

## 5 池田湖の水質シミュレーション

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た。流れ場・生態系結合数値モデルの基本的な構造は図 36 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、全りんを評価した。

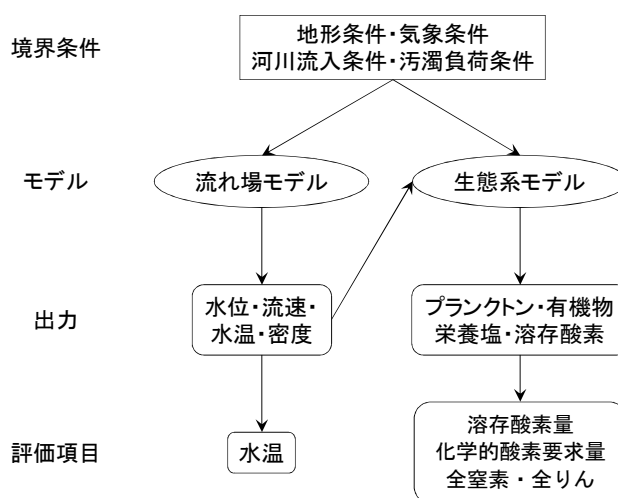


図 36 流れ場・生態系結合数値モデルの基本的な構造

### (1) シミュレーション条件・境界条件

#### ア シミュレーション条件

シミュレーション条件を表 8 に示す。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 年間の再現シミュレーションを実施した。Case 2 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 年間の計算を行った。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 年間と同等である場合、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 通りとした。Case 3 では、平成 23 年 2 月頃に全層循環が発生する直前である平成 21 年 3 月 1 日から平成 22 年 2 月 28 日までの 1 年間を対象として、畑かん用水を底層（深度 200m）から取水する場合、下層（深度 100m）から取水する場合、取水量を変化させた場合のシミュレーションを行い、水質改善方策の有効性を検討した。Case 4 では、Case 3 のシミュレーション結果を受けて、水質改善方策として有効な場合を抽出し、100 年間で気温が 2℃上昇する場合を想定し、20 年間の水質改善方策の効果を予測した。また、湖内で表層と底層の水を交換する場合のシミュレーション、秋から冬に集中的に取水をする場合のシミュレーション、湖心ではなく、200m よりやや浅い端部から取水する場合のシミュレーションもあわせて実施した。

表 8 シミュレーション条件

予測内容	条件名 (Case)	計算期間 (年)	気温上昇度 (°C/年)	底層水質改善方策の内容			
				取水量 (m³/秒)	取水位置	送水・移送先	送水・移送時期
現況再現	1	40	—	—	—	—	—
長期予測	2-1	100	—	—	—	—	—
	2-2	100	0.02	—	—	—	—
	2-3	100	0.05	—	—	—	—
短期予測	3-1	1	—	—	—	—	—
	3-2	1	—	0.26	湖心・底層	湖外	実績
	3-3	1	—	0.52	湖心・底層	湖外	実績
	3-4	1	—	0.78	湖心・底層	湖外	実績
	3-5	1	—	1.04	湖心・底層	湖外	実績
	3-6	1	—	1.04	湖心・下層	湖外	実績
中期予測	4-1	20	0.02	0.26	湖心・底層	湖外	通年
	4-2	20	0.02	0.26	湖心・底層	湖内（表層）	通年
	4-3	20	0.02	0.26	湖心・表層	湖内（底層）	通年
	4-4	20	0.02	0.26	湖心・底層	湖外	秋～冬
	4-5	20	0.02	0.26	湖端・底層	湖外	通年

## イ 境界条件

### (7) 地形条件

池田湖の水深データを読み取り，水平方向の格子幅が 1,000mの地形データを作成した（図 37）。深さ方向には，2.5m幅の格子を用いた。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）となった。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。

