

6 水質予測

(1) はじめに

平成 24 年 12 月に東京大学，鹿児島大学，指宿市，一般財団法人鹿児島県環境技術協会及び鹿児島県からなる「池田湖底層水質改善方策検討会」を設置し，池田湖の水質等に係る調査・分析を行い，その結果を基に数値モデルを用いた水質再現シミュレーションを行うとともに，底層水質の改善方策の効果について水質予測シミュレーションにより検討を行っている。この数値モデルは，東京大学の北澤氏らによるものであり，池田湖に流入及び流出する水量・水質と気象等に関するデータ並びにプランクトンの代謝・呼吸や窒素・リンの濃度などから構成されており，これまで池田湖における水質再現と無酸素化の原因究明について研究がなされている^{資料 1)～2)}。

以下に水質予測モデルの概要，水質再現・将来予測シミュレーションの検討結果を示す。

資料

- 1) 梶並真充・北澤大輔・長谷川直子（2010）：1980 年代の池田湖の水質シミュレーション，日本水環境学会年会講演集，44，233
- 2) 北澤大輔（2016）：池田湖の水質改善効果の数値シミュレーション，生産研究，69(1)，31-34

(2) 水質予測モデルの概要

池田湖の水質変化のメカニズムを把握するために，流れ場・生態系結合数値モデルを用いた再現シミュレーションを実施している。流れ場・生態系結合数値モデルの基本的な構造は図 VI-96 に示すとおりである。まず，地形条件・気象条件・河川流入条件・汚濁負荷条件を収集，整理し，流れ場・生態系結合数値モデルに入力する。流れ場モデルからは，水位，流速，水温，密度が出力される。境界条件と流れ場モデルの出力の一部を生態系モデルに入力し，プランクトン（植物プランクトン，植物プランクトン細胞内のりんと窒素，動物プランクトン），非生物有機物（懸濁態有機物，溶存態有機物），栄養塩（無機態りん，無機態窒素），溶存酸素の各濃度について出力を得る。これらの出力より，水温，溶存酸素量，COD，全窒素，全りんを評価している。

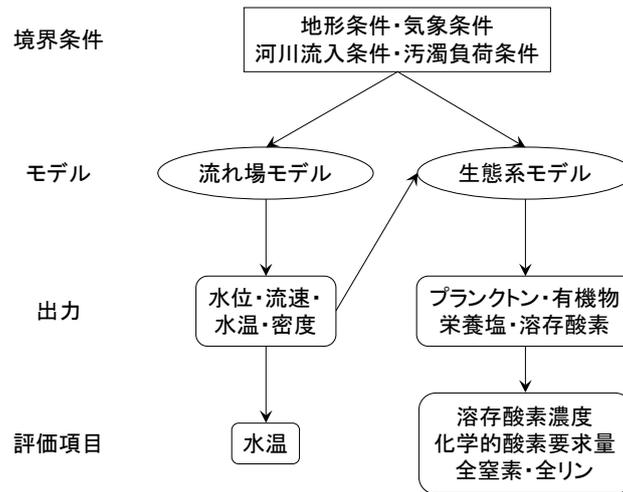


図 VI-96 流れ場・生態系結合数値モデルの基本的な構造

ア シミュレーション条件

シミュレーション条件は表 VI-50 に示すとおりである。現況再現 (Case 1) では、昭和 50 年 3 月 1 日から平成 27 年 2 月 28 日までの 40 年間の現況再現シミュレーションを実施している。

将来予測 (Case 2) では、Case 1 の結果を初期値とした将来 100 年間の予測シミュレーションであり、平成 27 年 3 月 1 日から 100 年間の計算結果である。シミュレーションのシナリオとしては、複数の温暖化シナリオを想定し、気温が過去 20 年間で同等である場合、気温が 100 年間に 2℃上昇する場合、気温が 100 年間に 5℃上昇する場合の 3 通りである。

表 VI-50 シミュレーション条件

予測内容	条件名	計算期間 (年)	気温上昇度 (℃/年)
現況再現	Case 1	40	—
長期予測	Case 2-1	100	—
	Case 2-2	100	0.02
	Case 2-3	100	0.05

イ 境界条件

(ア) 地形条件

水平方向 1,000m、深さ方向 2.5m 幅の格子を用い計算をしている (図 VI-97)。最大水深が 233m であるため、鉛直方向の最大層数は 93 層 (232.5m) である。流入河川は大谷川、田神川、新永吉川、第 1 尾下川、第 2 尾下川であり、流出河川は新川である。畑かんへの送水は東部揚水機場、西部第 1 揚水機場、南部揚水機場で行われており、導水 3 河川 (馬渡川、高取川、集川) からの導水は西部第 1 揚水機場で行われている。

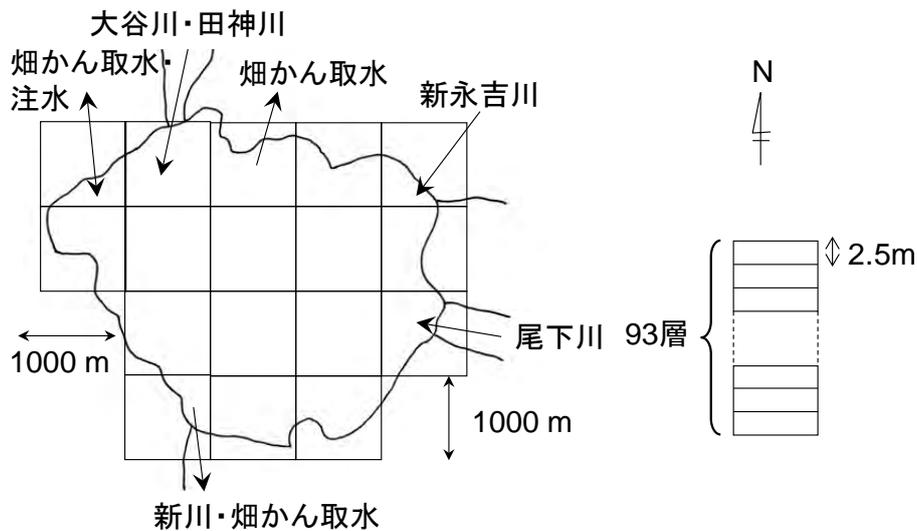


図 VI-97 池田湖の格子分割図

(イ) 気象条件

気象条件は、鹿児島地方気象台、指宿地域気象観測所で計測されたデータと、平成 24 年 5 月～平成 25 年 2 月にかけて池田湖周辺で計測されたデータを用いて設定した。

