}^{NP} \begin{bmatrix} B_{2}^{Ni} \cdot \frac{\left[NO_{3}\right]}{K_{NO3}^{i} + \left[NO_{3}\right]} \cdot EXP\left(-\varphi^{i} \cdot NH_{4}\right) \\ \left. \left\{ \frac{\left[NH_{4}\right]}{K_{NH4}^{i} + \left[NH_{4}\right]} + \frac{\left[NO_{3}\right]}{K_{NO3}^{i} + \left[NO_{3}\right]} \cdot EXP\left(-\varphi^{i} \cdot NH_{4}\right) \right\} \end{bmatrix}$$

$$B_{19} = \begin{cases} [DO] \leq DO_6 & ; \quad \alpha_{14} \cdot EXP(\beta_{14} \cdot T)/h \times [NO_3] \\ [DO] > DO_6 & ; \quad 0 \end{cases}$$

DO₆: 脱窒が起こる DO 濃度

パラメーター	単 位	説明
α_{14}	1/日	最大脱窒速度
$oldsymbol{eta}_{14}$	1/°C	最大脱窒速度の温度係数
DO_6	mg/L	脱窒が起こる境界 DO 濃度

①溶存酸素:DO[mg-O₂/L]

$$\frac{d[DO]}{dt} = D_1 - D_2 - D_3 - D_4 - D_5 - D_6 - D_7 - D_8 + D_9$$

 D_1 : 光合成

 D_2 : 植物プランクトン呼吸 D_3 : 動物プランクトン呼吸

 D_4 : POC 無機化 D_5 : DOC 無機化

 D_6 : 硝化 $NH_4 \rightarrow NO_2$ D_7 : 硝化 $NO_2 \rightarrow NO_3$

 D_8 :底泥消費 D_9 :再曝気

$$D_1 = \sum_{i=1}^{NP} B_1^i \cdot [TOD : C_P]^i$$

$$D_2 = \sum_{i=1}^{NP} B_5^i \cdot [TOD : C_P]^i$$

$$D_3 = B_{10} \cdot [TOD : C_Z]$$

$$D_4 = B_{13} \cdot [TOD : C_{POC}]$$

$$D_5 = B_{16} \cdot [TOD:C_{DOC}]$$

$$D_6 = 3.43 B_{17}$$

$$D_7 = 1.14B_{18}$$

$$D_8 = \alpha_{15} \cdot \exp{\{\beta_{15}(T - T_B)\}}/h$$

$$D_9 = ka(DO_S - DO)/h_S$$

$$DO_S = \frac{32 \times \left(10.291 - 0.2809T + 0.006009T^2\right)}{22.4\left(1 + \frac{T}{273}\right)} ; 飽和溶存酸素$$

パラメーター	単 位	説 明
$(TOD: C_P)^i$	_	植物プランクトン種 i における TOD/CP
$(TOD:C_Z)$	_	動物プランクトンにおける TOD/Cz
$(TOD:C_{POC})$	_	TOD/C _{POC}
$(TOD:C_{DOC})$	_	TOD/C _{DOC}
$lpha_{15}$	g/m²/∃	T=T _B (℃)での酸素消費速度
$oldsymbol{eta}_{15}$	1/℃	T=T _B (℃)での酸素消費速度の温度係数
ka	m/∃	再曝気係数

⑭化学的酸素要求量:COD[mg-O2/L]

$$\frac{d[COD]}{dt} = \left(\sum_{i=1}^{NP} \frac{d[P^{i}]}{dt}\right) \cdot \left[COD : C_{P}\right]^{i} + \frac{d[Z]}{dt} \cdot \left[COD : C_{Z}\right] + \frac{d[POC]}{dt} \left[COD : C_{POC}\right] + \frac{d[COD]}{dt} \cdot \left[COD : C_{DOC}\right] + q_{POC} \left[COD : C_{POC}\right] + q_{doc} \left[COD : C_{DOC}\right]$$

<パラメーター>

パラメーター	単 位	説明
$(COD:C_P)$	_	COD/C _P
$(COD:C_Z)$	_	COD/Cz
$(COD:C_{POC})$	_	COD/C _{POC}
$(COD:C_{DOC})$	_	COD/C _{DOC}

頂クロロフィル-a:Chl-a[μg-Chl-a/L]

$$\frac{d[chl - a^i]}{dt} = \frac{d[P^i]}{dt}[chl - a: C_P]^i$$

植物プランクトン(炭素換算)に係数(Chl-a:C_P)を乗じる

表 2.3 各水質項目の変動要因別パラメーター整理表

	表 2.			要因別パフメーター <u>整</u> 埋表
水質項目	変動要因	本文	-ター記号 プログラム	説明
植物プラ	光合成	α_1^i	alpha1(i)	植 P 種 i における最大増殖速度(1/日)
ンクトン		$eta_{ m l}{}^i$	beta1(i)	植 P 種 i における光合成温度係数(1/°C)
		$(P_h:C_P)^i$	phcp(i)	植 P 種 i における P _h /C _P (mg-P/mg-C)
		$(N:C_P)^i$	tncp(i)	植 P 種 i における N/C _P (mg-N/mg-C)
		I_{OPT}^{i}	ropt(i)	植 P 種 i の最適日射量(MJ/m²)
		k_0	ecoeta	湖沼に固有な消散係数(1/m)
		k_S	etacp	Chl-a によって減衰する比例定数(1/m/(μg/L))
	細胞外分泌	(Chl-a :	chlcp(i)	植 P 炭素量を Chl-a(μg/L)に換算する係数
		$(C_P)^i$		(μg-Chl/mg-C)
	呼吸	α_2^i	alpha2(i)	植 P 種 i における呼吸速度(1/日)
		eta_2^i	beta2(i)	植 P 種 i における呼吸速度の温度係数(1/℃)
	動Pが摂食	α_3^i	alpha3(i)	植 P 種 i における摂食速度(1/日)
		$\beta_3{}^i$	beta3(i)	植 P 種 i における摂食速度の温度係数(1/℃)
		λ	6.3	Ivlev 定数(1/(mg-C/L))
		π^*	zpcp	動 P に摂食される植 P いき値(mg-C/L)
	枯死	m^i	cpdie(i)	植P種iにおける枯死速度の定数(1/(mg-C/L)/
				日)
	沈降	W_p	wcp(i)	植P種iにおける沈降速度(SQP,SQN共通)(m/
22 . /P /-	and the second	IID i	(2)	日)
リン 保 持 量	リン酸摂取	UP_{max}^{i}	upmax(i)	植 P 種 i におけるリンセルクオタの最大摂取速度(1/日)
		K_{P}^{i}	hpo4p(i)	植P種iにおけるリンセルクオタ摂取の半飽和
				定数(mg-P/L)
		PQP_{max}^{i}	pqpmax(i)	植 P 種 i における細胞内の最大リン保持量(一)
	光合成			「植物プランクトン;光合成」欄を参照
	動Pが摂食			「植物プランクトン;動 P が摂食」欄を参照
	枯死			「植物プランクトン;枯死」欄を参照
	沈降			「植物プランクトン;沈降」欄を参照
窒素保持 量	窒素摂取	UN_{max}^{i}	unmax(i)	植 P 種 i における窒素セルクオタの最大摂取 速度(1/日)
		K_{NH4}^{i}	hnh4n(i)	植P種iにおける窒素摂取に関するNH4の半
				飽和定数(mg-N/L)
		K_{NO3}^i	hno3n(i)	植P種iにおける窒素摂取に関するNO3の半
				飽和定数(mg-N/L)
		PQN_{max}^{i}	pqnmax(i)	細胞内の最大窒素保持量(—)
		φ^{i}	10.714	植P種iにおける硝酸塩の摂取に関するアン
				モニウム塩濃度による抑制効果(1/(mg-N/L))
	光合成			「植物プランクトン;光合成」欄を参照
	動Pが摂食			「植物プランクトン;動 P が摂食」欄を参照
	枯死		<u></u>	「植物プランクトン;枯死」欄を参照
	沈降			「植物プランクトン;沈降」欄を参照
動物プラ	植Pを摂食			「植物プランクトン;動 P が摂食」欄を参照
ンクトン	POC を摂食			摂食速度・温度係数・閾値は「植 P を摂食」と同 様
	排糞	e	ecz	動 P の同化効率(—)
	排泄	α_4	alpha4	動 P の代謝速度(1/日)
	⊅F1⊞	4		39.1 (1/ H)

水質項目	変動要因	パラメー	ター記号	説明
		β_4	beta4	動 P の代謝速度の温度係数(1/°C)
		η	czloss	摂食活動に伴うエネルギーの消費率(一)
	死亡	δ	czdie	動 P 自然死亡速度の定数(1/(mg-C/L)/日)
	日周鉛直移	W_{down}	wdown	動 P の日周鉛直移動最大下降速度(m/日)
	動	W_{up}	wup	動 P の日周鉛直移動最大上昇速度(m/日)
		a_{DL}	aDL	日長を規定する定数(日)
		b_{DL}	bDL	日長を規定する定数(日)
		day_{DLmax}	DLmaxday	日長を規定する定数(日)
懸濁態有	枯死	a a y DLmax	BEmarady	「植物プランクトン;枯死」欄を参照
機物	自然死亡			「動物プランクトン;死亡」欄を参照
1)32,1/2	排糞			「動物プランクトン;排糞」欄を参照
	動 P が摂食			「植物プランクトン;動 P が摂食」欄を参照
	細菌分解	α5	alpha5	POC の分解速度(1/日)
	加四刀刀	β_5	beta5	POC の分解速度の温度係数(1/°C)
		DO_0	do0	POC 分解の DO 半飽和定数(mg/L)
	八和人和唐	-		(0)
	分解余剰物	K	pocka	余剰物生成の割合(DOC への変換割合)(一)
# \m \\ / .	沈降	W_{POC}	wpoc	POC の沈降速度(m/日)
懸濁態有 機リン	枯死			「植物プランクトン;枯死,光合成(Ph/Cp)」欄を参照
	排糞			「植物プランクトン;動 P が摂食,光合成(Ph/Cp)」 欄を参照
	無機化	α_6	alpha6	POP の分解速度(1/日)
	,	β_6	beta6	POP の分解速度の温度係数(1/°C)
		DO_1	do1	POP 分解の DO 半飽和定数(mg/L)
	沈降	W_{OP}	wpop	POPの沈降速度(m/日)
懸濁態有	枯死		•	「植物プランクトン;枯死,光合成(N/C _P)」欄を参
機窒素	_			照
	排糞			「植物プランクトン;動 P が摂食,光合成(N/C _P)」 欄を参照
	無機化	α_7	alpha7	PON の分解速度(1/日)
		β_7	beta7	PON の分解速度の温度係数(1/℃)
		DO_2	do2	PON 分解の DO 半飽和定数(mg/L)
	沈降	W_{ON}	wpon	PON の沈降速度(m/日)
溶存有機	細胞外分泌			「植物プランクトン;細胞外分泌」欄を参照
物	分解余剰物			「懸濁態有機物;分解余剰物」欄を参照
	無機化	α_8	alpha8	DOC の無機化速度(1/日)
		β_8	beta8	DOC の無機化速度の温度係数(1/℃)
		DO_3	do3	DOC 無機化の DO 半飽和定数(mg/L)
溶存態リ	SQP が摂取			「リン保持量;リン酸摂取」欄を参照
ン酸塩	呼吸			「植物プランクトン;呼吸,光合成(Ph/Cp)」欄を参照
	無機化			「懸濁態有機リン;無機化」欄を参照
	摂食時の放出			「植物プランクトン;動 P が摂食」欄を参照
	枯死時の放			「植物プランクトン;枯死」欄を参照
	出			

水質項目	変動要因	パラメー	ター記号	説明
	細胞外分泌			「植物プランクトン;細胞外分泌,光合成(Ph/Cp)」 欄を参照
	底泥溶出	A 9	alpha9	d-PO ₄ -P 溶出量(g/m²/日)
		β_9	beta9	d-PO ₄ -P 溶出量の温度係数(1/℃)
		γ_P	po4do	d-PO ₄ -P 溶出の DO 依存率(1/(mg/L))
	分解余剰	α_{10}	alpha10	P-PO ₄ -P の分解速度(1/日)
		β_{10}	beta10	P-PO ₄ -P の分解速度の温度係数(1/℃)
懸濁態リ	分解余剰			「溶存態リン酸塩;分解余剰」欄を参照
ン酸塩	沈降	W_{P-PO4}	wppo4	P-PO ₄ -P の沈降速度(m/日)
アンモニ	SQN が摂取			「窒素保持量;窒素摂取」欄を参照
ア態窒素	呼吸			「植物プランクトン;呼吸,光合成(N/C _P)」欄を参
				照
	無機化			「懸濁態有機窒素;無機化」欄を参照
	摂食時の放 出			「植物プランクトン;動 P が摂食」欄を参照
	枯死時の放 出			「植物プランクトン;枯死」欄を参照
	細胞外分泌			「植物プランクトン;細胞外分泌,光合成(N/C _P)」 欄を参照
	底泥溶出	α_{11}	alpha11	NH ₄ 溶出量(g/m²/日)
		β_{11}	beta11	NH ₄ 溶出量の温度係数(1/℃)
		γN	tnh4do	NH ₄ 溶出の DO 依存率(1/(mg/L))
	硝化	α_{12}	alpha12	NH4の硝化速度(1/日)
	$NH_4 \rightarrow NO_2$	β_{12}	beta12	NH₄の硝化速度の温度係数(1/℃)
		DO_4	do4	NH4硝化の DO 半飽和定数(mg/L)
亜硝酸態 窒素	硝化 NH4→NO2		l	「アンモニア態窒素;硝化 NH ₄ →NO ₂ 」欄を参照
	硝化	α_{13}	alpha13	NO ₂ の硝化速度(1/日)
	$NO_2 \rightarrow NO_3$	β_{13}	beta13	NO₂の硝化速度の温度係数(1/°C)
		DO_5	do5	NO2硝化のDO半飽和定数(mg/L)
硝酸態窒	SQN が摂取		l .	「窒素保持量;窒素摂取」欄を参照
素	硝化 NO ₂ →NO ₃			「亜硝酸態窒素;硝化 NO2→NO3」欄を参照
	脱窒	α_{14}	alpha14	最大脱窒速度(1/日)
		β_{14}	beta14	最大脱窒速度の温度係数(1/°C)
		DO_6	do6	脱窒が起こる境界 DO 濃度(mg/L)
溶存酸素	光合成・呼 吸	$(TOD : C_P)^i$	todcp(i)	植 P 種 i における TOD/C _P (mg-O ₂ /mg-C)
	排泄	(<i>TOD</i> : <i>C_Z</i>)	todcz	動 P における TOD/C _Z (mg-O ₂ /mg-C)
	POC 無機化	$(TOD:C_P \ oc)$	todepoe	TOD/C _{POC} (mg-O ₂ /mg-C)
	DOC 無機化	$(TOD:C_D \ oc)$	todedoe	TOD/C _{DOC} (mg-O ₂ /mg-C)
	硝化 NH4→NO2	/		「アンモニア態窒素;硝化 NH₄→NO₂」欄を参照
	硝化 NO ₂ →NO ₃			「亜硝酸態窒素;硝化 NO₂→NO₃」欄を参照