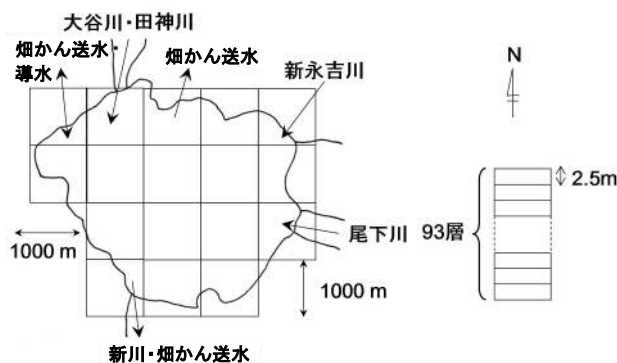


図 37 池田湖の格子分割図

(1) 気象条件

気象条件は、鹿児島地方気象台（標高 4 m，風速計高さ 44.9m：以下，「気象台」），指宿地域気象観測所（標高 5 m，風速計高さ 10m：以下，「アメダス」）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。数値モデルに入力する必要があるデータは，気温，大気圧，全天日射量，雲量，相対湿度，降水量，風速，風向である。気象条件の設定に用いたデータを表 9 に示す。3 時間ごとのデータである場合や，異常値の発生等で計測されなかった場合については，線形補間によって 1 時間ごとの連続的なデータとした。

表 9 気象条件の設定に用いたデータ

項目	計測期間	計測場所	計測間隔
気温	昭和 50 年 3 月 1 日 ～ 昭和 52 年 3 月 31 日	鹿児島	3 時間
	昭和 52 年 4 月 1 日 ～ 平成 28 年 2 月 29 日	指宿	1 時間
大気圧	昭和 50 年 3 月 1 日 ～ 平成元年 3 月 31 日	鹿児島	3 時間
	平成元年 4 月 1 日 ～ 平成 28 年 2 月 29 日	鹿児島	1 時間
全天日射量	昭和 50 年 3 月 1 日 ～ 平成元年 3 月 31 日	補正值	
	平成元年 4 月 1 日 ～ 平成 28 年 2 月 29 日	鹿児島	1 時間
雲量	昭和 50 年 3 月 1 日 ～ 平成 7 年 3 月 31 日	鹿児島	3 時間
	平成 7 年 4 月 1 日 ～ 平成 28 年 2 月 29 日	鹿児島	3 時間（0 時を除く）
相対湿度	昭和 50 年 3 月 1 日 ～ 平成 2 年 3 月 31 日	鹿児島	3 時間
	平成 2 年 4 月 1 日 ～ 平成 28 年 2 月 29 日	鹿児島	1 時間
降水量	昭和 50 年 3 月 1 日 ～ 昭和 50 年 12 月 31 日	鹿児島	1 時間
	昭和 51 年 1 月 1 日 ～ 平成 28 年 2 月 29 日	指宿	1 時間
風向・風速	昭和 50 年 3 月 1 日 ～ 平成 28 年 2 月 29 日	鹿児島	1 時間

備考 全天日射量は，平成元年 3 月 31 日以前は，平成元年 4 月 1 日以降のデータをベースとして，月ごとの平均値で補間した値を用いた。

雲量は，3 時間ごとに計測されているが，平成 7 年 4 月 1 日以降は，深夜（0 時）は計測されていない。風向・風速は，指宿でも計測されているが，平成 20 年 3 月 25 日までの風速値の有効数字の桁数が小さいため，継続性を考慮して鹿児島のデータを採用した。

気象台やアメダスは、池田湖とは場所や標高が異なるため、これらの気象データは池田湖での気象データと異なる可能性がある。そこで、気温、全天日射量、相対湿度、風速については、気象台、アメダスのデータと池田湖周辺で計測したデータとの相関を取り、データの補正を行った（表 10）。池田湖周辺では、平成 24 年～平成 25 年にかけて、各季節に 1 回、1 週間～10 日間程度、気象データを計測した。比較の結果、気温は年間を通じて 1.05 倍とした。全天日射量は池田湖で夏季に高く、冬季に低くなる傾向が見られたため、正弦関数を用いて補正を行った。相対湿度と風速については、それぞれ年間を通じて 0.97 倍、0.8 倍とした。

表 10 気象台とアメダスのデータと池田湖周辺で計測したデータとの相関

池田湖周辺での計測時期	気温	全天日射量	相対湿度	風速
平成 24 年 5～6 月	1.01/0.89	1.07/0.87	0.99/0.68	0.76/0.07
平成 24 年 9 月	1.04/0.90	1.04/0.88	0.97/0.73	0.84/0.14
平成 24 年 11 月	1.06/0.89	0.86/0.84	0.92/0.48	0.72/0.09
平成 25 年 1～2 月	1.05/0.95	0.95/0.88	0.96/0.45	0.78/0.1