(ウ) 河川流入条件

池田湖水収支調査委託事業報告書（鹿児島県，昭和 55 年）における湖面への降水量と流域からの流入量の比（表 VI-7 参照）を用いて、各月の降水量より各月の流入量を算定した。また、鹿児島大学水産学部紀要第 7 号における各河川の平水時の流入量（表 II-2 参照）を用いて、池田湖への各月の流入量を各河川の平水時の流入量の比に応じて振り分けた。導水 3 河川からの導水量については月ごとの実測値を計算に使用した。

(イ) 汚濁負荷条件

汚濁負荷として、非生物の懸濁態有機物，溶存態有機物，無機態りん，無機態窒素の濃度を与える必要がある。直接集水域においては，昭和 55 年度以降の汚濁負荷量の推移とそれぞれに関連する分析項目濃度の推移から，各濃度を想定した。畑かんの汚濁負荷については，馬渡川，高取川，集川の月ごとの導水量と各濃度の測定値を使用した。直接集水域の汚濁負荷は流入河川を通じて，畑かんの汚濁負荷は導水 3 河川からの導水により池田湖に流入するものとした。また，汚濁負荷ではないが，流入河川水と導水 3 河川の導水の水温と溶存酸素量については，水温は気温と同じであると仮定し，溶存酸素量は水温から計算される飽和酸素量であると仮定し計算に用いた。

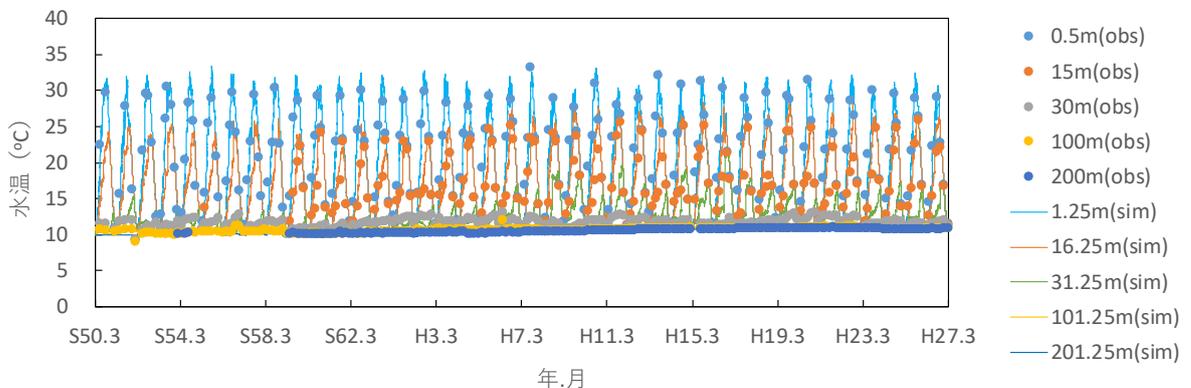
(3) 現況再現及び将来予測

ア 現況再現

本報で用いている数値モデルは、観測結果を十分に再現できていない部分は残されているものの、全層循環の発生のタイミングや貧酸素化の経緯、貧酸素化による栄養塩濃度の変動、有機物質の濃度の変動などの基本的な水質を再現した。

(7) 水温

観測結果によると、水温は水面下 30m 以深では概ね 13℃以下となっている。シミュレーション結果は、水面下 30m 付近の水温がやや高くなっているものの、観測結果を概ね再現できていた。表層と底層の水温差がほぼなくなったときに底層まで達する鉛直循環が発生するが、シミュレーション結果では、昭和 58 年度、平成 22, 23 年度の 2~3 月ごろに水温差がほぼ 0℃となっていた。

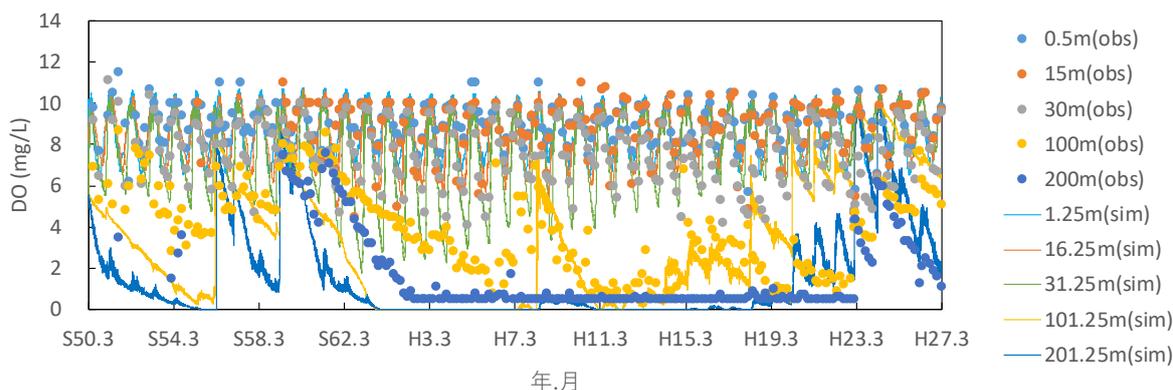


※ “obs” は観測値を，“sim” は計算値を示す。

図 VI-98 水温変動の比較

(イ) 溶存酸素量

観測結果では、昭和 59 年に加えて、昭和 61 年にも全層循環が発生している様子がみられた。一方、シミュレーション結果では、昭和 61 年には全層循環が発生しておらず、水面下 101.25m と 201.25m の溶存酸素量変動は観測結果に比べて 2 年程度先行していた。平成 8 年には、観測結果、シミュレーション結果で、水面下 100m 付近の溶存酸素量が上昇していたが、水面下 200m 付近では貧酸素状態が継続していた。その後、平成 23 年と平成 24 年の全層循環にともなって、水面下 200m 付近の溶存酸素量が上昇していたが、その後再び下降している様子が分かる。