1		0	·	~V wn
水質項目	変動要因	パラメー	ター記号	説明
	底泥消費	α_{15}	alpha15	T=TB(℃)での酸素消費速度(g/m²/日)
		eta_{15}	beta15	T=TB(°C)での酸素消費度の温度係数(1/°C)
	再曝気	ka	ddka	再曝気係数(mg/m²/日*(m³/L))
化学的酸 素要求量	植P変動	$(COD : C_P)^i$	codcp(i)	COD/C _P (mg-O ₂ /mg-C)
	動P変動	$(COD : C_Z)$	codcz	COD/C _Z (mg-O ₂ /mg-C)
	POC 変動	$(COD:C_P \ oc)$	codepoe	COD/C _{POC} (mg-O ₂ /mg-C)
	DOC 変動	$(COD:C_D$ $oc)$	codcdoc	COD/C _{DOC} (mg-O ₂ /mg-C)
クロロフィ	植P変動			「植物プランクトン;細胞外分泌」欄を参照
ル-a				

※植 P: 植物プランクトン 動 P: 動物プランクトン

表 3.7 生態系モデルパラメーターの設定範囲

水質	変動要因	/١	ラメーター			文献値				
項目	変 期 安 囚	項目	記号	単位	HANDBOOK	湖沼工学	援用モデル	公害研究所報告	設定値	
		最大増殖速度	$\alpha_1{}^i$	1/日	0.41~3.14	0.32~3.9	2.19~2.36	0.45~2.5	0.32~3.9	
		最適(基準)温度	T_{smp1}	°C	実験値があればその わせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	とし、これに他のパ	ラメーターも合	
		温度係数	$\theta_1{}^i$	_		1.02~1.06	$1.065 \sim 1.089$	1.04~1.10	1.02~1.10	
		温度係数	ζ_1^i	_		1~3		_	1~3	
	光合成	P _h /C _P	$(P_h:C_P)^i$	mg-P/mg-C	0.00389	_	0.0062	0.0002~0.0080	0.0002~ 0.0080	
		N/C _P	$(N:C_P)^i$	mg-N/mg-C	0.0787~0.102	_	0.063	0.0014~0.0540	0.0014~ 0.063	
植物プ		最適日射量	I_{OPT}^i	MJ/m^2	12.56~14.65	12.56~14.65	2.09~11.30	_	2.09~14.65	
ランクト		消散係数	K_0	1/m	_	_	0.22~0.86	0.72~1.1	0.22~1.1	
ン		Chl-a の比例定数	k_S	1/m/(μg/L)	_	_	0.023~0.090	0.020~0.028	0.020~0.090	
	細胞外分泌	Chl-a/C	$(Chl$ - $a:$ $C_P)^i$	μg-Chl/mg- C	3.5~45.5	20.4~43.4	22.9~30	_	3.5~45.5	
		呼吸速度	α_2^i	1/日	0.005~0.17	_	0.078~0.237	0.01~0.6	0.005~0.6	
	呼吸	基準温度	T_{smp2}	°C	実験値があればそ <i>0</i> わせる。	D温度を設定する。 実験	検値が無い場合は20°	Cとし、これに他のハ	ペラメーターも合	
		温度係数	$ heta_2{}^i$	_	_	_	1.027~1.087	1.062~1.082	1.027~1.087	
	枯死	枯死速度の定数	m^i	1/(mg-C/L)/ 日	_	_	0.08~0.5	0.004~0.012	0.004~0.5	
	沈降	沈降速度 (SQP,SQN 共通)	W_p	m/∃	0.1~1.0	0.0~0.5	0.1~0.5	_	0~1.0	
リン保		最大摂取速度	UP_{max}^{i}	1/日	_	_	24~36	1.2~53.3	1.2~53.3	
持量	リン酸摂取	半飽和定数	$K_{P}{}^{i}$	mg-P/L	_	_	0.0003~0.031	0.0186~0.45	0.0003~0.45	
打里		最大リン保持量	PQP_{max}^{i}	_			16	10~16	10~16	
		最大摂取速度	UN_{max}^{i}	1/日			12	0.48~24	0.48~24	
室素保	室素摂取	NH4 の半飽和定 数	$K_{NH4}{}^i$	mg-N/L	0.0014~0.105	_	0.003~0.028	0.0105~0.41	0.003~0.41	
持量	至米1以収	NO3の半飽和定 数	K_{NO3}^i	mg-N/L	0.0014~0.98	_	0.005~0.014	0.0014~0.98	0.0014~0.98	
		最大窒素保持量	PQN_{max}^{i}	_	_	_	8	4~8	4~8	

水質	変動要因	パ	ペラメーター			文献	値		標準
		アンモニウム塩濃 度による抑制効 果	$arphi^i$	1/(mg-N/L)	_	1	1462.00~1879.71	_	1462.00~ 1879.71
		項目	記号	単位	HANDBOOK	湖沼工学	援用モデル	公害研究所報告	
		摂食速度	α_3^i	1/日	_		0.58~0.76	0.1~5.0	0.1~5.0
		基準温度	T_{smp3}	°C	実験値があればそのわせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は 20℃	とし、これに他のパラ	ラメーターも合
	植Pの摂食	温度係数	θ_3	_	_	_	1.072	1.020~1.127	1.020~1.127
		Ivlev 定数	λ	1/(mg-C/L)	_	_	0.4~36.7	8.2	0.4~36.7
		植Pいき値	π^*	mg-C/L	_		0	0.016~0.5	0~0.5
	排糞	同化効率	e	_	0.106~1.0		0.7	0.4~0.8	0.106~1.0
		代謝速度	$lpha_4$	1/目	_		0.0765	_	0.0765
動物プ ランクト	排泄	基準温度	T_{smp4}	°C	実験値があればその わせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は 20℃	とし、これに他のパラ	ラメーターも合
ン		温度係数	$ heta_4$	_	_	_	1.066	_	1.066
		エネルギーの消 費率	η	_	_	_	0.3~0.5	_	0.3~0.5
	死亡	速度の定数	δ	1/(mg-C/L)/ 目	_	_	0.586~6.0	_	0.586~6.0
		最大下降速度	W_{down}	m/ ∃	33.6~936			_	33.6~936
	日周鉛直移	最大上昇速度	W_{up}	m/ ∃	33.6~936	_	_	_	33.6~936
	動	日長の定数	a_{DL}	日					
	#/	日長の定数	b_{DL}	日		日の出・日の入り時刻ラ	データを用いて回帰分	析により設定。	
		日長の定数	day_{DLmax}	日					
		分解速度	α_5	1/日	_	0.03~0.1	0.004~0.051	_	$0.004 \sim 0.1$
	細菌分解	基準温度	T_{smp5}	°C	実験値があればその わせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は 20℃	とし、これに他のパラ	ラメーターも合
懸濁態		温度係数	θ_5	_	_	1.02~1.073	1.072~1.073	_	1.072~1.073
有機物		DO 半飽和定数	DO_0	mg/L	_		0~0.5	_	0~0.5
	分解余剰物	余剰物生成の割 合	К	_	_	_	0.25	_	0.25
	沈降	沈降速度	W_{POC}	m/ ∃	<u> </u>	0.0019~0.2	約 1.0	_	0.0019~0.2
懸濁態	無機化	分解速度	α_6	1/目	_	0.01~0.1	_	0.01~0.05	0.01~0.1

水質	変動要因	バ	ペラメーター			文献	 値		標準
有機リン		基準温度	T_{smp6}	°C	実験値があればその わせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	とし、これに他のパラ	ラメーターも合
		温度係数	$ heta_6$	_	_	1.072	_	1.072	1.072
		DO 半飽和定数	DO_1	mg/L	_	_	_	_	0~0.5
	沈降	沈降速度	W_{OP}	m/∃	_	0.013~0.3	_	植物プランクトン の沈降速度 ×0.58	0.01~0.3
		分解速度	α_7	1/日	_	0.035~0.1	_	0.01~0.1	$0.01 \sim 0.1$
懸濁態	無機化	基準温度	T_{smp7}	°C	実験値があればそのわせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	とし、これに他のパラ	ラメーターも合
有機室		温度係数	θ_7	_	_	1.072	_	1.072	1.072
月 (放至 素		DO 半飽和定数	DO_2	mg/L	_	_	_	_	0~0.5
术	沈降	沈降速度	W_{ON}	m/ 目	_	0.01~0.6	_	植物プランクトン の沈降速度 ×0.75	0.01~0.6
		無機化速度	α_8	1/日	_	0.04~0.4	0.004~0.040	0.0007	0.0007~0.4
溶存有機物	無機化	基準温度	T_{smp8}	°C	実験値があればそのわせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は 20℃	とし、これに他のパラ	ラメーターも合
(茂代)		温度係数	$ heta_8$	_	_	_	1.072	1.050	1.072
		項目	記号	単位	HANDBOOK	湖沼工学	援用モデル	公害研究所報告	
345 A-46		溶出量	$lpha_9$	g/m²/∃	_	0.010~0.154	0.002~0.012	0.00035~0.0065	$0.00035 \sim 0.154$
溶存態 リン酸 塩	底泥溶出	基準温度	T_{smp9}	°C	実験値があればその わせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	ことし、これに他のパラ	ラメーターも合
温		温度係数	$ heta_9$	_	_	_	1.072~1.145	_	$1.072 \sim 1.145$
		DO 依存率	γ_P	1/(mg/L)	-	0.46	-	_	0.46
		可溶化速度	$lpha_{10}$	1/日	_	_	_	_	_
懸濁 態リン	可溶化	基準温度	T_{smp10}	°C	実験値があればその わせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は 20℃	Cとし、これに他のパラ 	ラメーターも合
酸塩		温度係数	$ heta_{10}$	_	_	_	_	_	_
	沈降	沈降速度	$W_{P\text{-}PO4}$	m/ ∃	_	_	_	_	_
アンモ	底泥溶出	溶出量	$lpha_{11}$	g/m²/ 日	_	0.019~0.360	0.04~0.192	0.0012~0.0223	0.0012~ 0.360

水質	変動要因	<i>'</i>	ペラメーター			文献			標準
ニア態 窒素		基準温度	T_{smp11}	°C	実験値があればそのわせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	とし、これに他のパ	ラメーターも合
		温度係数	θ_{11}	_	_		$1.040 \sim 1.072$	1.063~1.117	1.040~1.117
		DO 依存率	γN	1/(mg/L)	_	0.46	_	_	0.46
		硝化速度	α_{12}	1/目	_	_	$0.012 \sim 0.14$	$0.03 \sim 0.07$	$0.012 \sim 0.14$
	硝化 NH4→NO2	基準温度	T_{smp12}	°C	実験値があればそのわせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	とし、これに他のパ	ラメーターも合
	NH4→NO2	温度係数	θ_{12}	_	_	_	1.072	1.020~1.050	1.020~1.072
		DO 半飽和定数	DO_4	mg/L	_	_	0.5	_	0.5~2.0
		硝化速度	α_{13}	1/目	_	_	0.014~0.42	0.09~0.5	0.014~0.5
亜硝酸 態窒素	硝化 NO2→NO3	基準温度	T_{smp13}	°C	実験値があればそのわせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	とし、これに他のパ	ラメーターも合
忠全杀	NO2→NO3	温度係数	θ_{13}	_	_	_	1.072	1.020~1.050	1.020~1.072
		DO 半飽和定数	DO_5	mg/L	_	_	0.5	_	0.5~2.0
		最大脱窒速度	α_{14}	1/日	_	_	1.55×10 ⁻³	_	1.55×10 ⁻³
硝酸態 窒素	脱窒	基準温度	T_{smp14}	°C	実験値があればそのわせる。	温度を設定する。実験	値が無い場合は20℃	とし、これに他のパ	ラメーターも合
至糸		温度係数	θ_{14}	_	_		0.1353	_	0.1353
		境界 DO 濃度	DO_6	mg/L	_		2.5	_	2.5
	光合成•呼 吸	TOD/C _P	$(TOD: C_P)^i$	mg-O ₂ /mg-C					
	排泄	TOD/C_Z	$(TOD:C_Z)$	mg-O ₂ /mg-C	· ·	が m:n:1 のとき			
	POC 無機化	TOD/C _{POC}	$(TOD:C_{POC})$	mg-O ₂ /mg-C	TOD/C=32(m- を用いて設定	+2n)/12m (重量比) する。			
溶存酸	DOC 無機化	TOD/C _{DOC}	$(TOD:C_{DOC})$	mg-O ₂ /mg-C					
素		酸素消費速度	α_{15}	g/m²/ ∃	0~7.0		1.6~5.2	_	0~7.0
	底泥消費	基準温度	T_{smp15}	°C	実験値があればその わせる。)温度を設定する。実際	険値が無い場合は20°	Cとし、これに他のノ	ペラメーターも合
		温度係数	θ_{15}	_	_		1.072	_	1.072
	再曝気	再曝気係数	ka	mg/m²/日 *(m³/L)	_	_	_	_	0.1~1.0 (従来モデル の設定範囲)

水質	変動要因	パラメーター			文献値	標準
	植P変動	COD/C _P	$(COD: C_P)^i$	mg-O ₂ /mg-C		
化学的	動P変動	COD/C _Z	$(COD:C_Z)$	mg-O ₂ /mg-C	$COD/C = 1/2.26 \times TOD/C$	
酸素要 求量	POC 変動	COD/C _{POC}	(COD:C _{PO}	mg-O ₂ /mg-C	を用いて設定する	
	DOC 変動	COD/C _{DOC}	(COD:C _{DO}	mg-O ₂ /mg-C		

※"-": 文献から値を設定できないパラメーター

4-3-2. 鉛直一次元モデルの例

鉛直一次元モデルの一般的な構築例としての一例を次ページより示す。

【参考文献】

1) 土木研究所資料: 貯水池の冷濁水並びに富栄養化現象の数値解析モデル (その 1), 昭和62年3月,建設省土木研究所 ダム部水資源開発研究室

7. 鉛直一次元モデル

前章までに紹介した貯水池水質解析モデル(ボックスモデル)は、貯水池を水深方向に二~四層に分割した簡易なモデルであり、入力パラメータが少ないためモデルの同定及び貯水池水質予測が比較的容易で、また計算時間もあまり要しないという利点がある。しかしながら、これらのモデルでは、モデル構造上貯水池内の水質挙動(主として水深方向)を細部にわたって表現できないため、冷濁水、富栄養化問題解決への貯水池運用面からの対策検討として、取水・放流口位置の貯水池内水質、放流水質への影響・効果を評価することなどへの適用には限界がある。

そこで、本章では水平方向は一様と考え、水深方向に任意の厚さでコントロール・ボリューム分割することによりボックスモデルに比して水深方向での水質挙動を詳細に表現し得る鉛直一次元モデルについてその概要を述べる。