備考 左側に気象台とアメダスのデータに対する池田湖周辺でのデータの比、右側に決定係数を示している。

なお、温暖化を想定したシミュレーションでは、今後 100 年間の気象条件を与える必要がある。ここでは、今後 100 年間に気温が線形に 2℃上昇する場合、5℃上昇の場合を想定した。具体的には、平成 7 年 3 月 1 日から平成 27 年 2 月 28 日までの 20 年間のデータセットを 5 回繰り返して用い、気温のみ線形に上昇させるものとした。

#### (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）によれば，昭和 29 年から昭和 55 年までの平均値として，湖面への降水量が 2,388mm，流域からの流入量が 1,547mm となっている。この比を用いて，各月のアメダスでの降水量より各月の流入量を算定した。ただし，池田湖の面積は 10.95km<sup>2</sup> で一定とした。鹿児島大学水産学部紀要第 7 号によると，平水時の流入量は，田神川が 0.097m<sup>3</sup>/秒，新永吉川が 0.058m<sup>3</sup>/秒，第 1 尾下川と第 2 尾下川の合計が 0.075m<sup>3</sup>/秒となっている。そこで，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。また，河川ではないが，池田湖への導水 3 河川からの導水量についても，月ごとの計測値を与えた。

#### (イ) 汚濁負荷条件

汚濁負荷としては，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。管理計画によると，昭和 55 年度以降の汚濁負荷量の推移は表 11 のようになっている。COD データより，全有機炭素濃度を推定し，さらに懸濁態有機物と溶存態有機物の濃度の比を 3：7 と仮定してそれぞれの濃度を与えた。また，無機態りんと無機態窒素の濃度は，全りんと全窒素の濃度から，懸濁態有機物と溶存態有機物に含まれるりんと窒素の成分を引くことにより推定した。汚濁負荷量の推定値は概ね 10 年ごとに存在するが，畑かん以外の汚濁負荷については，経年変化は小さ

いものと仮定し、各年度で線形補間をして与えた。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COD、全窒素、全りんの数値より与えた。畑かん以外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仮定した。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を与える必要がある。ここでは、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た。

表 11 汚濁負荷量の推移

年度	COD (kg/日)		全窒素 (kg/日)		全りん (kg/日)	
	畑かん以外	畑かん	畑かん以外	畑かん	畑かん以外	畑かん
昭和 55 年度	581	0	164	0	27.7	0
平成元年度	347	5	102	89	13.4	0.3
平成 10 年度	275	65	78	322	8.8	1.6
平成 20 年度	221	38	59	112	2.7	0.9
平成 32 年度	214	29	55	91	2.9	0.6

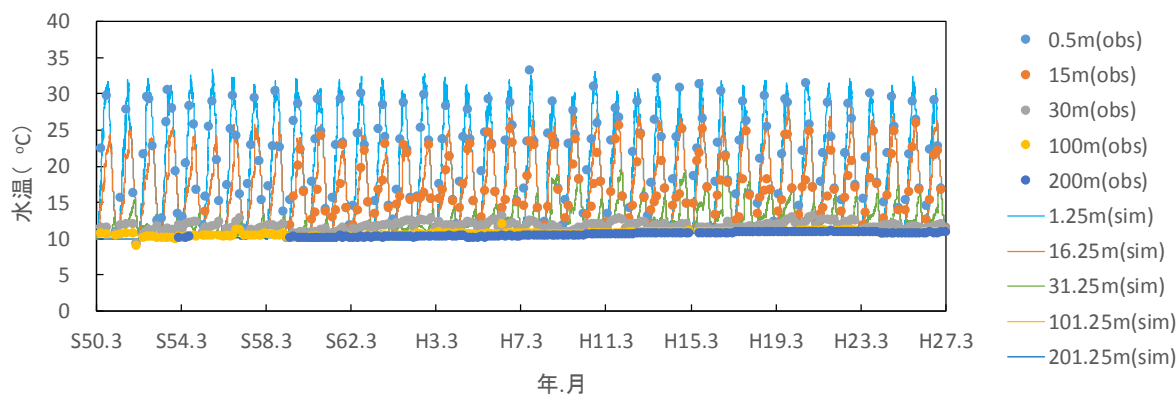
#### (1) 水質改善方策の与え方

水質改善方策のシミュレーションは、表 8 に示した取水位置から各条件に応じた取水量を抜くことによって行った。運動量の変化はないものと仮定したが、取水中に含まれる熱量、化学物質、生物が取り除かれる。一方、導水3河川からの導水及び湖水の移送については、取水量と同じ導水量及び移送量を加えることによってシミュレーションを実施した。このとき、COD、全窒素、全りんの汚濁負荷はどの条件でも変化しないように設定した。熱量および酸素量については、導水量及び移送量に応じて流入させた。