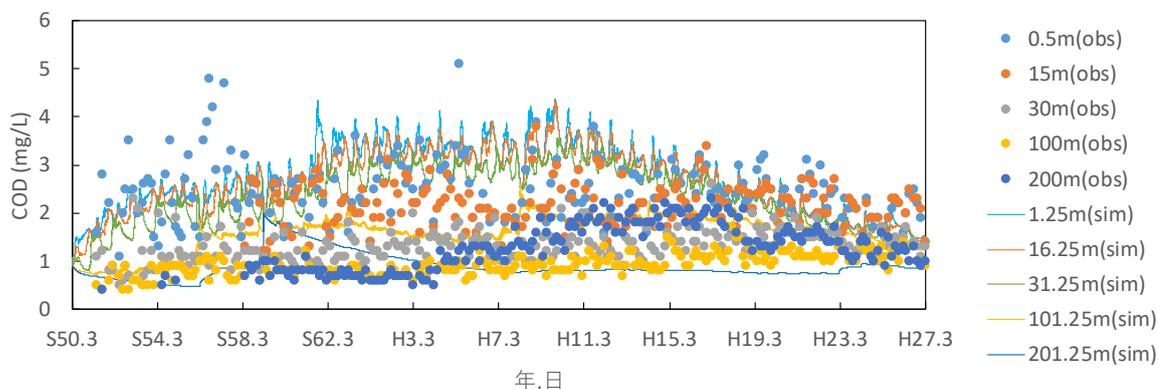


※ “obs” は観測値を，“sim” は計算値を示す。

図 VI-99 溶存酸素量変動の比較

(ウ) COD

観測結果によると、表層では昭和 50 年代に 5mg/L に達することもあったが、昭和 60 年代に入ってからはおおむね 4mg/L 以下となっており、近年は低下傾向にあった。深度が大きくなると COD も小さくなっており、深度 100m ではおおむね 1mg/L 程度となっていた。ただし、観測値では、深度 200m の COD が平成 4 年頃から上昇していた。この期間は、底層がおおむね貧酸素となった期間と対応しているため、貧酸素の影響を受け、COD が上昇した可能性がある。シミュレーション結果では、深度 200m で COD が上昇する様子は再現されていないものの、最も COD が高いときに表層で 3～4mg/L、底層で 1～2mg/L となっている様子が再現されていた。

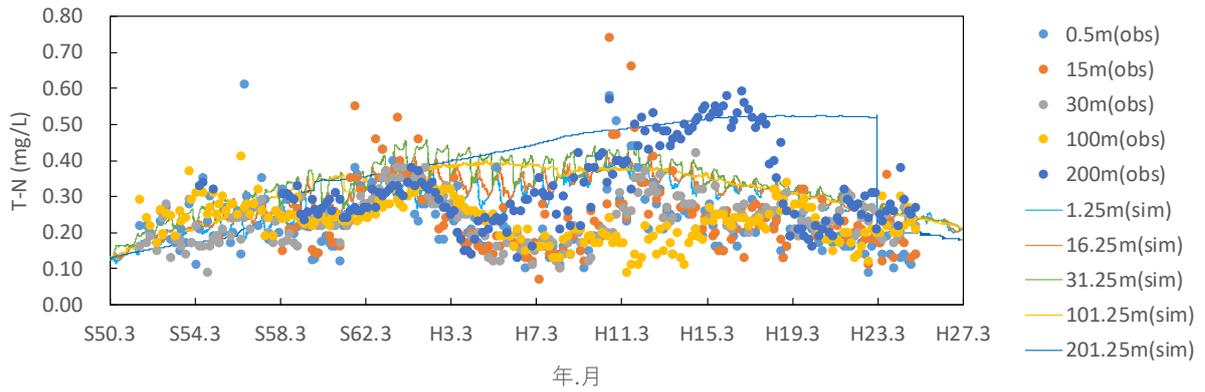


※ “obs” は観測値を，“sim” は計算値を示す。

図 VI-100 COD 濃度変動の比較

(エ) 全窒素 (T-N)

観測結果によると、底層で値が高くなる場合があるが、表層から底層で大きな差はみられず、おおむね 0.1～0.4mg/L の範囲で変動していた。観測値では、平成元年ごろに全窒素が小さくなる様子がみられたが、シミュレーション結果では、そのような傾向は見られなかった。平成 10 年代までは、底層を除いて、シミュレーション値が観測値よりも高い傾向にあったが、平成 20 年代以降はおおむね一致している。底層の全窒素は、平成 18 年頃に一度大きく低下したが、シミュレーション結果では、平成 23 年に全層循環が発生したときに大きく低下していた。



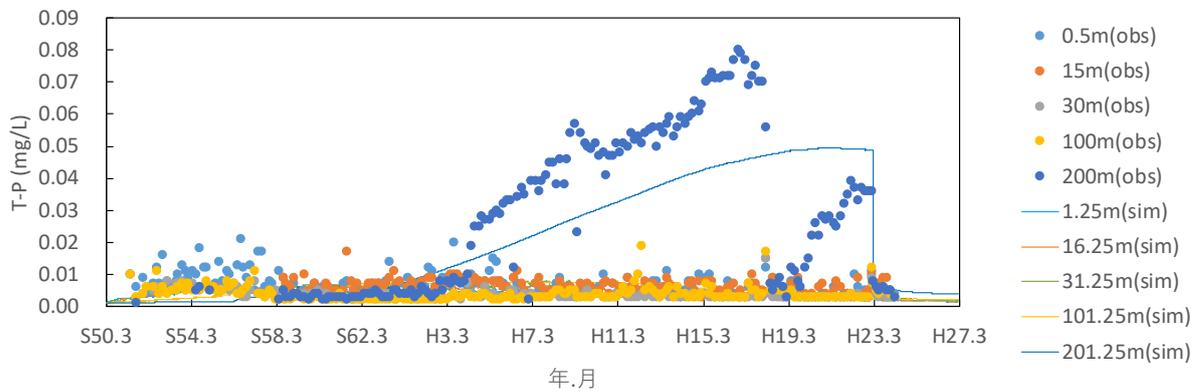
※ “obs” は観測値を, “sim” は計算値を示す。

図 VI-101 全窒素濃度変動の比較

(オ) 全りん (T-P)

観測結果によると, 全層を通じて値が小さくなっており, 昭和 50 年代に観測値がやや大きくなっているのを除けば, おおむね 0.01mg/L 以内となっている。一方, 底層が貧酸素化してからは, 底層の全りんが上昇し, 最大で 0.08mg/L 程度に達している。その後平成 18 年頃に一旦全りんが低下し, 再度上昇した後, 平成 23 年の全層循環で再び低下していた。

シミュレーション結果では, 貧酸素期間の底層の全りんの上昇率がやや低い点, 平成 18 年頃に全りんが低下していない点において観測値との相違がみられるが, 貧酸素期間に底層で全りんが上昇するなどの定性的な傾向は再現されていた。



※ “obs” は観測値を, “sim” は計算値を示す。

図 VI-102 全りん濃度変動の比較

イ 将来予測

(7) 水温

水温の将来予測シミュレーション結果は図 VI-103 に示すとおりであり、以下のように予測されている。

表層の水温は、気温の上昇に呼応して上昇するのに対し、底層の水温は上昇率が低く、気温や表層水温の上昇率の半分程度であった。したがって、Case 2-2 と Case 2-3 では、Case 2-1 で全層循環が起こっているときでも、表層と底層とで水温差が発生していた。