7.1 モデルの概要

貯水池水質予測モデルは、貯水池内水質変化の擬似構造を数学式で表現し、数値解析を行うことにより、その時空間分布を把握しようとするものである。このような貯水池水質の解析には、水理解析の一般的基礎概念である流体力学原理を基にした数学モデルを用いることになる。この基礎原理は、1)質量保存則、2)運動量保存則、3)エネルギー保存則、から成るわけであるが、数値計算の簡略化のために運動量保存則は適用せず、流れの分布は Craya の選択取水公式¹⁾等を用いて与えることにする。また、数値計算においては、対象とする現象の時間的・空間的一様性やスケールに応じて適当な大きさの時間・空間内のものに変換する必要がある。そこで、貯水池内の水温・水質変化は流下方向に比して水深方向が卓越すると仮定し、図ー7.1 に示すように、水深方向に層分割した安芸・白砂²⁾らの鉛直一次元モデルを用いることにすれば、図一7.2 に示す貯水池各層内部における水質の変化過程を考慮した上で、貯水池水質解析のための数学モデルは以下のように表せる^{3),4)}。

(1) 非圧縮性流体の連続式

$$\frac{\partial (vA)}{\partial t} = (u_i - u_0) \cdot B \quad (7.1)$$

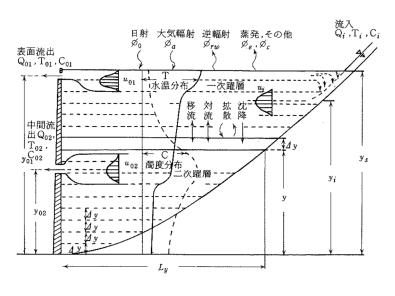
(2) 水温収支式

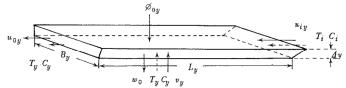
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{B}{A} (u_i T_i - u_0 T) - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A \cdot T) + \frac{(\alpha + D)}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(A \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho \cdot Cw \cdot A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\phi A) \quad (7.2)$$

(3) 濁度収支式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{B}{A} (u_i C_i - u_i C) - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A \cdot C) + \frac{(\alpha + D)}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (A \cdot \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (w_c \cdot A \cdot C) \quad (7.3)$$

(4) 水質の濃度収支式





ここに、 T_y :標高yの水温 T_i' :標高yの流入水温

Cy: 標高 y の濃度 Ci': 標高 y の流入水濃度

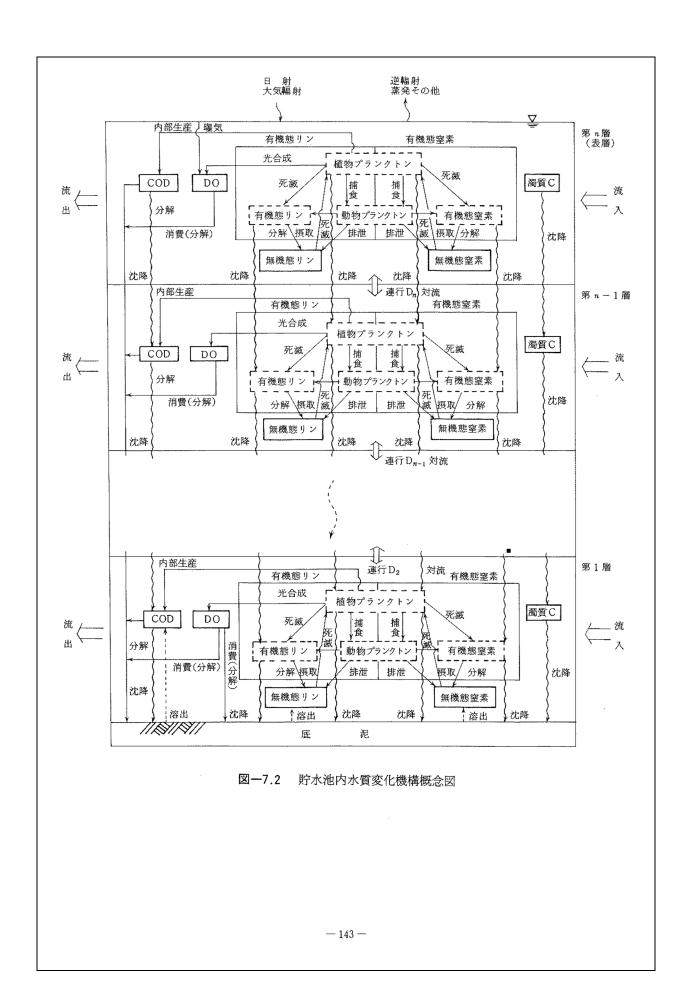
 u_{iy} : 標高 y の流入水の水平方向流速 A_y : 標高 y の貯水池平面積 u_{0y} : 標高 y の流出水の水平方向流速 B_y : 標高 y の貯水池平均幅

 v_y : 標高 y の鉛直方向流速 ϕ_y : 標高 y に達する輻射熱

 w_0 : 懸濁粒子の沈降速度 α : 分子拡散係数 Q_{vy} : 標高 y の鉛直方向の流量 D: 渦動拡散係数

 q_{iy} :標高 y の水平方向の流入量 ho: 水の密度 q_{0y} :標高 y の水平方向流出量 rho: 水の比熱 rho: 標高 rho における貯水池長 rho: 時間

図-7.1 鉛直一次元モデル概念図



$$\frac{\partial X}{\partial t} = F(X) + V_0(X) + S(X) \qquad (7.4)$$

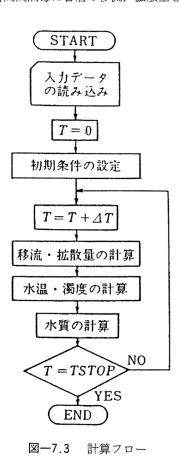
$$F(X) = \frac{B}{A}(u_i X_i - u_0 X) - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial A}(v \cdot A \cdot X) + \frac{(\alpha + D)}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial v} \left(A \cdot \frac{\partial X}{\partial v}\right) \dots (7.5)$$

$$V_0(X) = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (w_X \cdot A \cdot X) \tag{7.6}$$

ここに、v;鉛直方向流速、 u_i ;流入水の水平方向流速、 u_0 ;流出水の水平方向流速、y;標高、A;貯水池面積、B;貯水池平均幅、T;水温、 T_i ;流入水温、 ρ ;水の密度、 C_w ;水の比熱、 ϕ ;輻射熱、C;濁度、 C_i ;流入濁度、 w_c ;濁質の沈降速度、X;水質濃度、 X_i ;流入水質濃度、 w_X ;水質濃度、 w_X ;水質の沈降速度、 α ;分子拡散係数、D;渦動拡散係数、t;時間、F(X);移流・拡散項、 $V_0(X)$;沈降項、S(X);生化学的生産・消費項 である。

このうち、水質の生化学的生産・済費項 S(X)については、四層モデルと同様に表-7.1 に示す 8 項目を水質因子とし、それら相互間の変化過程を図-7.2 に従って数式化した。なお、採用した水質指標ならびに沈降を考慮した項目も四層モデルと同様とした。

上記の基礎式に基づいて数値計算を行うに際しては,以下に示す条件等を考慮し,図-7.3の計算フローに 従って実施する。その概要は、計算時間間隔毎に各層の移流,拡散量を計算し、その結果を用いて水温、濁



-- 144 ---

表-7.1 モデル式 (生化学的生産・消費項)

$$S(PP) = (G_P - D_P - G_Z) \cdot PP$$
増殖 呼吸(死滅) 捕食
 $G_P = \beta S \cdot K \cdot T_S \left\{ \frac{T}{T_S} \exp\left(1 - \frac{T}{T_S}\right) \right\}^3 \frac{I_y}{I_S} \exp\left(1 - \frac{I_y}{I_S}\right) \cdot \frac{IN}{K_{IN} + IN} \cdot \frac{IP}{K_{IP} + IP}$
 $D_P = R_{PP} \cdot \theta_{PP}^{T-20}$
 $G_Z = R_\theta \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + PP} \cdot ZP$
 $S(ZP) = a \cdot a_z \cdot B_z \cdot PP - R_z \cdot \theta_z^{T-20} \cdot ZP$
増殖 死滅
 $S(DO) = K_1(\overline{DO} - DO) + K_2 \cdot \theta_{DO}^{T-20} \cdot PP - K_3 \cdot COD - r \cdot \frac{A_B}{V}$
再職策 (表層のみ) る DO 生産 よる DO 消費
 $S(COD) = K_F \cdot G_P \cdot PP - R_C \cdot \theta_C^{T-20} \cdot COD + R_{WC} \cdot \theta_{WC}^{T-20} \cdot \frac{A_B}{V}$
内部生産 $f(E_B) \cdot f(E_B) \cdot f(E_B) \cdot f(E_B)$
 $f(E_B) \cdot f(E_B) \cdot f(E_B)$

こさに

 PP
 : クロロフィル a 濃度

 ZP
 : 炭素濃度

 DO
 : 飽和溶存酸素濃度

 COD
 : 溶存酸素濃度

 IP : 無機態リン濃度 IN : 無機態窒素濃度 OP : 有機態窒素濃度 ON : 有機態窒素濃度 A_B : 底RB COD: COD 濃度 I_y : 標高 y における日射量 $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ を I_0 : 水表面の日射量 $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に I_y : 大表面の日射量 $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に I_y : 大表面の日射量 $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に I_y : 大表面の日射量 $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に I_y : 大表面の日射量 $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に I_y : 大表面の日射量 $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に I_y : 大表面の目前を $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に I_y : 大表面の目前を $I_y = I_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\}$ と に $I_y = I_0 \exp\{$

ys : 水表面標高 $\eta = 0.5 + 0.001 \cdot PP$

表-7.2 パラメータ覧表(生化学的生産・消費項)

区分	パラメータ	説明
植	β_s	動物プランクトン増殖のスペース効果係数 $eta_s = \exp(-eta_{si} \cdot PP)$
物プ	K	植物プランクトン増殖によるクロロフィル a 生成率
フン	T_s	植物プランクトンの最大増殖率を与える最適水温
クト	Į _s	植物プランクトンの最大増殖率を与える最適日射量
植物プランクトンの増殖	K_{IN}	無機態窒素に関する半飽和定数
殖	K_{IP}	無機態リンに関する半飽和定数
植ンの物ク死	R_{PP}	20°C における植物プランクトンの呼吸によるクロロフィル a 消滅率
物ク死 プト滅 ラン	θ_{PP}	クロロフィルa消滅率に対する温度係数
動ンの	R_g	動物プランクトンろ過率
物ク増 プト殖	az	動物プランクトンの同化率
ラン	K_{PP}	クロロフィルaに関する半飽和定数
動ンの 物ク死 プト滅	R_z	20°C における動物プランクトンの呼吸による動物プランクトンの消滅率
プト滅 ラン	θ_Z	動物プランクトンの呼吸による動物プランクトンの消滅率に対する温度係数
D	K1	再曝気係数
O 生産	K_2	20°C における光合成による DO 生産率
産	θ_{DO}	光合成による DO 生産率に対する温度係数
D	K ₃	COD 物質による DO 消費率
消費	r	底泥による DO 消費率
	R_c	20°C のときの COD 分解率
分	θ_c	COD 分解率に対する温度係数
/3	R_P	20°C のときの有機態リンから無機態リンへの変換率
解	θ_P	有機態リンから無機態リンへの変換率に対する温度係数
771-	R_N	20°C のときの有機態窒素から無機態窒素への変換率
	θ_N	有機態窒素から無機態窒素への変換率に対する温度係数
	Rwc	COD の底泥からの溶出率
	<i>Ө</i> wc	COD の底泥からの溶出率に対する温度係数
溶	R_{WP}	底泥中のリン含有量
	f_D	溶存酸素の存在によるリンの溶出率減少を表わす補正係数
出	θ_{WP}	無機態リンの底泥からの溶出率に対する温度係数
	Rwn	無機態窒素の底泥からの溶出率
	θwn	無機態窒素の底泥からの溶出率に対する温度係数
	α	植物プランクトン中の炭素量とクロロフィルa量の比
亦	K_P	植物プランクトン中の COD 物質量とクロロフィル a 量の比
変換率	β_P	植物プランクトン中のリン量とクロロフィルa量比
T	β_N	植物プランクトン中の窒素量とクロロフィルa量比
	ΥP	植物プランクトン中のリン量と炭素量比
	r _N	植物プランクトン中の窒素量と炭素量比

度,各水質の計算を行うものである。なお,計算に際し,表-7.2 に示す生化学的生産・消費項のパラメータ 値及び初期条件,境界条件は適用する貯水池毎に適切に設定する必要がある。

(1) 貯水池のコントロールボリューム分割 (層分割)

表層以外の各層厚は時間的に不変であるが,表層厚 Δy_s は水位変動に応じて変化する。従って,表層の計算において表層厚が極端に薄くなると計算値が時間的に振動するおそれがあるため,便宜的に, $\Delta y_s \le \Delta y/4$ (Δy ;分割層厚=2 m)となった場合には表層とその下の一層とを混合させ,この層を新たな表層として計算を続けるものとした。また,水位が上昇して $\Delta y_s > 5\Delta y/4$ となった場合には Δy を越える部分を新たな表層とし,中間層を一層増し計算を行う。

(2) 計算時間間隔の判定

計算時間間隔 Δt は次の安定条件及び入力条件の時間間隔のうち小さい方を Δt とした。

$$\Delta t = Min\left(\frac{\Delta y^2}{2D}, \frac{\Delta y}{v_m}, \frac{\Delta y}{w_m}, \Delta t_0\right) \tag{7.7}$$

ここに、 Δy ;分割層厚,D;渦動拡散係数, v_m ;時刻 t における鉛直流速の絶対値の最大値, w_m ;時刻 t における沈降速度の最大値, Δt_0 ;時刻 t における与えられた入力条件の時間差分

(3) 流出による流れ

流出による流れは貯水池内の鉛直方向密度勾配によってその流動範囲が制約され、流出口の標高によって表層流、中間流及び底層流を形成する。流出水の流速分布及び流動層厚は次式で与えられる。

$$u_{0y} = u_{0\text{max}} \exp\left\{-\frac{(y - y_{out})^2}{2\sigma_0^2}\right\}$$
 (7.8)

$$\delta_0 = G^{-1/3} \left(\frac{Q_0}{\theta \sqrt{g \varepsilon_0}} \right)^{1/3} \tag{7.9}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho_0 - \rho_y}{\rho_{Dy}} \qquad (7.11)$$

$$u_{\text{omax}} = \frac{Q_0}{\int_{yout - \frac{\delta_0}{2}}^{yout + \frac{\delta_0}{2}} \exp\left\{-\frac{(y - y_{out})^2}{2\sigma_0^2}\right\} By dy}$$
(7.12)

ここに、 uomax:y=yout の流速

yout:流出口中心線の標高

σω:流速分布の標準偏差

δ。: 流出層の鉛直方向厚さ (流動層厚)

G:日野・大西 5 の無次元数 (軸対称流の内部フルード数),Gの値は白砂の実験 6 により次のように与えられている。表層,底層流出 G=0.324,中層流出 G=0.134