#### (2) 水質再現シミュレーション

数値モデルの妥当性を検証するために、昭和 50 年 3 月 1 日から平成 27 年 2 月 28 日までの水温、溶存酸素量、COD、全窒素、全りんの比較を図 38～図 42 に示す。

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る。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℃となった。観測結果は、2ヶ月ごとのデータであるため、表層と底層の水温差を調べることは難しいが、平成 22 年度 2 月以降、わずかに上昇を続けていた底層の水温がやや低下しているため、冷やされた表層水との鉛直混合が発生した可能性が高いと考えられる。



※“obs”は観測値を，“sim”は計算値を示す。以下同様。

図 38 昭和 50 年 3 月 1 日～平成 27 年 2 月 28 日までの水温変動の比較

溶存酸素量については、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見られる。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 年程度先行している。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るが、水面下 200m 付近では貧酸素状態が継続している。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るが、近年は再び下降している様子が分かる。

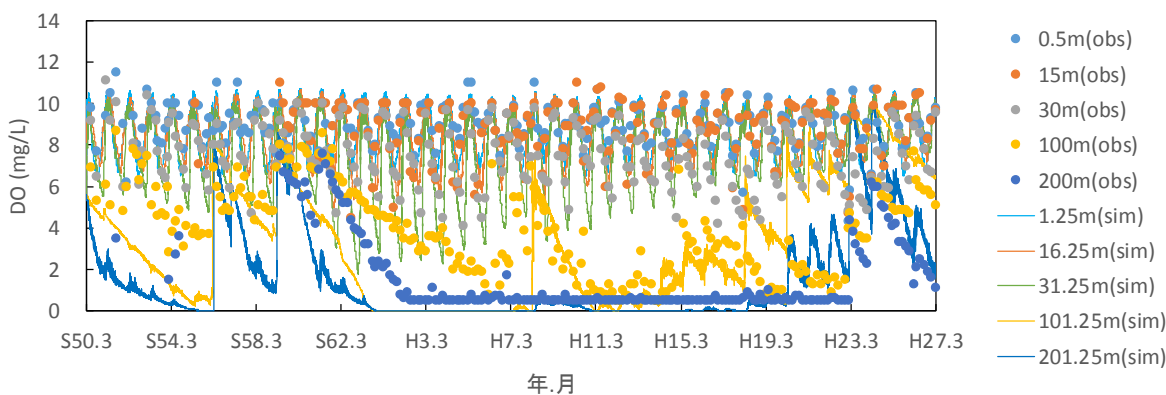


図 39 昭和 50 年 3 月 1 日～平成 27 年 2 月 28 日までの溶存酸素量変動の比較

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

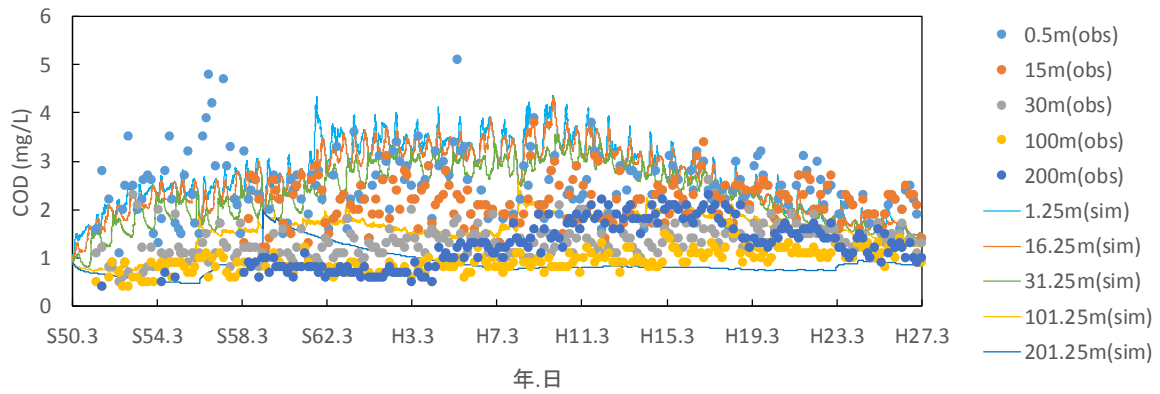