(イ) 溶存酸素量

溶存酸素量の将来予測シミュレーション結果は図 VI-104 に示すとおりであり、以下のように予測されている。

溶存酸素量は水温に依存するため、水温が上昇する Case 2-2、Case 2-3 では表層の溶存酸素量が低下していた。深度 101.25m では、Case 2-2 は溶存酸素量が全層循環時に飽和溶存酸素量近くまで回復しているが、Case 2-3 では、おおむね貧酸素状態となっていた。深度 201.25m では、Case 2-3 ではほぼ貧酸素状態であり、Case 2-2 でも溶存酸素量が低下し、貧酸素状態となっていた。

(ウ) COD

COD の将来予測シミュレーション結果は図 VI-105 に示すとおりであり、以下のように予測されている。

COD は、時間の経過とともに低下しているが、これはシミュレーション当初は過去の履歴を受けるためであり、100 年間の計算では汚濁負荷量を一定としていることから、COD は概ね一定値に近づいている。COD は、全層循環が発生しない場合は、表層との混合が減少するため、底層では低くなる傾向にあった。

(エ) 全窒素 (T-N)

全窒素 (T-N) の将来予測シミュレーション結果は図 VI-106 に示すとおりであり、以下のように予測されている。

全窒素は、底層で上昇する傾向にあった。

(オ) 全りん (T-P)

全りんの将来予測シミュレーション結果は図 VI-107 に示すとおりであり、以下のように予測されている。

全りんは、溶存酸素量の影響を強く受け、全層循環が発生する場合は低い値となるが、Case 2-2 や Case 2-3 では、全りんは高いままの値となっている。ただし、汚濁負荷量が一定であり、数値モデルにおいて無機態りんの溶出速度は、非生物有機物の沈降速度に依存することから、全りんが大幅に上昇する様子はみられなかった。

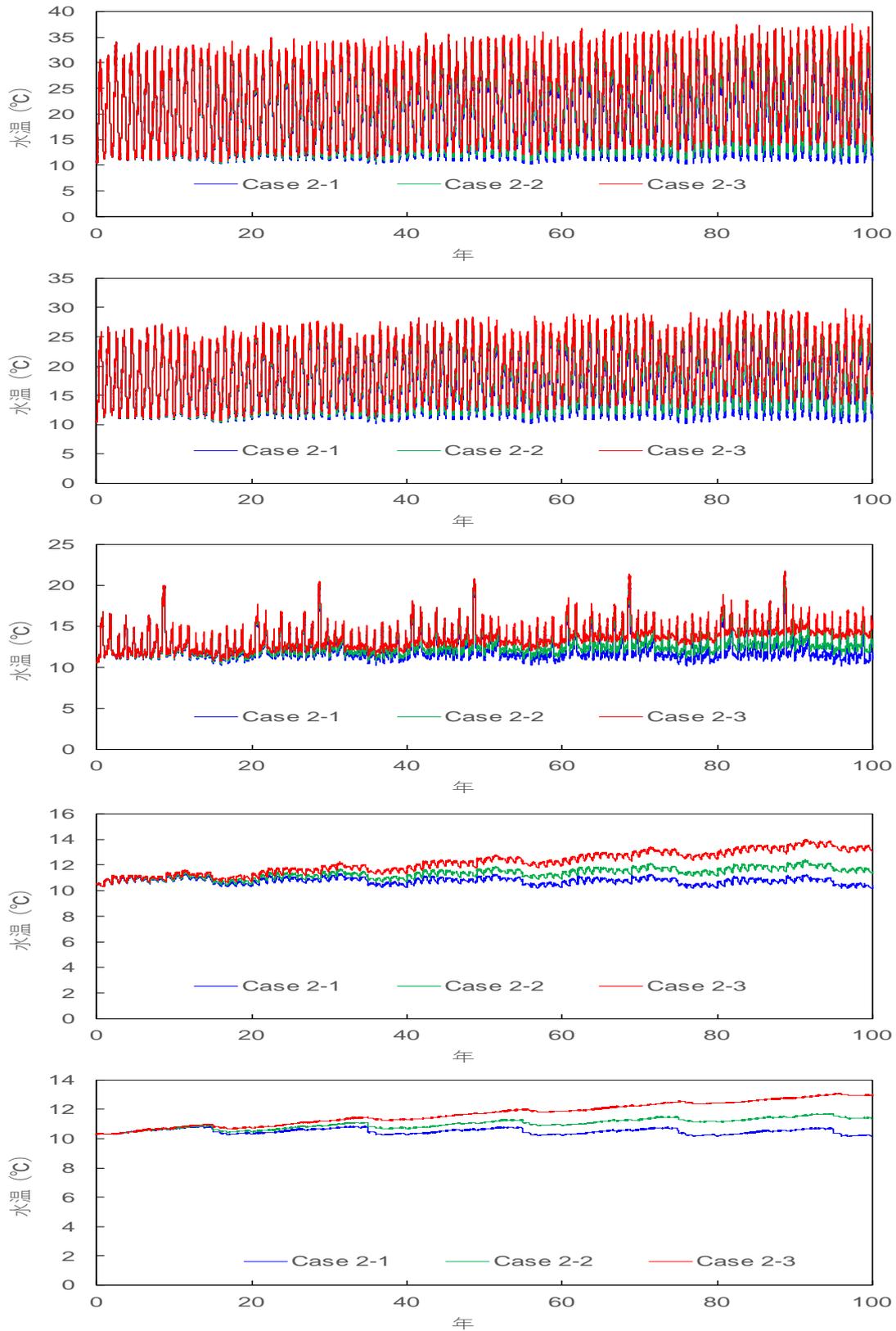


図 VI-103 層別の水溫長期變動予測

資料) 池田湖の底層水質の改善方策に係る報告書 (平成 29 年, 池田湖底層水質改善方策検討会)

注) 上から水面下 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m における予測結果であり, 今後 100 年間において平均気温が以下の条件で変化する場合を計算したものである。