Q。:流出流量

heta:流出口開口角(ラジアン),鉛直,平板なダム上流面に開口する場合は $heta=\pi$

g:重力加速度

 ϵ_0 :密度勾配

ρ₀:流出点の密度

 ρ_y :流出点より鉛直方向にy離れた点の密度

(4) 流入による流れ

流入水の貯水池流入部における表層水との混合及びその後の密度流としての貯水池深部への流入過程については次のように考える^{7),8)}。

流入水は表層水を連行係数rで連行する。すなわち、

$$Q'_{i} = (1+r)Q_{i}$$
 (7.13)

$$T'_{i} = \frac{T_{i} + rT_{m}}{1 + r} \tag{7.14}$$

$$C'_{i} = \frac{C_{i} + rC_{m}}{1 + r} \tag{7.15}$$

ここに、 r:連行係数 (0.5~1.0)

Qi:流入流量('は連行後)

T_i:流入水温 ('は連行後)

Ci:流入濃度('は連行後)

Tm:表層付近で連行される水の平均水温

Cm:表層付近で連行される水の平均濃度

$$u_{iy} = u_{i\max} \exp\left\{-\frac{(y - y_{in})^2}{2\sigma_i^2}\right\}$$
 (7.16)

$$d = \sqrt{\frac{Q_i'}{By_{in}F_i\sqrt{g\varepsilon_i}}} \qquad (7.17)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\rho_{in} - \rho_s}{\rho_{in}(y_s - y_{in})} \tag{7.19}$$

$$u_{i\max} = \frac{Q_{i'}}{\int_{y_{in} - \frac{d}{2}}^{y^{in} + \frac{d}{2}} \exp\left\{-\frac{(y - y_{in})^{2}}{2\sigma_{i}^{2}}\right\} By dy}$$
 (7.20)

ここに、 u_{imax} :標高 y_{in} の流入流速

yin:流入水中心線の標高

d:流入層の鉛直方向厚さ

 F_i : 内部フルード数, 流入水は F_i =0.25 となるような形で流入することが観測されている。

 By_{in} :標高 y_{in} の貯水池幅

σί:流速分布の標準偏差

 ε_i :密度勾配

 ho_{in} :流入水及び標高 y_{in} の貯水池水の密度

ρε:表層水の密度

ys:水面の標高

(5) 鉛直方向の流れ

鉛直方向の移流流速 v_{y} は連続式(7.1)を積分して次式で与えられる。

$$v_y = \frac{1}{A_y} \int_{y=y_b}^y (u_{iy} - u_{0y}) B_y dy \qquad (7.21)$$

ここに, yb:貯水池底の標高

(6) 日射による輻射熱

日射による輻射熱 ϕ s は水面の反射によって ϕ o となって貯水池内に伝達されていくが、このうち半分程が表面で吸収され、残りが指数関数的に減衰しながら深部に到達する。

$$\phi_0 = (1 - a_\tau)\phi_s \qquad (7.22)$$

$$\phi_y = (1 - \beta)\phi_0 \exp\{-\eta(y_s + y)\} \quad \dots \tag{7.23}$$

ここに, ar: 水面反射率=0.06

. φ_y:標高 y に到達する輻射熱

 β :水面吸収率=0.5

η:減衰係数

 ϕ_s :日射量

φ。: 水面反射を差引いた日射量

(7) 水面からの熱損失

大気との熱の授受の影響範囲は日射を除いては表層の極く薄い層に限られる。したがって、大気輻射、 逆輻射及び蒸発については表層のみについて考慮すれば良い。

水面からの熱損失は、次式で与えられる。

$$\phi_L = \phi_e + \phi_c + \phi_{ra} \qquad (7.24)$$

ここに、 ϕ_L : 貯水池表面からの熱損失

φe:蒸発による熱損失

φc:伝導による熱損失

 $\phi_{ra} = \phi_{rw} - \phi_a$:有効逆輻射

 ϕ_a :大気輻射

 ϕ_{rw} : 逆輻射

各熱損失には実験,実測に基づく種々の公式が提案されているが,ここでは次の諸式を使用する 9 。 Rohwer の式

$$\phi_e + \phi_c = (0.000308 + 0.000185 W) \rho(e_s - \psi e_a) \times \left\{ L_v + CT_s + \frac{269.1(T_s - T_a)}{(e_s - \psi e_a)} \right\} \quad \dots \tag{7.25}$$

ここに、 $\phi_e + \phi_c$ の単位: $kcal/m^2 \cdot day$

W: 風速 (水面上 15 cm), m/sec

 e_s :表面水温に相当する飽和蒸気圧, $mmHg = 4.58 \times e^{(0.0633 \times T_s)}$

 e_a :気温に相当する飽和蒸気圧, $mmHg = 4.58 \times e^{(0.0633 \times T_a)}$

 ϕ :相対湿度

Lv:蒸発の潜熱, kcal/kg

C:比熱, kcal/kg⋅°C

 T_s :表面水温,°C

Ta:気温,°C

Swinbank の式

$$\phi_{\tau a} = 0.97k\{T_W^4 - 0.937 \times 10^{-5} T_A^6 (1.0 + 0.17C^2)\}$$
 (7.26)

ここに、 k: Stefan Bolzman 常数 =1.171×10-6kcal/m²·day, K

 T_w :表面水温, °K (絶対温度)

 T_A : 気温, °K (絶対温度)

C:雲量

(8) 貯水池水の密度

貯水池水の密度は水温により概ね求められ、次式で与えられる。

$$\rho_y = a \cdot T_y^3 + b \cdot T_y^2 + C \cdot T_y + d \qquad (7.27)$$

ここに、 ρ_y :標高 y 地点の水の密度 (g/cm^3)

 T_y :標高 y 地点の水温 (°C)

 $a:4.8958\times10^{-8}$

 $b: -8.2375 \times 10^{-6}$

 $c: 6.2854 \times 10^{-5}$

 $d:9.9985\times10^{-1}$

(9) 流出水温・水質

ある時点における流出水の水温,水質は水温,水質の鉛直分布から次式で求められる。

$$T_0 = \frac{1}{Q_0} \int_{yout - \frac{\delta_0}{2}}^{yout + \frac{\delta_0}{2}} u_{0y} TyBydy \qquad (7.28)$$

$$C_0 = \frac{1}{Q_0} \int_{yout - \frac{\delta_0}{2}}^{yout + \frac{\delta_0}{2}} u_{0y} Cy By dy \qquad (7.29)$$

(10) 対流混合の計算

対流に関しては密度差と流れの強さの関係が不明である。したがって、便宜的に鉛直方向に不安定な密度勾配を生じた場合には不安定な部分を混合させ、安定な密度勾配にすることによって対流を表現するものとし、対流混合後の水温、水質濃度を次式で与える。

$$\tilde{T}_{j} = \tilde{T}_{j+1} = (T_{j}V_{j} + T_{j+1}V_{j+1})/(V_{j} + V_{j+1}) \quad (\rho_{j} < \rho_{j+1} \ \mathcal{O} \ \succeq \ \trianglerighteq) \quad \cdots \qquad (7.30)$$

$$\tilde{C}_{j} = \tilde{C}_{j+1} = (C_{j}V_{j} + C_{j+1}V_{j+1})/(V_{j} + V_{j+1})$$
 ($\rho_{j} < \rho_{j+1}$ のとき) …………………… (7.31) ここに、 \tilde{T}_{j} 、 \tilde{C}_{j} : j 層の対流混合後の水温、水質濃度

(11) 質量収支式の解法

質量収支式の解法は Runge—Kutta 法の改良型である Runge—Kutta—Gill 法¹⁰⁾ を用いる。 この方法は、微分方程式及びその初期条件を次のように与えた時、

 (t_0, C_0) から t_0 が Δt だけ増加した点 (t_1, C_1) へ進むには、次式によって時間方向の離散化を行ない、C を求めていくものである。

$$k_{1} = \Delta t \cdot f(t_{0}, C_{0}) \qquad , r_{1} = \frac{1}{2}(k_{1} - 2q_{0})$$

$$C^{(1)} = C_{0} + r_{1} \qquad q_{1} = q_{0} + 3r_{1} - \frac{1}{2}k_{1}$$

$$k_{2} = \Delta t \cdot f\left(t_{0} + \frac{\Delta t}{2}, C^{(1)}\right)r_{2} = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(k_{2} - q_{1})$$

$$C^{(2)} = C^{(1)} + r_{2} \qquad q_{2} = q_{1} + 3r_{2} - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)k_{2}$$

$$k_{3} = \Delta t \cdot f\left(t_{0} + \frac{\Delta t}{2}, C^{(2)}\right)r_{3} = \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(k_{3} - q_{2})$$

$$C^{(3)} = C^{(2)} + r_{3} \qquad q_{3} = q_{2} + 3r_{3} - \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)k_{3}$$

$$k_{4} = \Delta t \cdot f(t_{0} + \Delta t, C^{(3)}) \quad r_{4} = \frac{1}{6}(k_{4} - 2q_{3})$$

$$C_{1} = C^{(3)} + r_{4} \qquad q_{4} = q_{3} + 3r_{4} - \frac{1}{2}k_{4}$$

$$(7.32)$$

ここで、 q_0 は 1 つ前のステップでの計算値であるから、第 1 回目では q_0 = 0 とする。また、一連の計算が終了した段階で(t_1 , C_1), q_4 をそれぞれ(t_0 , t_0), t_0 に新たに置き換えて次のステップへ移行し、これを繰り返して行けば良いことになる。

4-3-3. その他の研究事例

(1) Soroban モデル

貯水池の流動解析については、鉛直二次元や三次元モデルが広く行われているが、それらの多くは σ 格子系を採用するため、水平水温成層の非物理的拡散や水深に応じて格子点を変化させられないなどの難点が示唆されている。このことから、格子点数と位置の自由度が向上し動的適合により数値拡散誤差を抑制して、急峻な密度境界面を正確に再現できる CIP-Soroban モデルの検討が行われている。

論文名 三次元貯水池数値流動モデル"TITech-WARM"の開発と釜房貯水池への適用					
著者	中村 恭志, 戸田 真仁, 渡部 一人, 石川 忠晴				
出典	土木学会論文集 B1(水工学)2013 年 69 巻 4 号 I_775-I_780				
山典	発行日: 2013 年、公開日: 2014/03/31				

(2) ラグランジュ的手法による濁質挙動解析

通常のモデルは、オイラー的手法*で解析されているが、微細な懸濁粒子の挙動(例えば,流入時間帯別の濁質の動き)を解析するために,ラグランジュ的*な解析モデルを用いている事例もある。

※オイラー的手法とは、ダム貯水池等のシミュレーションにおいて一般的に用いられている手法であり、コントロールボリューム(メッシュ)の流入出として流体や物質を解析する手法、一方、ラグランジュ的手法とは、流体や物質の粒子を追跡して、粒子の初期位置と時間の関数として記述する方法を指す。

論文名	ダム貯水池の洪水時放流操作による濁質挙動への影響					
著 者	柴田 光彦, 梅田 信, 田中 仁					
III III	水工学論文集 2009 年 53 巻 1315-1320					
出典	発行日:2009 年 2/22					

4-4. サブモデルに関する事例

サブモデルとして、気泡式循環施設、表層水循環装置、サイフォン式取水設備、湧昇流の 発生手法、底泥のモデル化、カビ臭発生機構のモデル化、魚類のモデル化についての研究事 例等を紹介する。

4-4-1. 気泡式循環施設

気泡式循環施設は、気泡の浮力を利用して、貯水池内に循環流を発生させる装置である。 この循環流により、表層から中層にかけて混合層を形成するもので、その結果として、表層 水温の上昇を緩和するとともに、藻類を補償深度より下層まで拡散させることにより、藻類 異常発生を抑制する事を目的としている。この装置のモデル化の例を紹介する。

論文名 曝気循環を考慮した貯水池内流動に関する数値解析モデルの構築と検証			
著者	梅田 信		
出典	水工学論文集 第 49 巻,2005 年 2 月		

4-4-2. 表層水循環装置

表層水移送装置(あるいはプロペラ式循環装置)は表層に漂う植物プランクトンや栄養塩類をポンプ吸引して、ホースにより深層に放出する装置である。この装置のモデル化の例を紹介する。

論文名	て名 小河内貯水池における表層水移送装置の吐出口周辺の流動構造				
著者	横山 勝英, 池谷 靖史, 小泉 明, 山崎 公子, 庄司 亮				
出典	土木学会論文集 B1(水工学) 2014 年 70 巻 4 号 I_1621-I_1626				
山典	発行日: 2014 年、公開日: 2015/05/1				

4-4-3. サイフォン式取水設備

近年、ライフルサイクルコストの観点から連続サイフォン式取水設備が採用されている。 連続サイフォン式取水設備は、逆 V 字形状のサイフォン管を貯水池水深方向に連続して配置し、任意の異なる水深からの同時取水が可能となる施設である。この装置のモデル化の例を紹介する。

論文名	ダム貯水池の異高同時選択取水による取水特性の検討			
著 者	泉谷 隆志, 矢島 啓, 鈴木 伴征			
出典	土木学会論文集 B1(水工学) 2016 年 72 巻 4 号 I_685-I_690			
山栗	発行日: 2016 年、公開日: 2017/01/31			

4-4-4. 湧昇流の発生手法

運転コストを抑えた水質改善策として、自然エネルギーを利用して低い運転コストで安定 した湧昇流を形成させる新たな手法について提案されている。

╸╸	コアンダ効果を利用した新たな湧昇流発生手法の上下層混合に対する有効性に関
論文名	する検討
著 者	佐藤 大作, 近藤 秀紀, 有田 正光
ш	土木学会論文集 B1(水工学) 2015 年 71 巻 4 号 I_787-I_792
出典	発行日: 2015 年、公開日: 2016/01/29

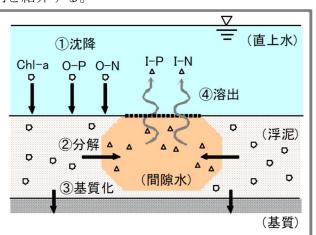
4-4-5. 底泥のモデル化

貯水池の富栄養状況は、外部からの流入負荷を支配因子として、水塊と底泥の2層間での収支の結果が水質として現れる。本来の水質メカニズムとしては、外物からの流入→沈降→底泥からの溶出というサイクル(収支関係)がある。一般的に富栄養化予測モデルは、この底泥からの溶出は、水温による関数で溶出速度を与えていることが多く、ダム供用開始以降の底泥への負荷の蓄積などは無視されるため、長期間にわたっての溶出量の減少やタイムラグを伴う水質改善等の減少を再現するのが困難となっている。

それに対して、水質シミュレーションの中で底質をモデル化し、これを定量的に評価する 試みが実施されている例もあり、その構築例を紹介する。

◆モデル概念図

- 1): 沈降(直上水中の有機物等が沈降し、浮泥層へ堆積)
- 2): 分解(浮泥中の有機物が分解して、 間隙水質へ溶出)
- 3): 基質化(浮泥の一部が基質化)
- 4):溶出(間隙水と直上水の濃度差に 起因し、間隙水中の無機栄養塩が 溶出)



◆基礎式

1)底質収支式:底質分解と直上水からの沈降で構成

$$\frac{d \cdot S_d}{dt} = \frac{\left(\omega_o \cdot C_o + \beta \cdot \omega_c \cdot C_c\right) \cdot A_B - \left(K_s + K_k\right) \cdot \theta^{T - 20} \cdot S_d \cdot V_{sd}}{V_{sd}}$$