図 40 昭和 50 年 3 月 1 日～平成 27 年 2 月 28 日までの COD の比較

全窒素は、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見られない。ときおり、大きな値を示すこともあるが、概ね 0.1～0.4mg/L の範囲で変動している。観測値では、平成元年ごろに、全窒素が小さくなる様子が見られるが、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 年代以降は概ね一致している。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た。

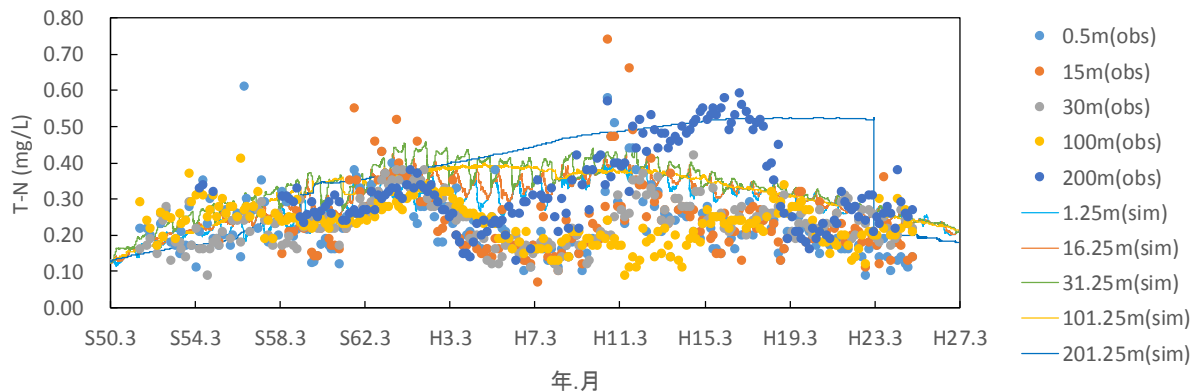


図 41 昭和 50 年 3 月 1 日～平成 27 年 2 月 28 日までの全窒素の比較

全りんは、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、概ね 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。ただし、観測値では平成 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る。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見られるが、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る。

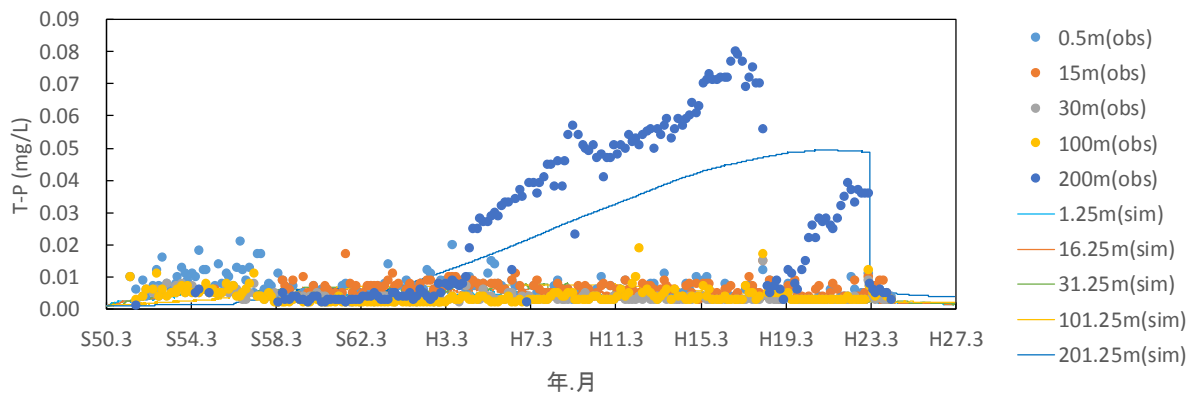


図 42 昭和 50 年 3 月 1 日～平成 27 年 2 月 28 日までの全りんの比較

以上のように、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ている。そこで、次節以降では今後 100 年間の水質予測シミュレーションや、水質改善シミュレーションの結果を示す。