Case 2-1: 過去 20 年間に比べて変化しない場合

Case 2-2: 線形に 2℃上昇する場合

Case 2-3: 線形に 5℃上昇する場合

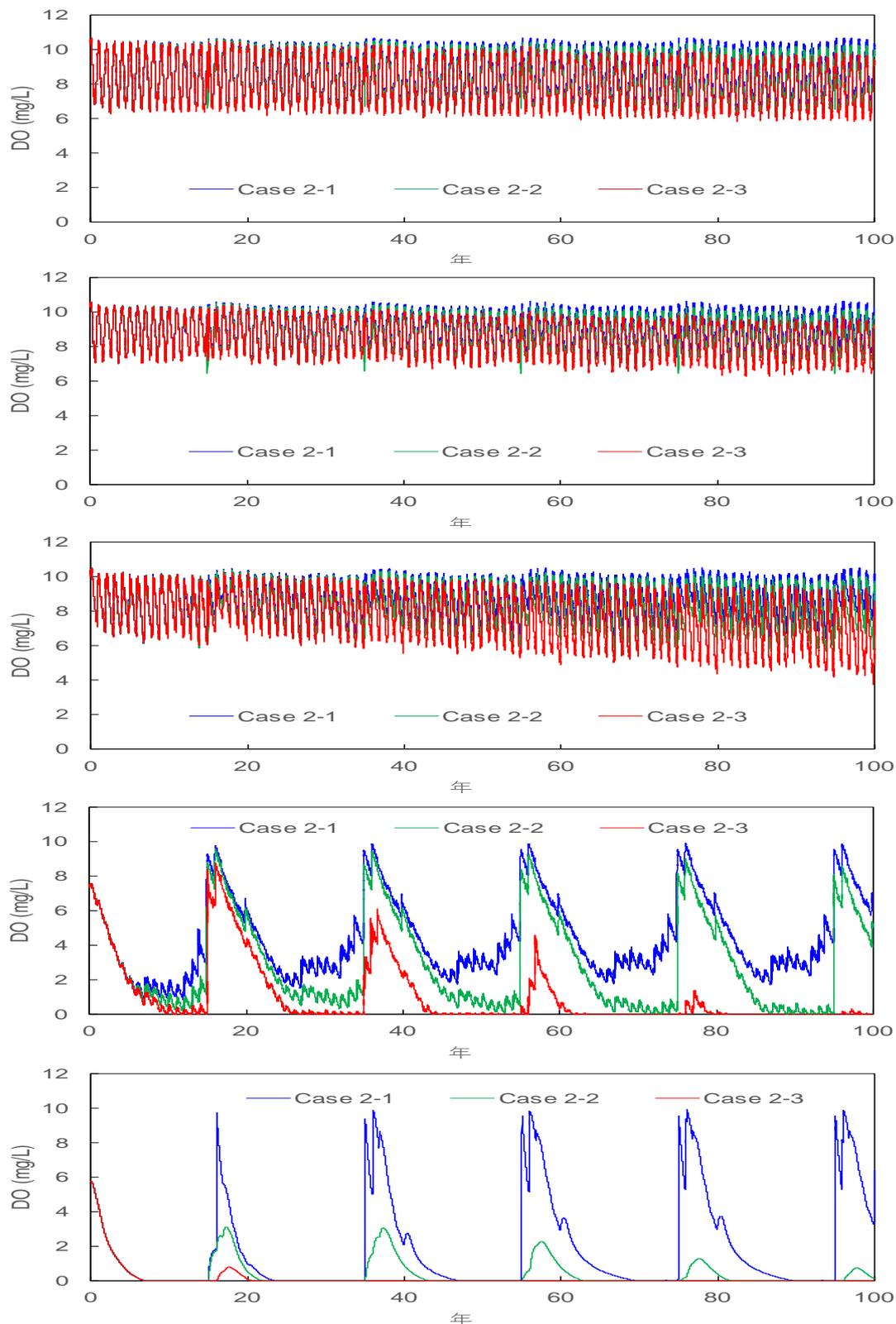


図 VI-104 層別の溶存酸素量長期変動予測

資料) 池田湖の底層水質の改善方策に係る報告書 (平成 29 年, 池田湖底層水質改善方策検討会)

注) 上から水面下 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m における予測結果であり, 今後 100 年間に於いて平均気温が以下の条件で変化する場合を計算したものである。