2)間隙水質収支式:底質分解と直上水への拡散(溶出)で構成

(リンについては溶出項に DO 関数を乗じる)

$$\frac{d \cdot S_w}{dt} = \frac{a \cdot K_s \cdot \theta^{T-20} \cdot S_d \cdot V_{sd} - \alpha (S_w - C_i) \cdot \theta^{T-20} \cdot A_B \cdot f(DO)}{V_{sw}}$$
DO 関数:
$$f(DO) = \frac{1}{(1+4\cdot DO)}$$

ここに、

S_d:浮泥中の O-N,O-P 濃度(g/m³)、

ω_o: O-N,O-P の沈降速度(=0.1(m/日))、

C_o:上水中の O-N,O-P 濃度(mg/L)、

β:chl-a と N,P 換算率(mg-N,P/μg-chl-a)、

ω_c:chl-a 沈降速度 m/日)、

C_c:上水中の chl-a 濃度(µg/L)、

A_B:底層面積(m²)

Ks:浮泥の分解速度(1/日)、

K_K;浮泥の基質化速度(1/日)、

 $V_{sd}(m^3)$:浮泥ボリューム(AB×0.02m で設定(一定))

θ:温度関数

T:水温(℃)

Sw:間隙水中の I-N,I-P 濃度(g/m³)

a:底質から間隙水質への換算係数

α:拡散に係る定数(m/日)

V_{sw}(m³):間隙水のボリューム(AB×0.08 で設定(一定))

C_i:上水中の I-N,I-P 濃度(mg/L)である。

4-4-6. カビ臭発生機構のモデル化

カビ臭発生原因藻類である藍藻類フォルミディウム(緑株)をその他の植物プランクトン と区別して表現することにより、カビ臭発生機構をより詳細にモデルへ組み込んだ事例を紹 介する。

◆実施内容

藍藻類フォルミディウム(緑株)を個別にモデル化し、とその他藍藻類に分けてパラメーター設定した。パラメーターの設定は再現計算に基づき設定されている。フォルミディウム(緑株)については、増殖試験結果に基づき、増殖速度、最適水温、最適日射量、窒素及びリンのミカエリス定数を設定している。

◆設定されたパラメーター

以下の増殖試験結果を踏まえてパラメーターが設定されている。

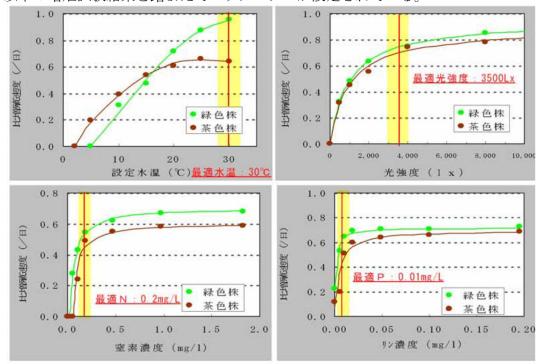


図 4-4 フォルミディウムの増殖試験結果

表 4-1 生態系モデルのパラメーター表

	一般範囲	緑株	藍藻	緑藻	珪藻
スペース効果定数	-0.003~-0.04	-0.00385	-0.00385	-0.00385	-0.0038
最大増殖比速度(1/day)	0.44~5.76	1.00	1.00	0.90	0.
長適気温	5~30	30.0	20.0	15.0	10
尖り定数		1	1	1	
最適照度(cal/cm2/day)	200~400	l 410	350	270	20
照度減衰係数	0.3~1.5	0.3	0.3	0.3	0.
Chla濃度により照度減衰係数		0.01	0.01	0.01	0.0
窒素に関するミカエリス定数	0.005~0.4	0.2	0.2	0.1	0
リンに関するミカエリス定数	0.0005~0.04	0.01	0.01	0.005	0.00
20℃における植物プランクトンの死滅率	0.05~0.20	0.05	0.05	0.07	0.0
植物プランクトン死滅率の温度修正係数	1.05~1.07	1.05	1.05	1.05	1.0
動物プランクトンのろ水速度(I/mgC·day)	0.1~2.0	0.3	0.3	0.3	0
飽食効果に対するミカエリス定数(ug-chla/l)		60.0	60.0	60.0	60
C/chla比	0.0	0.05	0.05	0.05	0.0
動物プランクトン摂取効率	0	.6 0.6	0.6	0.6	0
各定数に対応する水温(OPTT=20℃)		20 20	20	20	2

4-4-7. 魚類のモデル化

魚類は、湖沼の水質の形成に影響を与えている要素の一つである。バイオマニピュレーションのように魚類をコントロールすることで水質の改善等を行う考え方や取組が実施されている事例もある。ここでは、魚類のモデル化事例として、以下2つの事例を紹介する。

≯ → 々	栄養塩負荷の増減が琵琶湖の高次生態系に与える影響:モンテカルロ法を用いた			
論文名 食物連鎖モデルによる解析				
著 者	佐藤 祐一, 早川 和秀			
出典	水環境学会誌 42(4), 133-143, 2019			

論文名 バイオマニピュレーションによる水質改善				
著者	著者 今村文子、長崎均(日本工営)			
出典	Civil Engineering Consultant VOL.223 April 2004			

4-5. 入力条件の設定に関する事例

入力条件の設定方法の事例として、SS 沈降速度及び L-Q 式に関する研究事例を紹介する。

4-5-1. SS 沈降速度

既往検討業務の報告書では、SS の沈降速度として、ストークスの式からの推定または沈降試験により設定されていることが多い。しかし、貯水池内で比較的長期間に渡って浮遊している濁質は非常に微細な粒子であり、粒径はおおむね 10μ m 以下である。この程度の大きさになると、ブラウン運動や粒子自身の電気的な反発力あるいは乱流などの影響により、ストークス則で算出される値よりもかなり小さくなることが、これまでにも指摘されてきている。このような背景から、確率的沈降という新たな考え方が提案されている。

論文名	ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析				
著者	梅田 信,池上 迅,石川 忠晴,富岡 誠司				
出典	水工学論文集 2004 年 48 巻 1363-1368				
山栗	発行日: 2004/02/01、公開日: 2010/06/04				

4-5-2. L-Q 式

水質シミュレーションで流入水質を求めるために L-Q 式を使用するが、計算境界位置付近に適当な観測適地がなかったり、あるいは既往の観測値があったり、これと計算境界位置にギャップがある場合などがある。その場合の L-Q 式の設定について、以下のような研究がされている。

論文名	濁質量-流量関係式 (L-Q 式) の観測点以外への適用				
著者	柏井 条介				
出典	ダム工学 2008年 18 巻 4 号 239-250				
田 典	発行日: 2008/12/15、公開日: 2009/04/24				

4-5-3. 入力条件等の資料・データ収集事例

水質シミュレーションやデータレビューに必要な資料やデータの収集事例として、秋田県 八郎湖における水質シミュレーションの実施事例を示す。

本件は、湖沼水質保全計画にかかわる水質シミュレーションの実施が目的であるため、データの収集期間は計画期間の6か年としている。

(1)諸元の整理

八郎湖及び流域の諸元を図 4-5 に示す。

八郎湖は、流域面積 894.34km²、湖面積 47.32km²、平均水深 $2.8\,\mathrm{m}$ 、最大水深 $10\,\mathrm{m}$ の比較的浅い湖沼である。湖容積は約 1.3 億 m^3 、流域や干拓地からの年間流入量は約 18 億 m^{3*1} 、年回転率は $14\,\mathrm{m}$ $14\,\mathrm{m}$

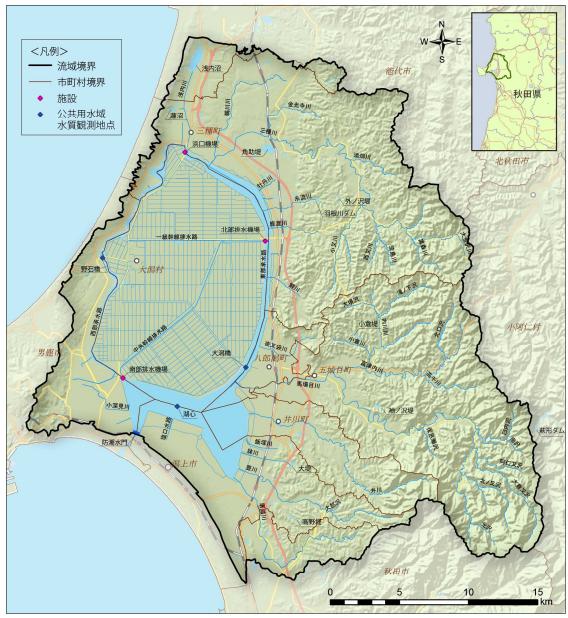
八郎湖では 1957(昭和 32)年に干拓事業に着手、1977(昭和 52)年に完了しており、干拓前は 220.24km² あった湖面積が上記の 47.32km² にまで縮小した。

干拓事業完了後、1978(昭和53)年夏に比較的広範囲でアオコが発生し、以降水質悪化が顕在化した。1999(平成11)年(八郎潟町上水道問題,ワカサギ異味臭)、2005(平成17)年(広範囲に発生)、2006(平成18)年(八郎潟町上水道取水停止・給水制限、杉沢導水緊急放流)、2007(平成19)年(7月2日と早い時期に大量発生)等の年で大発生が見られた。

2001(平成 13)年度には水質 (COD) が全国湖沼ワースト 5 位、2006(平成 18)年度にはワースト 3 位となり、かかる状況を踏まえ、2007(平成 19)年 12 月に全国 11 番目の指定湖沼に指定され、2012 (平成 24) 年度にはワースト 4 位、2016 (平成 28) 年度にはワースト 5 位となっている。

※1: 平成 25~30 年度での年間総流入量の平均値、後述の水質シミュレーションより 算定した値(干拓地の南部や北部の各排水機場からの排水量も含む)

※2: 平成 25~30 年度の平均年間総流入量(約 18 億 m³)を湖容積(約 1.3 億 m³)で 除した値



HO:	π.

押し					
	単位	調整池	東部承水路	西部承水路	全体
湖面積	km²	31.5	10.7	5.1	47.3
貯水量	百万m³	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 非かんな	い期 :1.0 がい期:0.5	0.35 0.25	
流域面積	km²	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

ペガ生			
項目	類型	基準値	平成30年度 年平均値
COD	湖沼・A	3mg/L	7.3mg/L**2
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 4-5 八郎湖・流域及び諸元等

(2)流入河川

計画策定に用いた八郎湖流入河川の諸元を下表に示す。

表 4-2 流入河川諸元

第2期計画策定 八郎湖流域流域分割(市町村別)

流域ブロック名	流域名	市町村名	順流域面積	残流域面積	合計	水面積	合計
			km^2	km^2	km^2	km^2	km^2
東部承水路	浅 内 川	三種町	7. 55	2.02	9. 57		9. 57
		能代市	15.82		15.82		15.82
		(小計)	(23.37)	(2.02)	25. 38		25. 38
	鵜川川	三種町	22. 34	2.71	25.05		25.05
		能代市	4. 41		4.41		4.41
		(小計)	(26.75)	(2.71)	29.46		29.46
	三 種 川	三種町	144.30	5.54	149.84		149.84
		(小計)	(144.30)	(5.54)	149.84		149.84
	牡丹・新屋敷	三種町	16. 42	3.02	19.44		19.44
	・ 糸 流 川	(小計)	(16.42)	(3.02)	19.44		19. 44
	鹿 渡 川	三種町	8. 55	1.54	10.09		10.09
	鯉川	三種町	11. 75	0.94	12.69		12.69
	夜叉袋川	五城目町	2. 30		2.30		2.30
		八郎潟町	10.56	4.72	15. 28		15. 28
		(小計)	(12.86)	(4.72)	17. 58		17. 58
	(ブロック:		(244.00)	(20.48)	264.48	(10.74)	275. 22
八郎潟調整池	馬場目川	五城目町	200.90	3.80	204. 70		204.70
		八郎潟町	0. 25	0.64	0.89		0.89
		三種町	0. 10		0.10		0.10
		(小計)	(201.25)	(4.44)	205.69		205.69
	井川	井川町	39. 81	7.06	46.87		46.87
		五城目町	6. 50		6.50		6.50
		(小計)	(46.31)	(7.06)	53. 37		53. 37
	飯塚・妹川	潟 上 市	7. 00	5.32	12. 32		12. 32
		井川町	0.08	0.66	0.73		0.73
		(小計)	(7.08)	(5.98)	13. 05		13. 05
	豊川	潟上市	22. 32	2.43	24. 76		24. 76
		秋田市	0. 20		0.20		0. 20
		(小計)	(22.52)	(2.43)	24. 96		24. 96
	馬踏川	潟上市	3. 07	3. 04	6. 11		6. 11
		秋田市	26. 63	0. 20	26.83		26. 83
	the law area area and the	(小計)	(29.70)	(3.24)	32. 94		32. 94
	八郎潟調整池	<u>潟上市</u>		30. 73	30. 73		30. 73
		男鹿市		28. 00	28. 00		28. 00
1	(-)	(小計)	(0.00)	(58. 74)	58. 74	(24.52)	58. 74
T 10 7 1 85	(ブロック	7141117	(306.86)	(81. 89)	388. 74	(31.52)	420. 26
西部承水路	西部承水路	三種町		9. 29	9. 29		9. 29
		男鹿市	(0.00)	26. 78	26. 78	(5.00)	26. 78
		(小計)	(0. 00)	(36. 07)	36. 07	(5.06)	41. 13
大潟村中央干拓地		村		. 72	157. 72	47.00	157. 72
	合計		708. 57	138. 44	847.02	47. 32	894. 34

(3)八郎湖の水管理

八郎湖の水管理にかかる基幹施設の概要を下表に示す。本検討にかかる主要施設としては、海への放流を制御する防潮水門、大潟村からの排水や調整池・東部承水路と西部承水路の間の水のやり取りを制御する各機場がある。

表 4-3 基幹施設の概要

用·排水機場	南部排水機場:最大排水量 50 m³/s (西部承水路排水の 10m³/s を含む
	北部排水機場:最大排水量 40 m³/s)
	方口排水機場:最大排水量 9.5 m³/s
	浜口機場 :最大排水量 7.0 m³/s 計4カ所
幹線排水路	22.6km(中央幹線排水路 15.7km、一級幹線排水路 6.9km)
取水工	19 カ所 総取水量 40 m³/s
防潮水門	14 門(ローラーケート)全幅 370m (2007(平成 19)年完成)

八郎湖では表 4-4 及び図 4-6 に示すルールで水位管理が行われている。

表 4-4 水位管理の概要

常時満水位	○洪水時を除き、超えて上昇させない					
	標高+1.0m (調整池)					
制限水位	○洪水時を除き、超えて上昇させない					
	標高+1.0m (5月1日から8月10日まで)					
	標高+70cm (8月11日から9月10日まで)					
	標高+50cm (9月11日から翌年3月31日まで)					
確保水位	○調整池の水位を、低下させない					
	標高+50cm (基準日3月31日)					
	標高+1.0m (基準日 5 月 1 日)					
	標高+70cm (基準日8月 11 日)					
	標高+50cm (基準日9月 11 日)					
かんがい用水	貯留水深(調整池の水位) 標高+1.0m~-20cm の範囲で貯留					
の貯留	管理(容量最大 47 百万 m³)					
最低水位	かんがい期(5月1日から9月10日まで)に調整池の水位が、					
	最低水位(標高 -20cm)以下に低下するおそれがあるときは、					
	関係機関と協議のうえ、必要な措置を講ずる。					