### (3) 水質予測シミュレーション

今後、平均気温が過去 20 年間に比べて変化しない場合 (Case 2-1)、線形に 2℃上昇する場合 (Case 2-2)、線形に 5℃上昇する場合 (Case 2-3) について、水温、溶存酸素量、COD、全窒素、全りんの予測結果をそれぞれ図 43、図 44、図 45、図 46、図 47 に示す。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る。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する。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する。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、概ね貧酸素状態となっている。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、低くなる傾向にある。一方、全窒素は、逆に底層で上昇する傾向にある。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見られない。以上をまとめると、中程度 (0.02℃/年) の温暖化でも、湖水の鉛直循環に変化が発生する可能性が示された。



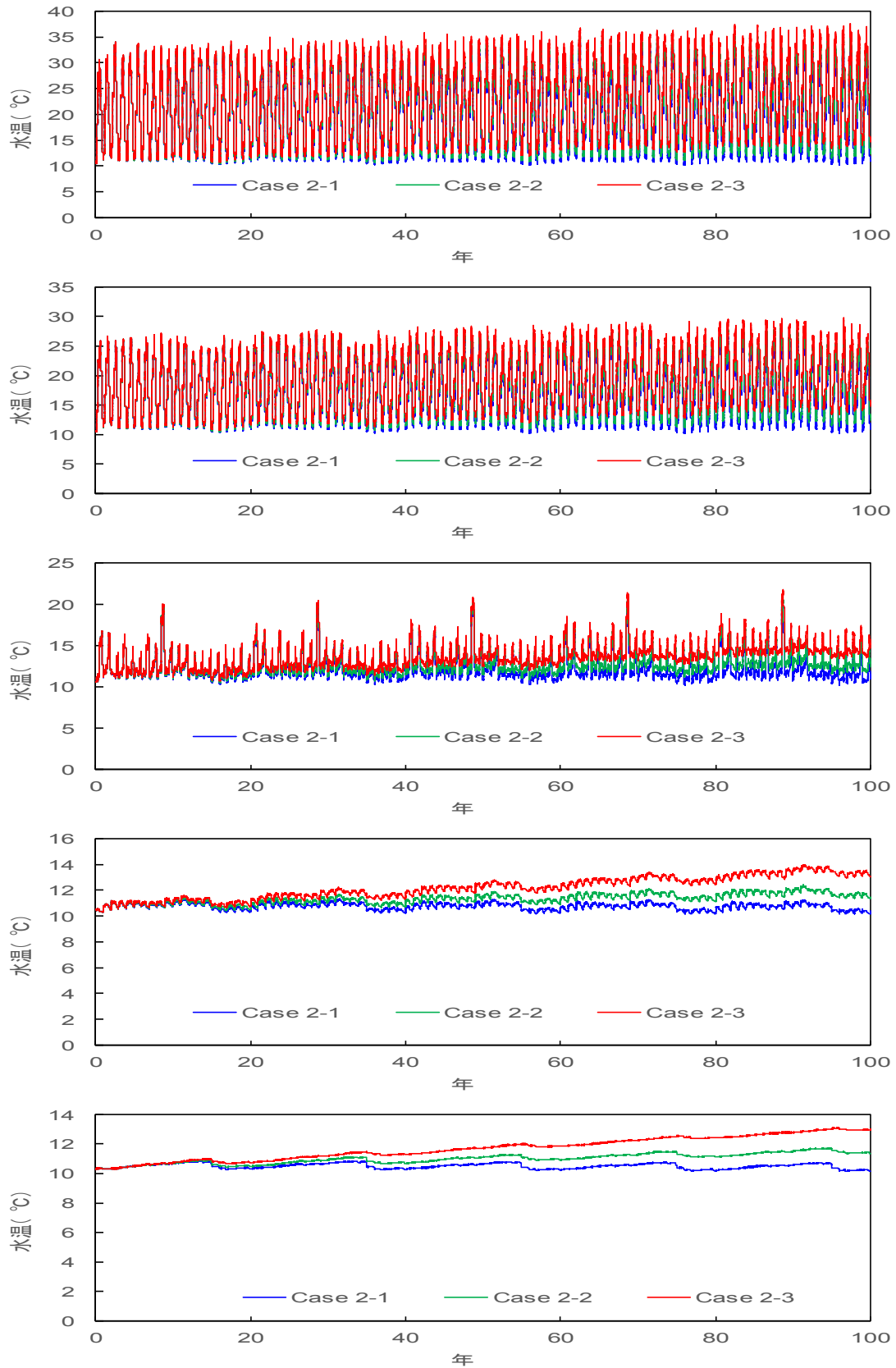