Case 2-1 : 過去 20 年間に比べて変化しない場合

Case 2-2 : 線形に 2℃ 上昇する場合

Case 2-3 : 線形に 5℃ 上昇する場合

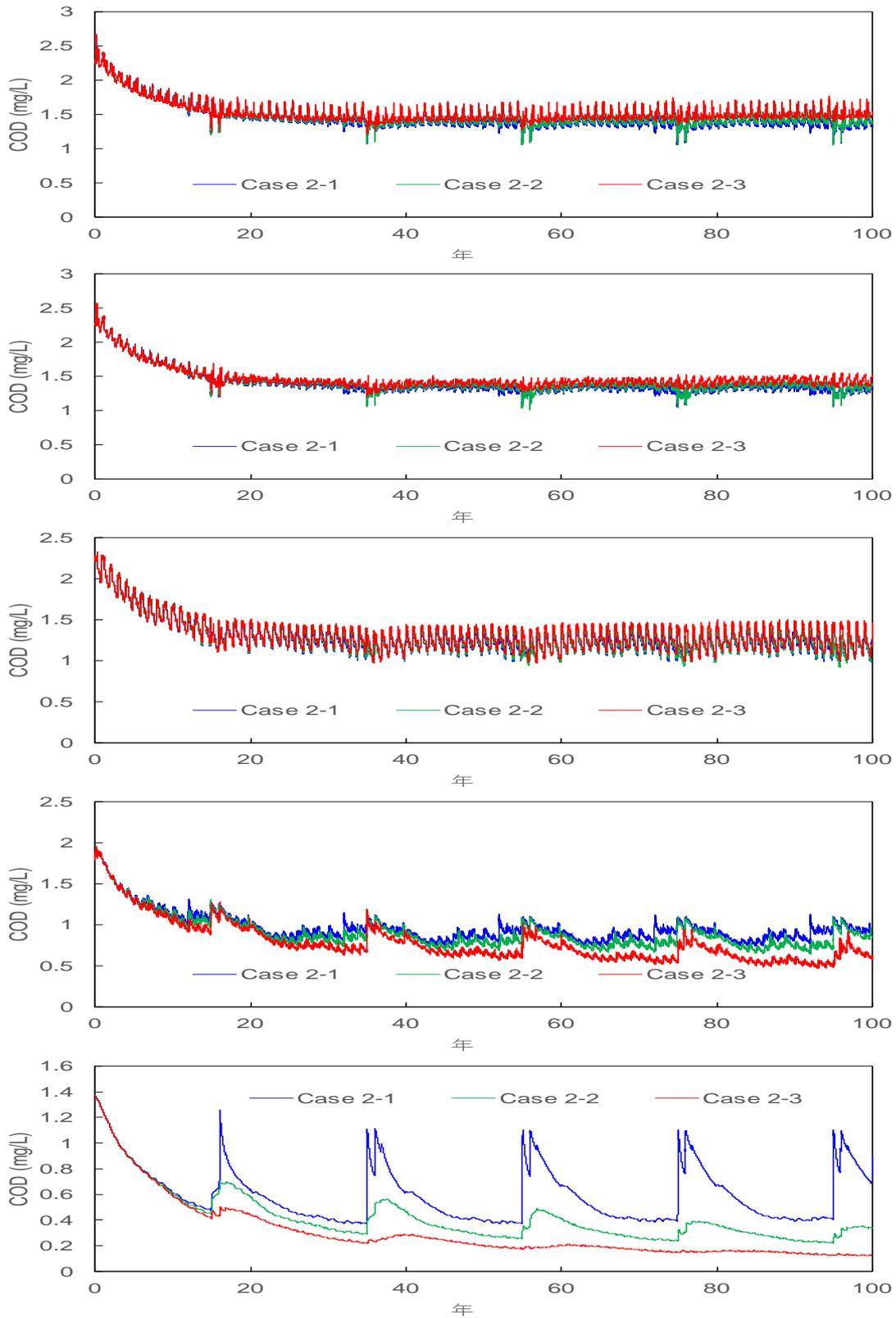


図 VI-105 層別の COD 長期変動予測

資料) 池田湖の底層水質の改善方策に係る報告書 (平成 29 年, 池田湖底層水質改善方策検討会)

注) 上から水面下 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m における予測結果であり, 今後 100 年間に於いて平均気温が以下の条件で変化する場合を計算したものである。

Case 2-1: 過去 20 年間に比べて変化しない場合

Case 2-2: 線形に 2℃ 上昇する場合

Case 2-3: 線形に 5℃ 上昇する場合

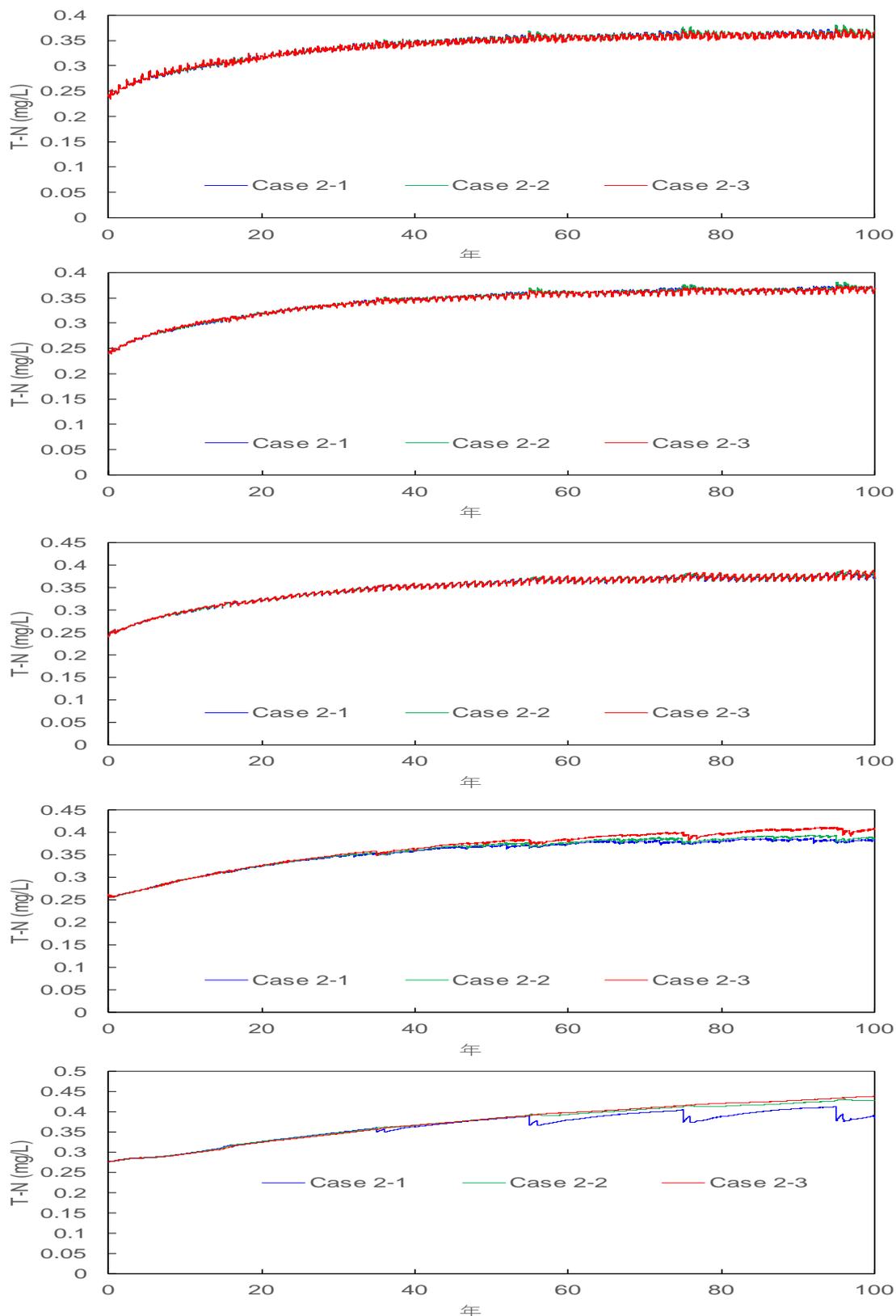


図 VI-106 層別の全窒素長期変動予測

資料) 池田湖の底層水質の改善方策に係る報告書 (平成 29 年, 池田湖底層水質改善方策検討会)

注) 上から水面下 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m における予測結果であり, 今後 100 年間に於いて平均気温が以下の条件で変化する場合を計算したものである。