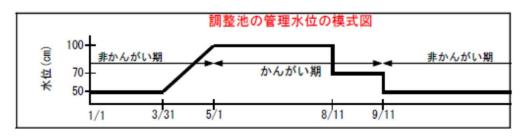


図 4-6 調整池の管理水位の模式図

(4) データの収集・整理

水質シミュレーションの構築・検証を行うために収集・整理した資料・データを表 4-5 に示す。

表 4-5 八郎湖水質予測モデルの構築・検証にあたっての収集資料・データ

グレーハッチは過年度整理・検討済みのデータを使用

БV	内顶口	1. 福口	NI.	th size	佐井左 地間	データ	htt /+	<i>作</i>	収	集	グレーハッチは過年度整理・検討済みのデータを使用	<i>佐</i>
区分	中項目	小項目	No.	内容 流域界、小河川流域界	作成年、期間 H23年度	ピッチ	媒体GISデータ	作成者	713	パション	資料名 八郎湖流域図(H19.3)	作成者 秋田県
	流域界	流域界		黑·市町村界	H23年度 H23年度	_		国土地理院	0		国土数值情報「行政区域」	国土地理院
				流域ブロック分割	H23年度	_	GISデータ		0		河川流域分割図	秋田県
		土地利用		国土数値情報(100mメッシュ)	H30年度			国土地理院			国土数値情報「土地利用細分メッシュ」平成26年度	国土地理院
		標高		国土数値情報(10mメッシュ)	H23年度	_		国土地理院			基盤地図情報「10mメッシュ(標高)」	国土地理院
		水域		河川、水域ラインデータ	H23年度	_		国土地理院			国土数值情報「河川」「湖沼」平成17~21年度	国土地理院
	地形·地	表層地質	7	国土数値情報(3次メッシュ)	H23年度	_	GISデータ	国土地理院		0	20万分の1土地分類基本調査「表層地質図」	国土地理院
	質	土壌	8	国土数値情報 (3次メッシュ)	H23年度	-	GISデータ	国土地理院		0	20万分の1土地分類基本調査「土壌図」	国土地理院
											八郎湖深浅図(電子ファイル、報告書) H12資料(西部)	
		湖地形・水深	9	地形図・深浅図	最新年度	_	電子	県	0		H15資料(調整池、東部)	秋田県
		湖水位-容量	10	湖水位-容量曲線(HV)	最新年度	_	電子	県	0		H28資料(西部 南端~祝田橋) 農業用水水源池汚濁原因調査(八郎湖)	東北農政局計画部資源課
		降雨量、気温、風速、日射 量、雲量、湿度、積雪深	11	気象庁アメダスデータ、気象観測データ	H25.4~H31.3	時間	電子	気象庁		0	アメダスデータ	気象庁
	気象	降雨量、気温、風速	12	排水機場等観測気象データ	H25.4~H31.3	時間	電子	県	0		機場、管理事務所での雨量、気温等データ(日、時)	秋田県
		降雨量	13	県雨量テレメータデータ	H25.4~H31.3	時間	電子	県	0		沖田面、上岩川、琴丘、金足堀内、水沢、若美、福米沢、五城目、森岳	秋田県
	人口	人口	14	人口(字別or市町村別) 汚水処理形態別人口(字別or市町村別):下水道接	H27年度		電子	県	0		字別流域人口(H27国勢調査)	秋田県
		処理形態別人数	15		H25.4~H31.3	_	電子	県	0		市町村別河川流域別人口	秋田県
	排水処	農業集落排水	16	<u>処理場利用、自家処理等</u> 各処理施設の位置、排水量、排水水質	H25.4~H31.3		雷子	ų.	0		農業集落排水処理施設流入量・放流水質データ	秋田県
	理			U. R. 处理場位置、排水量、排水水質	H25.4~H31.3		帝マ	(8)				
		し尿処理場 生活排水処理		生活排水処理(下水道整備)区域図	H28年度		電子電子	県	0		五城目町クリーンセンター放流水量・放流水質データ 秋田県生活排水処理整備構想図	秋田県
	排出負	排出負荷量	19	発生源別排出負荷量(市町村別、流域別:COD、T-	H25~H30年度	_	電子		0		排出負荷量データ	秋田県
	荷量			N、T-P) (八郎潟干拓)用水取水量(取水口ごと:上水、農水)	H25.4~H31.3	日	電子	(E.	0		取水量(日データ)、西部承水路西側への取水量データなし	秋田県
		取水量		(水道水源)上水用地下水取水量	H25~H29年度	_		県	0		八郎湖流域水道現況(年間取水量)	秋田県
			22	八郎潟町上水取水量	H25~H30年度	B	電子	県	0		八郎潟町 上水 取水量・配水量データ(日データ)	秋田県
		排水量、水質		(流域内河川からの)用水取水量 排水機場排水量、水質(南部、北部、方口)	H30年度 H25.4~H31.3		電子	県	0	_	許可水利権一覧表 管理日報:排水量(日データ)、大潟村内主要排水機場のみ	
	利水等	通水量、水質		通水量、水質(浜口機場、南部排水機場)	H25.4~H31.3		電子	県	0		管理日報:通水量(日データ) 管理日報:通水量(日データ)	秋田県
		放流量	26	防潮水門放流量	H25.4~H31.3	日	電子	県	0		放流量(日データ、運転記録)	秋田県
モデル 構築用		導水水量、水質		能代地区左岸団地導水量、水質 等 受益面積	H25.4~H31.3 平成31年	日	電子電子	事業者 事業者	0		素波里頭首工取水量(素波里導水データ) 能代地区土地改良区管内受益面積表(平成31年1月17日時点)	秋田県 <u>秋田県</u>
(入力データ		発電用水量、水質		用水系統図 杉沢発電からの放流量、水質	平成29年 H25.4~H31.3			事業者 事業者	0		国営能代地区計画用水系統模式図(平成29年12月変更後) 杉沢発電放流量、水質データ(放流量は日データ、水質は月データ)	─ 秋田県 秋田県
作成)		栽培期		農業カレンダー(水稲、畑作)	最新年度	_	電子	県	0		稲作指導指針、野菜栽培技術指針、大豆指導指針	秋田県
	農業	施肥量		施肥基準等(水稲、畑作)	最新年度			県	0	_	福作指導指針、野菜栽培技術指針、大豆指導指針	秋田県
	畜産	畜産頭数		畜産頭数(字別or市町村別)	H25~H30年度		電子	県	0		機家別家畜飼養頭数	秋田県
	工業	事業所排水	34	事業所位置(住所)、事業所ごと排水量、排水負荷量	H25~H30年度	-	電子	県	0		第2期工場・事業場排出負荷量算定データ	秋田県
		漁獲量河道諸元		漁獲量(魚種ごと) 流入河川の河床標高、勾配、河川幅(縦断図、横断図)	H25~H30年度	毎月等	電子電子	県、漁協等 県、市町村、土	0		八郎湖における漁獲量実績 三種川図面データ・馬路川河道データ・H12馬場目川横断面図	秋田県
	1777年		30	流域内の調整池(防災調節池等)の位置、規模(面積、			电子	地改良区等 県、市町村、土				秋田栄
		調整池	37	高さ、貯留量、放流方式:オリフィス等)	H30年度	_	_	地改良区等界、市町村、土	0		該当なし	
	水域	ため池	38	流域内のため池の位置、規模(面積、高さ、貯留量、放流方式)	H23年度	_	電子	地改良区等	0		ため池台帳(諸元、位置図)	秋田県
		ダム	39	ダムの位置、規模(面積、高さ、貯留量、流入量、放流 量、放流方式)	H30年度	-	_	県、市町村、土 地改良区等	0		該当なし	
	底泥	底泥影響	40	湖内底泥の含有量、溶出速度データ	H25~H30年度	_	電子	UI.	0		底質調査結果(H25~30) 豊川底質調査結果	秋田県
	, and a	/CAPUATO IN		1971 Application of 12 and 10 belongs 2				, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,			H28八郎湖底質等調查(水質調查)	- VA VA
	生物	水生植物	41	植生調査データ		-	電子	県	0		平成18年度 水生植物による自然浄化機能の活用推進事業業務委託	秋田県
											平成21年度幹線·支線排水路水質調查業務委託結果報告書 平成22年度方上地区高濃度リン含有地下水調查業務委託報告書 平成23年度Ca积殼炭吸着特性調查業務委託報告書 平成24年度高濃度リン含有地下水調查業務委託報告書	
		浄化施設	42	方上地区自然浄化施設の浄化量等	H25~H29年度	_	電子	県	0		平成25年度植生浄化実証試験施設水質分析等調査業務報告書 平成26年度方上地区植生浄化施設水質モニタリング調査業務委託業務報告書	秋田県
											平成27年度方上地区植生浄化施設水質モニタリング調査業務委託業務報告書	
											平成28年度植生浄化施設水質モニタリング調査業務報告書 平成29年度農地排水負荷削減対策事業植生浄化施設水質モニタリング調査業	
					1105年 座		⊕ →	(III			務委託報告書 他	1km#
	対策		43	西部承水路流動化促進事業関連データ	H25年度 H26~30年度		電子電子		0		西部流動化実施結果報告とりまとめ、注水量	秋田県 秋田県
		流動化	45	大久保湾水の流動化実証実験結果関連データ	H26~30年度 H29年度		電子電子		0		西部承水路流動化促進事業実施結果 大久保湾流動化対策検討事業とりまとめ資料	秋田県
				湖心·大久保湾流況調査報告書	H29・30年度		電子		Ŏ		平成30年度湖水流況調查業務委託	秋田県
		高濃度酸素供給装置	47	高濃度酸素供給装置対策取りまとめ結果	H27~H29年度	_	電子or紙	県	0		大久保湾下層DO等改善対策事業(H27~H29)最終報告書 西部承水路の高濃度酸素水供給対策(H28~H29)報告書	秋田県
		アオコ対策	48	アオコ対策事業関連データ	H25~H29年度	_	電子or紙	県	0		アオコ抑制装置(馬踏川)効果測定報告書 過年度取り纏め資料(平成25年度~平成29年度)	秋田県
		その他対策	49	その他浄化対策の実施報告書 (流動化促進、湖岸植生再生等対策の実施状況等)	H25~H29年度	_	電子or紙	県	0		加辺植生回復環境整備対策関連データ 中央幹線排水路の濁水対策技術検討関連資料	秋田県
	-1 = 1:1-	MI 14 64	<i>EC</i>		1105 4 112: 2	Pri De	ant →	(H	_		シジミ等による水質浄化試験結果関連資料	th mill
	水位	湖水位		湖水位(全観測地点)	H25.4~H31.3	時間		県	0		防潮水門、南部排水機場等 ※今回は使用していない。	秋田県
	水量	河川流量	51	流入河川流量(全観測地点)	_	時間	電子	県	0		県テレメータ: 三種川(森岳)、馬踏川(金足堀内)、井川(施田)、豊川(槻木)、毎時データ、一部欠測等あり。	秋田県
		河川水炉	52	定期調査(全観測地点、全項目)	H25.4~H31.3	毎月等	電子	県	0		河川水質データ	秋田県
モデル	水質	河川水質		降雨時調查(全観測地点、全項目)	H16年度	全データ		県	0		平成16年度出水調査データ(馬場目川、三種川)	秋田県
検証用		湖水質	54	定期調查(全観測地点、全項目)	H25.4~H31.3	毎月等	電子	県	0		八郎湖水質データ	秋田県
		排水路等水質	55	定期調査(全観測地点、全項目)	H25.4~H31.3	毎月等	電子	県	0		排水路等水質データ	秋田県
		降雨水質	56	雨水の水質	最新年度	全データ	電子	県	0		T-N,T-Pは流総指針の大潟村観測値	秋田県
		植物プランクトン	57	植物プランクトンデータ	H25.4~H30.3	毎月等	電子	県	0		シジミなど湖沼河川の水産資源の維持、管理、活用に関する研究(八郎湖のプランクトン、底生生物調査)(2016年度)	水産振興センター
		アオコレベル		アオコモニタリング資料 第3期八郎湖水質保全対策検討専門委員会第1回検討	H25.4~H31.3	毎月等	電子	県	0		アオコの発生状況データ(アオコレベル)	秋田県
		検討会資料		会資料	H30.8	_	電子		0		第3期八郎湖水質保全対策検討専門委員会第1回検討会資料	秋田県
その他		水質関連		八郎湖公共用水域水質推移傾向整理 平成24年度 八郎湖におけるCOD実態調査	H30年度 H24年度	_	1	県	0		水質推移傾向 平成24年度 八郎湖におけるCOD実態調査報告書	秋田県 秋田工業高等専門学校
			62	八郎潟干拓地農業用水の水質調査、研究	H29年度	_	電子	県	0		平成29年度八郎潟干拓地農業用水水質調査結果	大潟土地改良区
		第2期計画関連資料		第2期計画の取組と平成30年度対策事業について 八郎湖に係る湖沼資質保全計画(第2期)の目標達成	H30年度 H30年度	_	電子電子	県	0		第2期計画の取組と平成30年度対策事業について 八郎湖に係る湖沼資質保全計画(第2期)の目標達成状況	秋田県
		_	65	状況 平成29年度における八郎湖の水質について	H30年度 H30年度	_	電子		0		八郎湖に徐る湖沿資資保至計画(第2列)の日標達成状况 平成29年度における八郎湖の水質について	秋田県
		→ 卒次福に明ーナフアロウ									ワカサギ、シラウオ等資源調査	
		水産資源に関する研究		水産資源に関する研究関連資料	H28年度	_	電子	宗	0		コイなど未利用資源の活用 八郎湖のプランクトン、底生生物調査	水産振興センター
		農地からの負荷流出に関す る研究	67	栽培方法の違いによる農地からの負荷流出に関する研究	H30年度	_	電子	県	0		無落水移植が周辺環境に与える効果の解明(水質汚濁物質の定量化)	秋田県立大学
		沈水植物に関する研究	68	沈水植物の生育調査と安定再生手法の検討	H26年度	_	電子	県	0		湖岸の自然浄化機能の回復施設における沈水植物の生育調査と安定再生手法 開発研究(III) 資料	秋田県立大学
		排水機場における濁水除去		排水機場における濁水除去検討資料	H24年度	_	電子		0		開発研究(III)資料 平成24年度排水機場における濁水除去検討業務委託報告書	秋田県
		検討データ	97	v. · · · · //A · // · · · · · · · · · · ·			H르네	-15			・ハッ・・・・ペルフ・ロスペーマック・ジョックロアンスの大門木切女に採口百	N V Ind NIV

4-6. 将来気候を考慮した入力条件の設定に関する事例

将来気候における降雨形態の変化を考慮した流入条件の設定に関して参考となる事例を紹介する。

水質の将来予測を行う上では、気温だけでなく、降雨形態の変化による流出負荷量の増加も予測される。既往研究では、対象流域全体の流出を計算する分布型流出モデルを用いて境界条件となる流入量や流出負荷量を将来気候予測を基に算出し、気候変動による流入負荷量の変化がもたらす富栄養化への影響を評価した事例がある。