Case 2-1 : 過去 20 年間に比べて変化しない場合

Case 2-2 : 線形に 2℃上昇する場合

Case 2-3 : 線形に 5℃上昇する場合

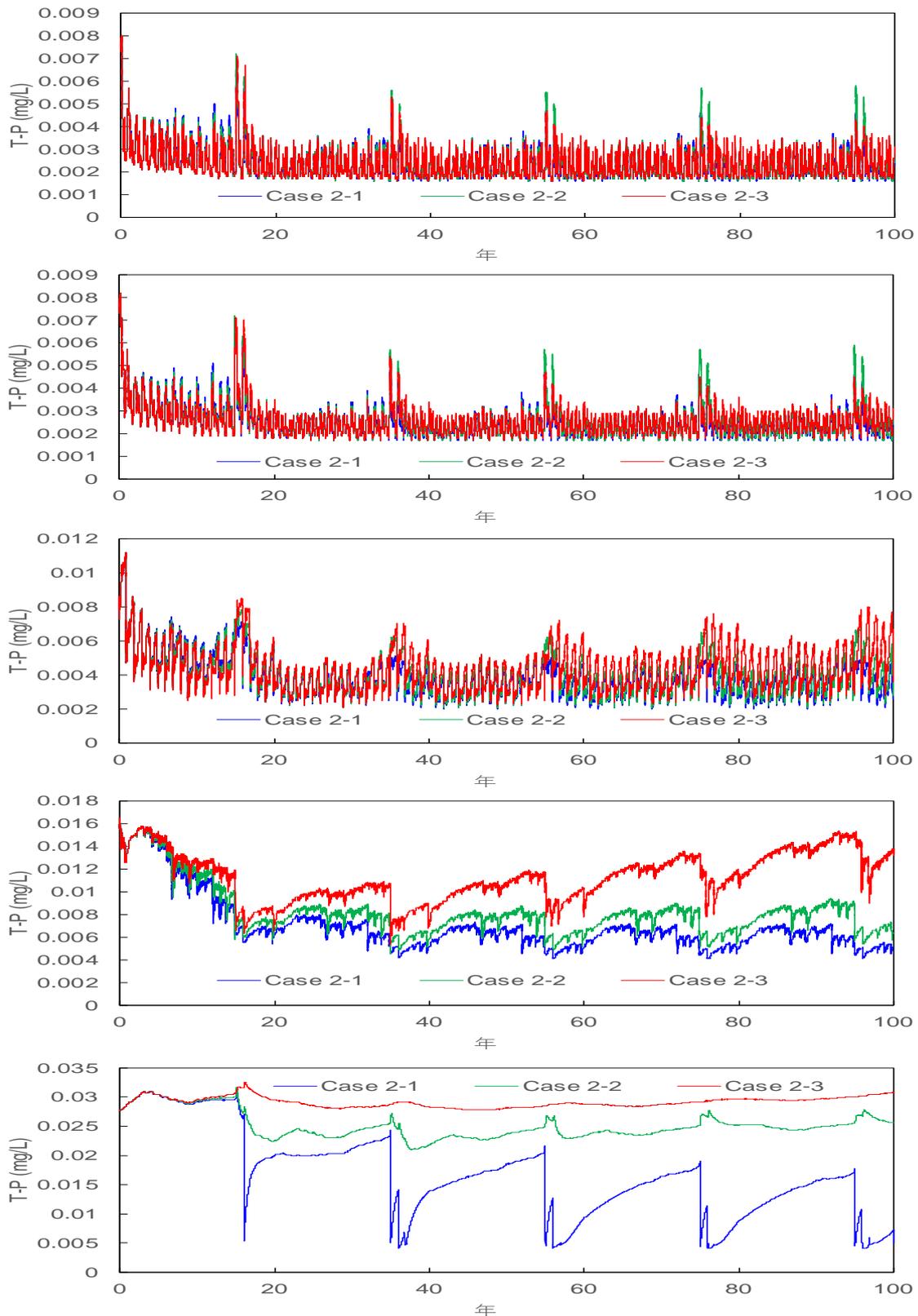


図 VI-107 層別の全りん長期変動予測

資料) 池田湖の底層水質の改善方策に係る報告書 (平成 29 年, 池田湖底層水質改善方策検討会)

注) 上から水面下 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m における予測結果であり, 今後 100 年間に於いて平均気温が以下の条件で変化する場合を計算したものである。

Case 2-1 : 過去 20 年間に比べて変化しない場合

Case 2-2 : 線形に 2℃ 上昇する場合

Case 2-3 : 線形に 5℃ 上昇する場合

7 生物相の調査

(1) 魚介類

既存文献及び今回の現地調査で確認された魚介類リストを表 VI-51 に示す。

今回の調査で魚類 10 種，甲殻類 2 種，貝類 2 種，合計 14 種の魚介類が確認された。

池田湖はカルデラ湖であり，在来の魚類相は極めて乏しかったと考えられる。しかし，1910 年代後半から 1980 年代に至るまで，コイ・ワカサギ・アユ等の放流事業が行われた結果，これまでに池田湖で生息情報のある魚類は 25 種（フナ類とヨシノボリ類を除く）にのぼるが，現在の池田湖の魚類相は，ごく一部の魚種を除き，人為的な移入とその後の淘汰によって形成されたものといえる。

池田湖に生息記録がある魚介類のうち，保護上重要な魚類は，ニホンウナギ・オオウナギ・ドジョウ・ミナミメダカが該当した。ミナミメダカ・ドジョウは，1950 年と 1973 年の記録があるものの，その後は生息情報がない。今回の現地調査でも確認されていないことから，現在はすでに絶滅したか，もしくは極めて小規模な個体群がかるうじて存在している状況にあると考えられる。減少もしくは絶滅の原因は不明であるが，ティラピア類等の競合種の加入や，湖岸や周辺の水田を取り巻く環境の変化等が考えられる。オオウナギは前回（平成 22 年度）の調査では確認されたが，今回の調査では確認されなかった。

なお，ゲンゴロウブナ・ニゴロブナ・ヤリタナゴ・サクラマス（ヤマメ）は，池田湖に人為的に持ち込まれた種であるため，保護上重要な個体群に該当しない。またニホンウナギは，自然分布による個体群と放流個体群の両者が存在している可能性がある。

保護上重要な貝類は，ドブガイ（ヌマガイ）・カラスガイ・モノアラガイが該当した。前回（平成 22 年度）の調査では，ドブガイ（ヌマガイ）・カラスガイが確認されたが，今回の調査ではいずれも死殻のみで，生貝は確認されなかった。

「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律」により，飼育や移動が大きく制限されている『緊急対策外来種』や『重点対策外来種』（これらに特定外来生物も含まれる）は確認されなかった。ただし，生態系に悪影響を及ぼす可能性がある『その他の総合対策外来種』に挙げられているものに，ハクレン・ソウギョ・ジルティラピア・ナイルティラピアの 4 種が該当した。また，『適切な管理が必要な産業上重要な外来種（産業管理外来種）』に挙げられているものに，ニジマス・ブラウントラウトの 2 種が該当した。これら 6 種のうち，今回の調査ではジルティラピアがすべての調査地点で多数生息しているのが確認された。ジルティラピアは池田湖内で繁殖しており，夏季の調査時には卵や仔魚を保護している親魚が見られた。

表 VI-51 既存文献及び今回の現地調査で確認された魚介類リスト

網名	科名	種名	類型区分	既存文献							現地調査	
				1950年	1973年	1979年	1987年	1993年	2001年	2010年	前回 (2010年)	今回 (2020年)
硬骨魚	ウナギ	ヨーロッパウナギ	—							○		
		ウナギ	生物B	○	○	○	○	○	○			
		オオウナギ	—	○	○	○	○	○		○	○	
	コイ	コイ	生物B	○	○	○	○	○			○	○
		ゲンゴロウブナ	生物B		○		○	○			○	
		ギンブナ	生物B	○		○	○	○			○	
		ニゴロブナ	生物B				○	○				
		フナ類	生物B								△	○
		ヤリタナゴ	—		○							
		ハクレン	—		○	○	○	○			○	
		オイカワ	生物B		○	○	○	○			○	○
		カワムツ	—								○	○
		ソウギョ	—		○		○					
	モツゴ	—		○	○	○	○			○	○	
	ドジョウ	ドジョウ	生物B	○	○							
	キュウリウオ	ワカサギ	その他	○	○	○	○	○			○	
	アユ	アユ	その他	○	○	○	○	○			○	○
	サケ	ニジマス	生物A		○	○	○	○				
		ブラウントラウト	—				○					
		サクラマス (ヤマメ)	生物A				○					
メダカ	ミナミメダカ	—	○	○								
カワスズメ	ジルティラピア	—		○	○	○	○			○	○	
	ナイルティラピア	—			○	○	○					
ハゼ	ゴクラクハゼ	—		○	○	○	○			○	○	
	トウヨシノボリ	生物B								○	○	
	ヨシノボリ類	生物B				△	△					
	チチブ	—		○	○	○	○			○	○	
出現種数				8	17	14	19	16	2	14	10	10

網名	科名	種名	類型区分	1950年	1973年	1979年	1987年	1993年	2001年	2010年	前回 (2010年)	今回 (2020年)
甲殻	テナガエビ	テナガエビ類	生物B				○					
		スジエビ	生物B			○	○	○		○	○	○
	イワガニ	モクズガニ	生物B			○		○		○		
	サワガニ	サワガニ	—							○	○	
二枚貝	インガイ	ドブガイ (ヌマガイ)	—				○	○		○	○	
		カラスガイ	—							○	○	
	シジミ	マシジミ	生物B				○	○		○	○	
基眼	モノアラガイ	モノアラガイ	—							○		
		ヒメモノアラガイ	—									○
出現種数				0	0	2	4	4	0	7	5	4

△：他の種と重複する可能性があるため、種数に含めない。

1950年：鹿児島県国立公園候補地学術調査報告

1973年：鹿児島大学水産学部資源学教室調査

1979年：第2回自然環境保全基礎調査

1987年：第3回自然環境保全基礎調査 (1985年鹿児島大学水産資源学教室)

1993年：第4回自然環境保全基礎調査 (1984～1986年鹿児島県水産試験場)

2001年：判別関数式によるニホンウナギとヨーロッパウナギの識別 (日本水産学会誌)

2010年：池田湖水質環境保全対策協議会生物調査結果 (2007～2008年鹿児島水産高等学校)

既存文献

第3回自然環境保全基礎調査 湖沼調査報告書 中国・四国・九州・沖縄版 (環境庁, 1987)

第4回自然環境保全基礎調査 湖沼調査報告書 中国・四国・九州・沖縄版 (環境庁, 1993)

判別関数式によるニホンウナギとヨーロッパウナギの識別 日本水産学会誌 (岡村ら, 2001)

池田湖水質環境保全対策協議会生物調査結果 (池田湖水質環境保全対策協議会, 2010)

(2) 植物

ア 水草植物

既存文献及び今回の現地調査で確認された水草植物リストを表 VI-52 に示す。

現地調査の結果、沈水植物（植物体全体が水中にあり、水底に根を張っている植物）としてホザキノフサモが確認された。

ホザキノフサモは、急深部を除く沿岸浅所（おおよそ 5m 以浅）に広く分布していた。なお、前回調査（平成 22 年度）では、クロモとミズハコベが記録されていたが、今回はどちらも確認されなかった。

池田湖で生育が確認されている 11 種の水草のうち、保護上重要な種に該当するのは 9 種である。今回確認された種で該当する種はいなかった。

イケダシャジクモは、環境庁（2000）によると、かつて池田湖が世界中で唯一の分布地であった。近年の調査では全く確認されておらず、すでに絶滅したと考えられている。イケダシャジクモの絶滅の大きな要因としては、草食性魚類であるソウギョの放流が指摘されている。

その他の保護上重要な種も、現地調査で確認されておらず、生育地が消滅あるいは減少した可能性が考えられる。

表 VI-52 既存文献及び現地調査で確認された水草植物リスト

区分	科名	種名	現地調査 (令和 2 年)	既存文献	保護上 重要な種
シダ植物	デンジソウ	デンジソウ		○	環(Ⅱ)/県(Ⅱ)
種子植物	アリノトウグサ	ホザキノフサモ	○	○	
	アワゴケ	ミズハコベ		○	県(準)
	トチカガミ	クロモ		○	県(Ⅱ)
		セキショウモ		○	県(Ⅱ)
	ヒルムシロ	センニンモ		○	県(Ⅰ)
		ヒロハノエビモ		○	県(Ⅰ)
	イバラモ	イバラモ		○	県(Ⅱ)
藻類	シャジクモ	イケダシャジクモ		○	環(絶)/県(絶)
		フシナシシャジクモ		○	
		キヌフラスコモ		○	環(Ⅰ)

保護上重要な種の凡例

環：レッドリスト 2020（環境省，2020）

改訂・鹿児島県の絶滅のおそれのある野生動植物 -鹿児島県レッドデータブック 2016-（鹿児島県，2016）

絶：絶滅種，Ⅰ：絶滅危惧Ⅰ類，Ⅱ：絶滅危惧Ⅱ類，準：準絶滅危惧

既存文献

第 3 回自然環境保全基礎調査 湖沼調査報告書 中国・四国・九州・沖縄版（環境庁，1987）

鹿児島県の優れた自然（鹿児島県編，1988）

レッドデータブック 2014-日本の絶滅のおそれのある野生生物-9 植物Ⅱ（環境省編，2015）

改訂・鹿児島県の絶滅のおそれのある野生動植物 -鹿児島県レッドデータブック 2016-（鹿児島県，2016）

第 4 期 池田湖水質環境管理計画（鹿児島県，2010）