	気候変動による停滞性水域の熱・物質循環と水質環境への影響評価と適応策に関						
論文名	する研究						
	(気候変動にともなう流域からダム貯水池・湖沼に流入する土砂量・栄養塩負荷量						
	の変化の把握、ダム貯水池・湖沼の水質予測手法の構築と水質への影響評価)						
著 者	南山瑞彦, 平山孝浩, 對馬育夫, 金子陽輔, 石神孝之, 櫻井寿之, 中西哲						
	平成 28 年度 研究開発プログラム報告書						
出典	(13. 地域の水利用と水生生態系の保全のための水質管理技術の開発),						
	国立研究開発法人土木研究所, 21-29, 2017						

4-7. モデルの再現性の定量的評価に関する事例

4-7-1. 平均二乗誤差による水温の再現性の定量的な評価

水温(表層水温)を例に平均二乗誤差の算出方法を以下に示す。

誤差範囲は「2程度」より小さい値になるように再現性の向上を行うこと望ましい。

誤差範囲の2は、国土交通省及び水資源機構管理ダムのうち、約30ダムでの水質シミュレーション結果を対象に「平均二乗誤差」を指標とした検証を実施した例を参考に設定している。

- ①月別値、②年平均値、③年最大値 での整理方法を紹介する。
- ① 月別値による整理:任意の1地点において各月調査日の実測値と検証計算値の二乗 誤差を求め、各年ごとに平均し、平均二乗誤差とした。

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (T_i - t_i)^2$$

ここに、T_i:調査日の実測値

t_i:調査日と同日の検証計算値

n:対象データ数(1年間の実測値、通常12個)

月別値の場合、A ダムのダムサイト地点において、10 か年調査を実施しているとすると、平均二乗誤差が10データ算出される。

② 年平均値による整理:任意の1地点において、実測値の年平均値と検証計算値の年平均値の二乗誤差を求め、計算対象とした年数で平均し、平均二乗誤差とした。

$$T_{y1} = \frac{(T_1 + T_2 \cdots T_n)}{n}$$

$$t_{y1} = \frac{(t_1 + t_2 \cdots t_n)}{n}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} (T_{yi} - t_{yi})^2$$

ここに、T_i:調査日の実測値

t_i:調査日と同日の検証計算値

n:対象データ数(1年間の実測値、通常12個)

Ty_i:実測値の年平均

tv_i:検証計算値の年平均

k:検証計算実施年数(最大年はおおむね10年間)

年平均値の場合、A ダムのダムサイト地点において、10 か年調査を実施しているとすると、平均二乗誤差が1データとして算出される。

③ 年最大値による整理:実測値の年最大値と同月日の検証計算値の二乗誤差を求め、計算対象とした年数で平均し、平均二乗誤差とした。

$$T_{ymax1} = MAX(T_1, T_2 \cdots T_n)$$

 $t_{ymax1} = T_{ymax1}$ と同じ日の計算値

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} (T_{ymaxi} - t_{ymaxi})^{2}$$

ここに、T_i:調査日の実測値

Tymax_i:実測値の年最大値

tymaxi:上記と同じ調査日の検証計算値

n:対象データ数(1年間の実測値、通常12個)

k:検証計算実施年数(最大年はおおむね10年間)

年最大値の場合、A ダムのダムサイト地点において、10 か年調査を実施しているとすると、平均二乗誤差が1データとして算出される。

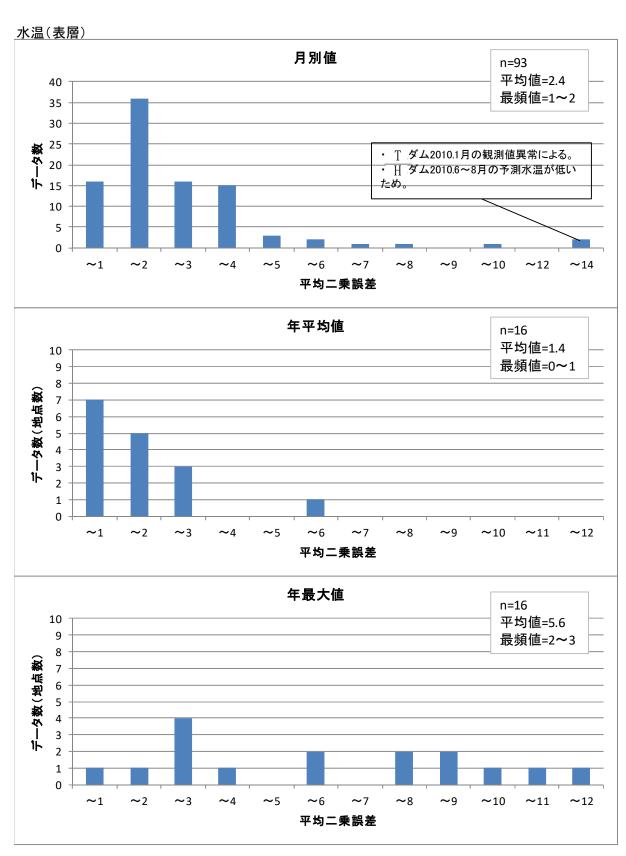


図 4-7 実測値と予測値の平均二乗誤差の分布 (表層水温)

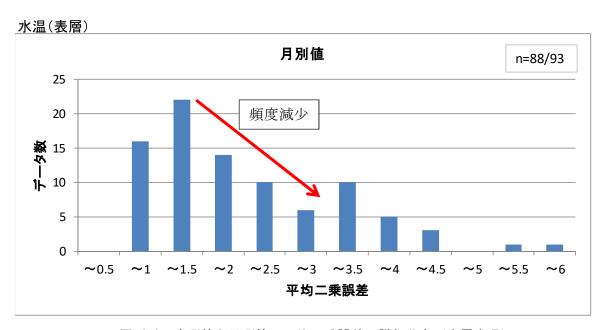


図 4-8 実測値と予測値の平均二乗誤差の詳細分布 (表層水温)

4-7-2. ばらつきの誤差評価指標 (RMSE) を用いた精度評価の事例

気象の数値予測におけるばらつきの誤差評価にも採用されている指標である RMSE (Root Mean Square Error) を用いて、水温の鉛直分布への適用を提案している事例を紹介する。

論文名 ダム湖水質シミュレーションの精度評価指標に関する研究		
著者	梅田 信, 富岡 誠司	
出典	ダム水源地環境整備センター所報,2001	

4-8. 生態系モデルのパラメーター設定に関する情報

生態系モデルの共通的なパラメーターの設定状況について、ダム貯水池における水質シ ミュレーションの事例から整理結果を紹介する。

(1)対象ダム

情報を収集した17事例を対象に整理した。

(2)整理対象のパラメーター

生態系モデルのうち、植物プランクトンの設定状況を対象とする。さらに植物プランクトンは藻類種別にモデル構築されている場合も多く、その場合は種別に整理を行った。さらに、藍藻類は、緑株 (カビ臭を発生するフォルミディウム)、M タイプ (循環期に発生するタイプ)、S タイプ (成層期に発生するタイプ)、タイプ無しに分類する。

(3) パラメーターの設定状況

1) 最大增殖速度

植物プランクトンの増殖を決定するパラメーターである、文献値からの標準設定値は 0.32~3.9 である。整理の結果は、1~2 が最多で最大は 4~5 であり、藻類別の傾向は見られなかった。おおむね標準設定値範囲内に収まっている状況であった。

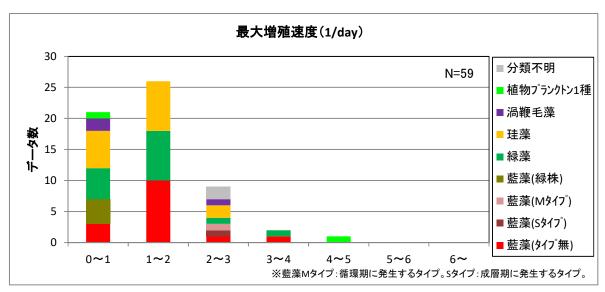


図 4-9 最大増殖速度のパラメーター設定状況

2) 最適(基準)水温

最適(基準)水温は、植物プランクトンが最も活動しやすい水温のことであり、そのため藻類種別に傾向が異なっている。珪藻類<緑藻類・渦鞭毛藻類<藍藻類となっており、文献等で紹介される傾向と同様であった。植物プランクトンを種別に分けない例は、高い設定値となっていたが夏場の藍藻類の増殖を再現するため、そのような設定値となったものと考えられる。

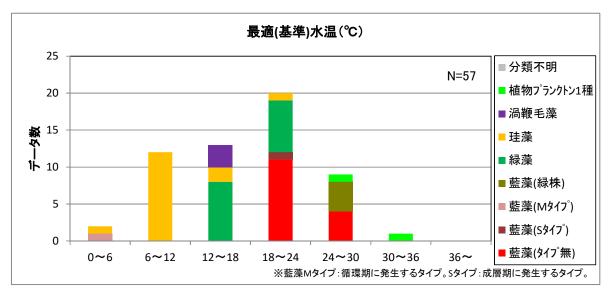


図 4-10 最適(基準)水温のパラメーター設定状況

3)温度係数

最適(基準)水温の温度係数である。一般値としては、1.05であり、文献値からの標準設定値は $1.02\sim1.10$ である。整理の結果は、 $1.04\sim1.06$ が最多で、おおむね標準設定値範囲であった。

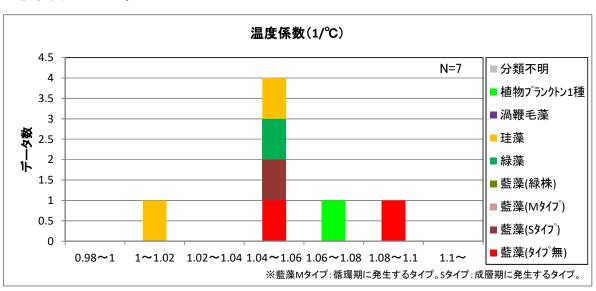


図 4-11 温度補償定数のパラメーター設定状況

4) 最適日射量

最適日射量は、植物プランクトンが最も増殖しやすい日射条件を示すものであり、最適 (基準)水温と同様に、植物プランクトンの藻類種別に傾向が異なった。その傾向も最 適水温と同様に、珪藻類<緑藻類・渦鞭毛藻類<藍藻類 となっていた。

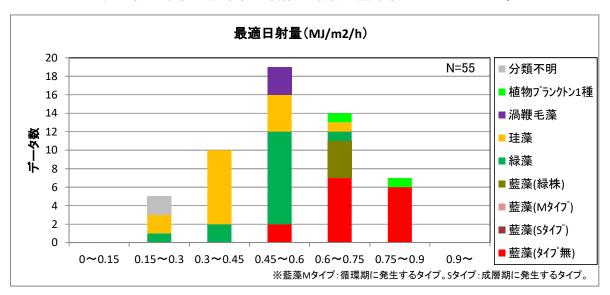


図 4-12 最適日射量のパラメーター設定状況

5) 枯死速度の定数

植物プランクトンの枯死速度を決める定数である。文献値からの標準設定値は、0.004 ~0.5 である。藻類種別の傾向は特に確認されない。整理結果は、0~0.005 が最多で標準設定値範囲内の分布であった。

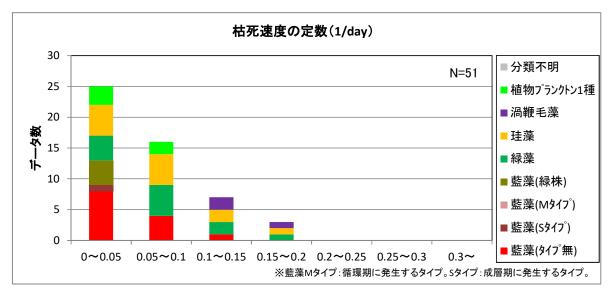


図 4-13 枯死速度の定数のパラメーター設定状況

6) 沈降速度

植物プランクトンの沈降速度である。文献値からの標準設定値は、 $0\sim1.0$ m/日である。 藻類種別の傾向は特に確認されない。整理結果は、 $0\sim0.1$ が最多で、標準設定値範囲内 でやや小さい値を採用している場合が多かった。

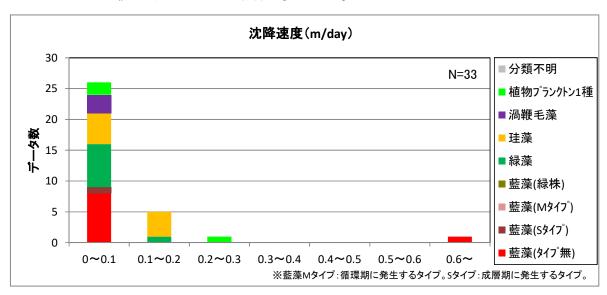


図 4-14 沈降速度のパラメーター設定状況

4-9. 将来水質予測・水質改善対策の検討に関する事例

水質シミュレーションを用いた将来水質予測及び水質改善対策の実施・検討に関して参考となる事例について紹介する。

将来気候において、想定される富栄養化の進行や底層嫌気化について、貯水池の規模別に数値シミュレーションを行い、ダム貯水池の将来水質を予測した事例が報告されている。また、将来の水質予測に加えて、影響が大きいRCP 8.5 シナリオにおける富栄養化や底層嫌気化への改善対策効果について検討が実施されており、主な対策手法として富栄養化では、気泡式循環施設や選択取水、流入水制御フェンス、底層嫌気化では、選択取水や高濃度酸素供給装置などの効果について計算を行い、対策手法の有効性について整理を行っている。

	気候変動による停滞性水域の熱・物質循環と水質環境への影響評価と適応策に関			
論文名	する研究			
	(気候変動にともなう流域からダム貯水池・湖沼に流入する土砂量・栄養塩負荷量の変化の			
	把握、ダム貯水池・湖沼の水質予測手法の構築と水質への影響評価、適応策の検討)			
著 者	石神孝之, 宮川仁, 中西哲, 小川文章, 對馬育夫, 服部啓太			
出典	平成30年度研究開発プログラム報告書			
	(13. 地域の水利用と水生生態系の保全のための水質管理技術の開発)			
	国立研究開発法人土木研究所, 26-39, 2019			

4-10. 指定湖沼等における水質シミュレーションに関する情報

湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼における湖沼水質保全計画の作成時やその 他湖沼での水質保全設備の導入時の水質シミュレーション実施状況を参考に紹介する。

指定湖沼は、ダム貯水池に比べると水面積に対して水深が浅く、形状が複雑である湖沼が多い。水質シミュレーションは、水質汚濁に係る環境基準の達成に向けた水質管理を目的とした実施事例が多く、シミュレーションモデルとしては、水平方向及び水深方向にメッシュ分割して計算する「平面二次元多層モデル*」が多く適用されている。

※流れの鉛直方向の加速度を無視しても流れ場の再現に問題がない場合に水圧を静水 圧分布で仮定する「静水圧近似」を適用しているモデルを示す。(2-13ページに詳述)

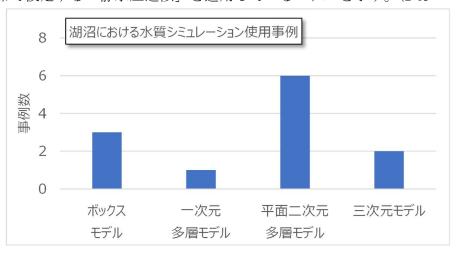


図 4-15 指定湖沼等における水質シミュレーション使用事例数

水質の解析項目は、植物プランクトンの消長を考慮した低次生態系モデルを使用している例が殆どであり、中には底泥モデルとの組み合わせや魚や二枚貝を考慮した高次生態系モデルの例もある。

次ページ以降に指定湖沼等における水質シミュレーションの実施概要を示す。

式 · 。 旧是關語(1007 0次頁)(120 0次頁頁目の評析 10%			
計算項目	構築状況		
植物プランクトン	1~4種の種類が考慮されている。2種類を採用している事例が最も多い。		
窒素	無機態窒素(リン)、有機態窒素(リン)を区分して考慮されている。		
	さらに、それぞれを溶存態・懸濁態に区分したり、有機態窒素を易分解性と		
リン	難分解性に区分したりする例、無機態窒素を各物質(窒素: NO ₃ -N,		
	NO ₂ -N,NH ₄ -H、リン:PO ₄ -P)に区分する例、等の例がある。		
COD	COD は溶存態・懸濁態に区分して考慮されている。現地観測結果からの相		
	関関係を用いて、有機物量(TOC)から換算する例も多い。		
その他	動物プランクトン、SS、DO、透明度等が計算されている例がある。		

表 4-6 指定湖沼等における水質シミュレーションでの水質項目の解析状況

表 4-7 指定湖沼等における水質シミュレーションに関する情報 (1/3)

湖沼名	霞ヶ浦	印旛沼•手賀沼	琵琶湖	児島湖
湖沼諸元	茨城県	千葉県 印旛沼/手賀沼	滋賀県•京都府	岡山県
面積[km²]	219.9	11.55/6.5	670.25	10.88
容積[m³]	約 8.5 億	27,700 千/5,600 千	275 億	26,072 千
平均水深[m]	約 4	1.7/0.86	41.2	かんがい期 2.1
最大水深[m]	7	2.5/3.8	103.58	9
流域面積[km²]	2,157	487.18/150.16	3,174	543.66
平均滞留日数	約 200 日	約 22 日/約 13.9 日	約5年	約 11 日
水質シミュレーション	水質改善対策の効	湖沼水質保全計画	湖沼水質保全計画	湖沼水質保全計画
実施の目的	果検証	の策定(目標値の設定)	の策定(目標値の設定)	の策定(目標値の設定)
実施者	国土交通省	千葉県	滋賀県	岡山県
流動モデル	ボックスモデル	平面二次元多層モ デル		平面二次元多層モ デル
平面分割	7分割			160×160m メッシュ
如巨刀 司	西浦4ブロック 北浦2ブロック 外浪逆浦	0.5m	12 層に分割	2 層、3 層 (水域と底層)
生態系モデル	湖水モデルと底泥モ デルの組み合わせ 生態系モデル	低次生態系モデル	魚類等高次捕食者 も含めた生態系モデ ル	一次生産者と分解者 を考慮した生態系モ デル
植物プランクトン	4 種	2 種	3 種	1 種
窒素	無機態窒素 有機態窒素 (溶存・懸濁)	無機態窒素 有機態窒素 (溶存・懸濁)	有機態窒素(難分解	無機態窒素 有機態窒素(難分解 性·易分解性)
リン		無機態リン 有機態リン (溶存・懸濁)	無機態リン 有機態リン(難分解	無機態リン 有機態リン(難分解 性・易分解性)
COD	溶存態·粒子態	TOC から換算 (統計データから)	TOC から換算 (統計データから)	TOC から換算 (統計データから)
その他	SS(無機・有機)、 DO を考慮	動物プランクトン、 TOC(溶存・懸濁)、 SS、DO を考慮	SS(難分解性・易分 解性)、動物プランク トン、沈水植物、鉄を 考慮	SS、DO、pH を考慮
入力条件の設定				
流入水量	実測値	法++-1。## FF 在 TE -	7+4+1,44 FF 4F 7四 一	旧自知法はマゴ、
流入負荷量	LQ 式から算出		陸域水物質循環モ	
流入水温	_	アルによる	デルによる解析結果	による
その他	透明度をCOD、SS,クロロフィルaから算出			
出典	関東地方整備局資料	千葉県資料	滋賀県資料	岡山県資料

表 4-8 指定湖沼等における水質シミュレーションに関する情報 (2/3)

湖沼名	釜房ダム貯水池	諏訪湖	宍道湖	胡•中海
湖沼諸元	宮城県	長野県	島根県、鳥取県	
19)1 10 10 7	百%不	及月东	宍道湖/中海	
面積[km²]	195.25	13.3	81.8/92.1	
容積[m³]	39,300 千	62,987 千	366,000 ← ∕521,000 ←	
平均水深[m]	11.6	4.7	4.5 / 5.4	
最大水深[m]	43.6	7.2	6.4 / 8.4	
流域面積[km²]	195.3	531.8	1288.4/595	
平均滞留日数【日】	約 47 日	39 日	110 日/146 日	
水質シミュレーション	湖沼水質保全計画	湖沼水質保全計画	くぼ地埋め立ての効	湖沼水質保全計画
実施の目的	の策定目標値の設定)	の策定(目標値の設定)	果検証	の策定(目標値の設定)
実施者	宮城県	長野県	_	島根県、鳥取県
流動モデル	一次	ボックス間の移流拡 散モデル	平面二次元多層モ デル	平面二次元多層モ デル
平面分割	縦断方向 200m	1 領域	1/3km 格子	数十~1km 格子
鉛直分割	1 m	2 層	2~5m のレベル座標 とシグマ座標 (3,8 層)を併用	ングマ座標 (約 0.5m、32 層)
生態系モデル	低次生態系モデル	低次生態系モデル	低次生態系モデル	水質-底質結合生態 系モデル
植物プランクトン	1種	2 種	4 種	2 種
窒素	無機態窒素 有機態窒素	無機態窒素 有機態窒素 (非生物態)	無機態栄養塩 (NH ₄ -N,NOx-N) 粒子態栄養塩	溶存無機栄養塩 (NH ₄ -N、NO ₂ -N、 NO ₃ -N)
リン	無機態リン有機態リン	無機態リン 有機態リン (非生物態)	無機態栄養塩 (PO ₄ -P) 粒子態栄養塩	溶存無機栄養塩 (PO4-P)
COD	COD として計算	COD として計算	COD として計算	COD として計算
その他	DO を考慮	DO、 動物プランクトン	DO を考慮	DO、動物プランクトン、底泥での堆積・拡散を考慮
入力条件の設定				
流入水量	ダム流入量より			実測値より設定
流入負荷量	LQ 式(土地利用状 況から推定)	年間流入負荷量を 降雨の変動に合わ せて季節別に配分	LQ 式より設定	流域汚濁負荷モデ ルによる解析結果
流入水温	気象台 3 日移動平 均値との相関	湖心の観測値を使用	_	代表河川の実測とア メダスの相関式から 設定
その他	気泡式循環装置と深 層曝気装置を考慮	養殖・温泉・ガス井 戸からの負荷も考慮		海藻、ヤマトシジミの ろ過効果を考慮
出 典	宮城県資料	長野県資料	_	島根県・鳥取県資料

表 4-9 指定湖沼等における水質シミュレーションに関する情報 (3/3)

湖沼名	野尻湖	八郎湖	網走湖	小川原湖
湖沼諸元	長野県	秋田県	北海道	青森県
面積[km²]	4.55	47.3	32.3	63.2
容積[m³]	96,000 千	132,600 千	240,000 千	714,000 千
平均水深[m]	20.8	2.8	6.1	約 11
最大水深[m]	38.3	10	16.1	25.0
流域面積[km²]	185.3	894.3	1,380	805.4
平均滞留日数	738 日	約 26 日	_	_
水質シミュレーション	湖沼水質保全計画	湖沼水質保全計画	青潮の発生機構解	水質改善対策の効果
実施の目的	の策定(目標値の設定)	の策定(目標値の設定)	明と対策検討	検証
実施者	長野県	秋田県	国土交通省	国土交通省
流動モデル	ボックス間の移流拡 散モデル	平面二次元多層モ デル	三次元モデル	三次元モデル
平面分割	4 ボックス	200×200m メッシュ	100×100m 程度	100×100m 程度
鉛直分割	1~2m、最大 25 層	2m	0.2~2m(52 層)	0.2~1m
生態系モデル	低次生態系モデル	低次生態系モデル		低次生態系モデル/ 高次生態系モデル
植物プランクトン	2 種	2 種	,	1 種(ライフサイクルを考慮)
窒素	無機態窒素	無機態窒素 (NH4-N、NO2-N、 NO3-N) 有機態窒 (溶存・懸濁)		無機態窒素 有機態窒素 (溶存·懸濁)
リン	無機態リン 有機態リン (溶存・懸濁)	無機態リン(PO ₄ -P) 有機態リン (溶存・懸濁)	_	無機態リン (溶存・懸濁) 有機態リン (溶存・懸濁)
COD	COD(溶存・懸濁)と して計算	TOC(溶存・懸濁)か ら換算	_	COD として計算
その他		動物プランクトン、 DO を考慮	_	動物プランクトン
入力条件の設定				
流入水量	提供データを使用		実測値より設定	水質調査結果を鉛直
流入負荷量	原単位法とLQ 式に より設定	流域水物質循環モ	_	小 負調 食 結果 を 新 直 二 次 元 モ デ ル で 補 間
流入水温	定期調査とアメダス の相関式から設定	デルによる解析結果		定期調査とアメダスの 相関式から設定
その他	透明度をクロロフィル から換算	第 7 期湖沼計画策 定時のシミュレーショ ンの概要		二枚貝による浄化を考 慮
出典	長野県資料	秋田県資料	北海道開発局資料	東北地方整備局資料

- 索

V

Vollenweider2-11, 2-22, 2-23, 2-25

あ

アオコ 2-3, 2-6, 2-7, 3-7, 4-62

え

鉛直一次元モデル 2-11, 2-13, 2-14, 2-21, 4-5, 4-43 鉛直二次元モデル2-11, 2-13, 2-14, 2-21, 3-1, 3-11, 3-12, 3-13, 3-22, 3-23, 3-24, 3-26, 4-3, 4-4, 4-5, 4-81

か

カビ臭 2-2, 2-3, 2-6, 2-7, 3-20, 4-56, 4-59, 4-73

き

気泡式循環施設.....2-6, 2-10, 2-20, 2-21, 3-3, 3-20, 4-56, 4-77

境界条件......2-11, 3-3, 3-5, 3-15, 3-21, 3-22, 4-67

<

クロロフィル a ... 3-12, 3-17, 3-26, 3-27, 3-28, 4-5, 4-79

け

現況再現性.......2-4, 3-3, 3-5, 3-6, 3-21, 3-29 検証2-4, 2-6, 2-9, 2-10, 2-16, 2-17, 2-18, 2-20, 2-24, 3-2, 3-3, 3-5, 3-6, 3-7, 3-14, 3-21, 3-22, 3-23,

引 —

3-24, 3-26, 3-27, 3-28, 3-29, 3-30, 3-37, 4-56, 4-65, 4-66, 4-68, 4-69, 4-79, 4-80, 4-81

さ

サブモデル......3-20, 4-56 三次元モデル.....2-11, 2-13, 2-14, 2-21, 3-14, 4-55, 4-81

L

指定湖沼.......2-7, 4-62, 4-78, 4-79, 4-80, 4-81 植物プランクトン.....2-1, 2-3, 2-8, **2-11**, **2-12**, 3-5, 3-12, 3-17, 3-20, 3-21, 3-26, 3-27, 4-5, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17, 4-18, 4-19, 4-21, 4-22, 4-25, 4-26, 4-28, 4-29, 4-30, 4-32, 4-33, 4-34, 4-35, 4-36, 4-37, 4-38, 4-40, 4-56, 4-59, 4-73, 4-74, 4-75, 4-76, 4-78, 4-79, 4-80, 4-81

す

水質改善 1-1, 1-2, 1-4, 2-2, 2-4, 2-6, 2-7, 2-9, 2-17, 2-20, 2-21, 2-25, 3-2, 3-3, 3-20, 3-30, 3-31, 3-37, 3-38, 4-1, 4-57, 4-58, 4-60, 4-77, 4-79, 4-81 水質管理目標2-4, 2-7, 3-2, 3-30, 3-37 水質変化現象1-2, 1-3, 2-2, 2-3, 2-4, 2-7, 2-10, 2-15, 2-16, 3-2, 3-5, 3-6, 3-16, 3-17, 3-20, 3-30, 3-37, 4-2

せ

生態系モデル3-6, 3-12, 3-23, 3-26, 4-5, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17, 4-38, 4-73, 4-78, 4-79, 4-80, 4-81

た

濁水長期化. 1-2, 2-2, 2-4, 2-6, 2-7, 2-15, 2-20, 3-2, 3-30, 4-2

ち

窒素 2-2, 3-12, 3-17, 3-26, 3-27, 4-5, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17, 4-20, 4-21, 4-26, 4-30, 4-31, 4-34, 4-35, 4-36, 4-37, 4-38, 4-40, 4-41, 4-41, 4-78, 4-79, 4-80, 4-81

7

底層嫌気化.......4-77 データレビュー2-17, 3-2, 3-5, 3-7, 3-8, 3-10, 3-29, 3-37, 4-62

は

パラメーター .2-10, 2-15, 2-16, 3-3, 3-6, 3-7, 3-21, 3-22, 3-26, 3-29, 3-38, 4-19, 4-21, 4-23, 4-24, 4-25, 4-26, 4-27, 4-28, 4-29, 4-30, 4-31, 4-32, 4-33, 4-34, 4-38, 4-39, 4-40, 4-41, 4-42, 4-73, 4-74, 4-75, 4-76

Š

富栄養化....1-2, 2-2, 2-4, 2-6, 2-7, 2-10, 2-11, 2-15,

2-22, 2-23, 2-25, 3-2, 3-12, 4-1, 4-2, 4-15, 4-43, 4-58, 4-67, 4-77

ほ

ボックスモデル......2-11, 2-12, 2-14, 2-18, 4-79

4

水理・水質現象.....2-1, 2-10, 2-11, 2-12, 3-29, 4-1

め

メッシュ.....2-12, 2-14, 2-15, 3-1, 3-11, 3-13, 3-14, 3-18, 3-19, 3-22, 3-35, 3-38, 4-7, 4-10, 4-55, 4-78, 4-79, 4-81

5

藍藻類 2-16, 4-59, 4-73, 4-74, 4-75

ŋ

流動モデル…2-13, 2-18, 2-19, 3-1, 3-5, 3-11, 3-21, 3-23, 4-55, 4-79, 4-80, 4-81

リン.... 2-2, 2-23, 3-12, 3-17, 3-26, 3-27, 3-37, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17, 4-20, 4-21, 4-25, 4-28, 4-29, 4-34, 4-35, 4-36, 4-38, 4-40, 4-40, 4-78, 4-79, 4-80, 4-81