図 43 層別の水温長期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

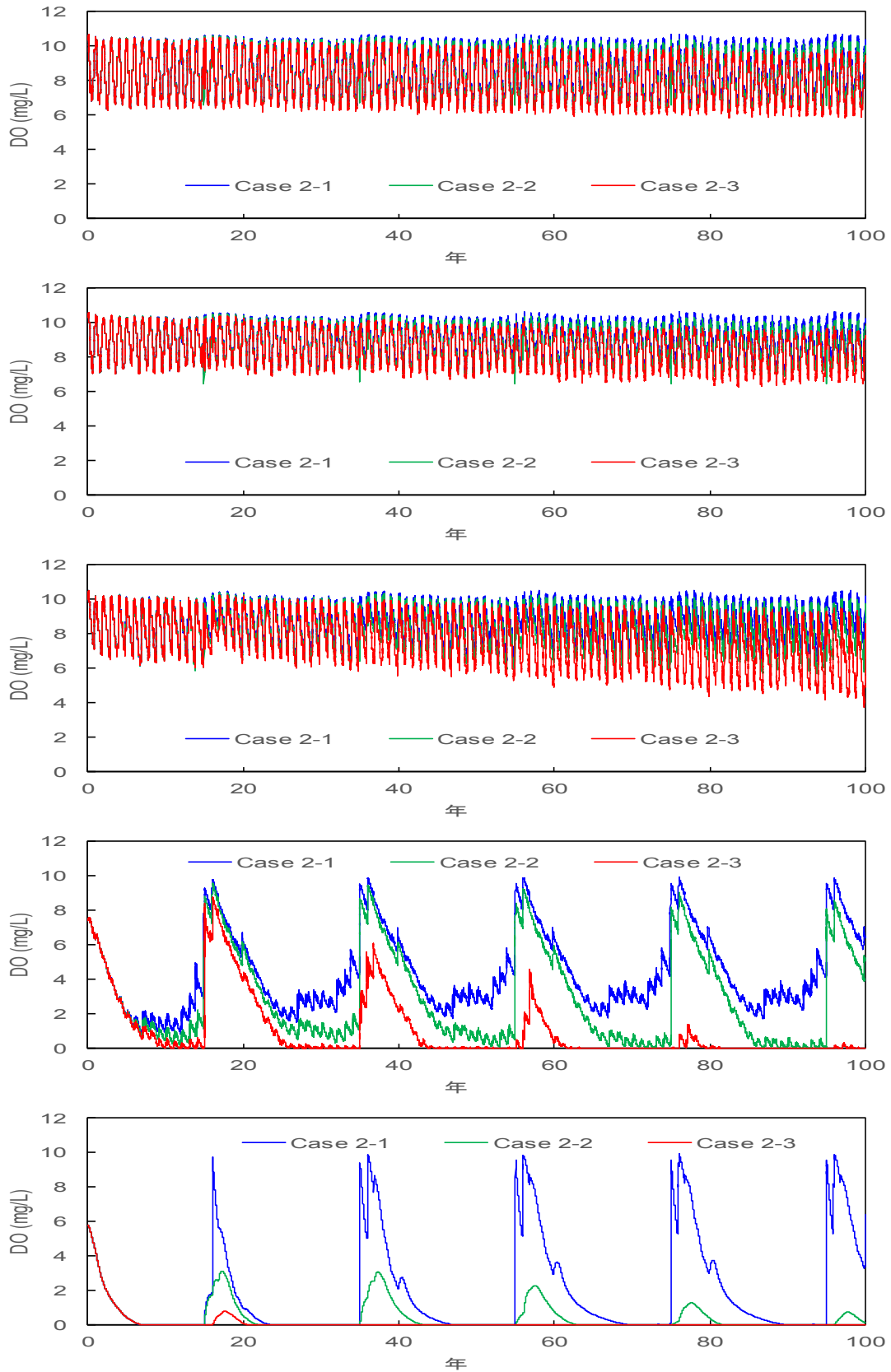


図 44 層別の溶存酸素量長期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

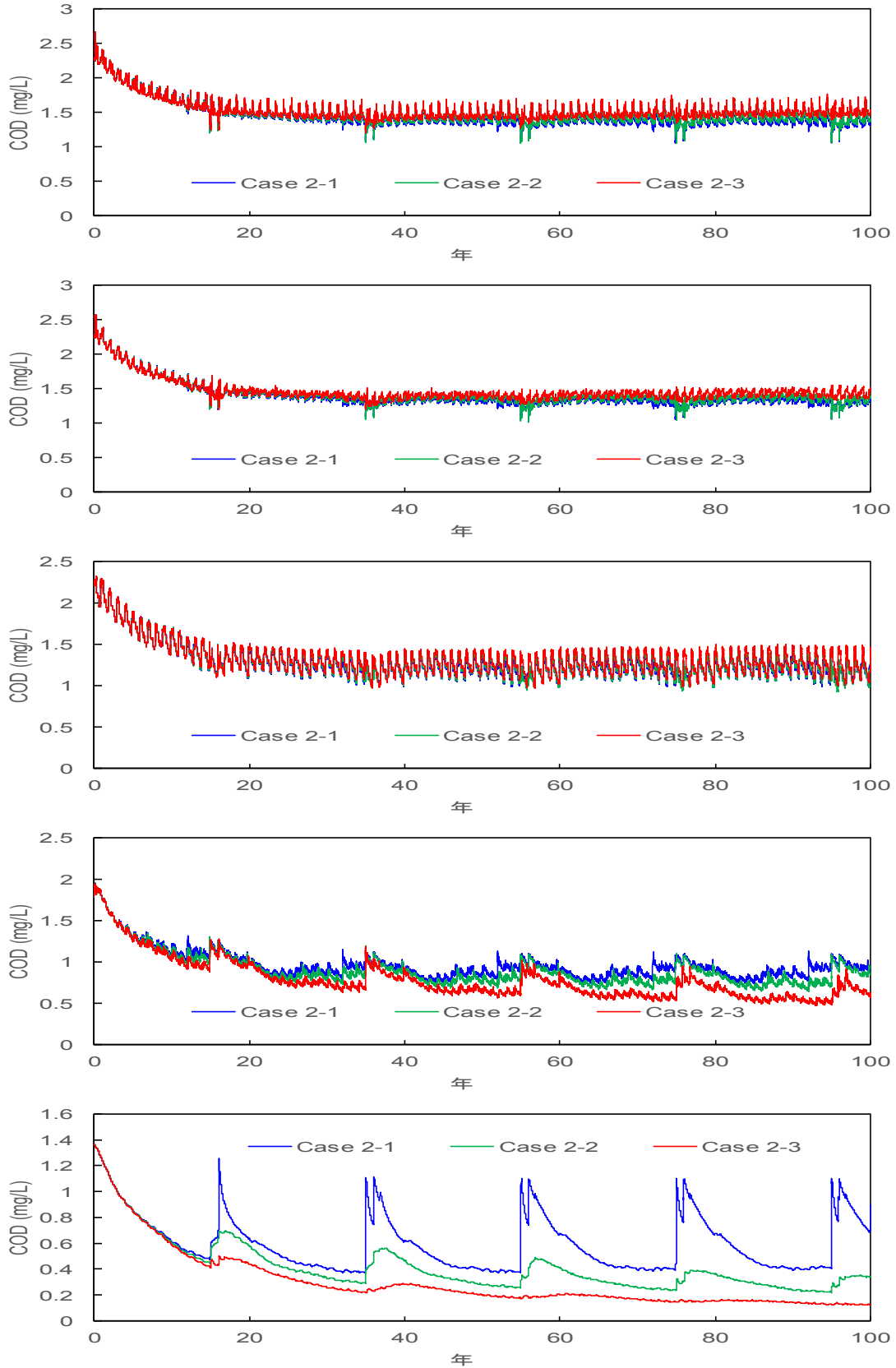


図 45 層別のCOD長期変動予測  
(上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

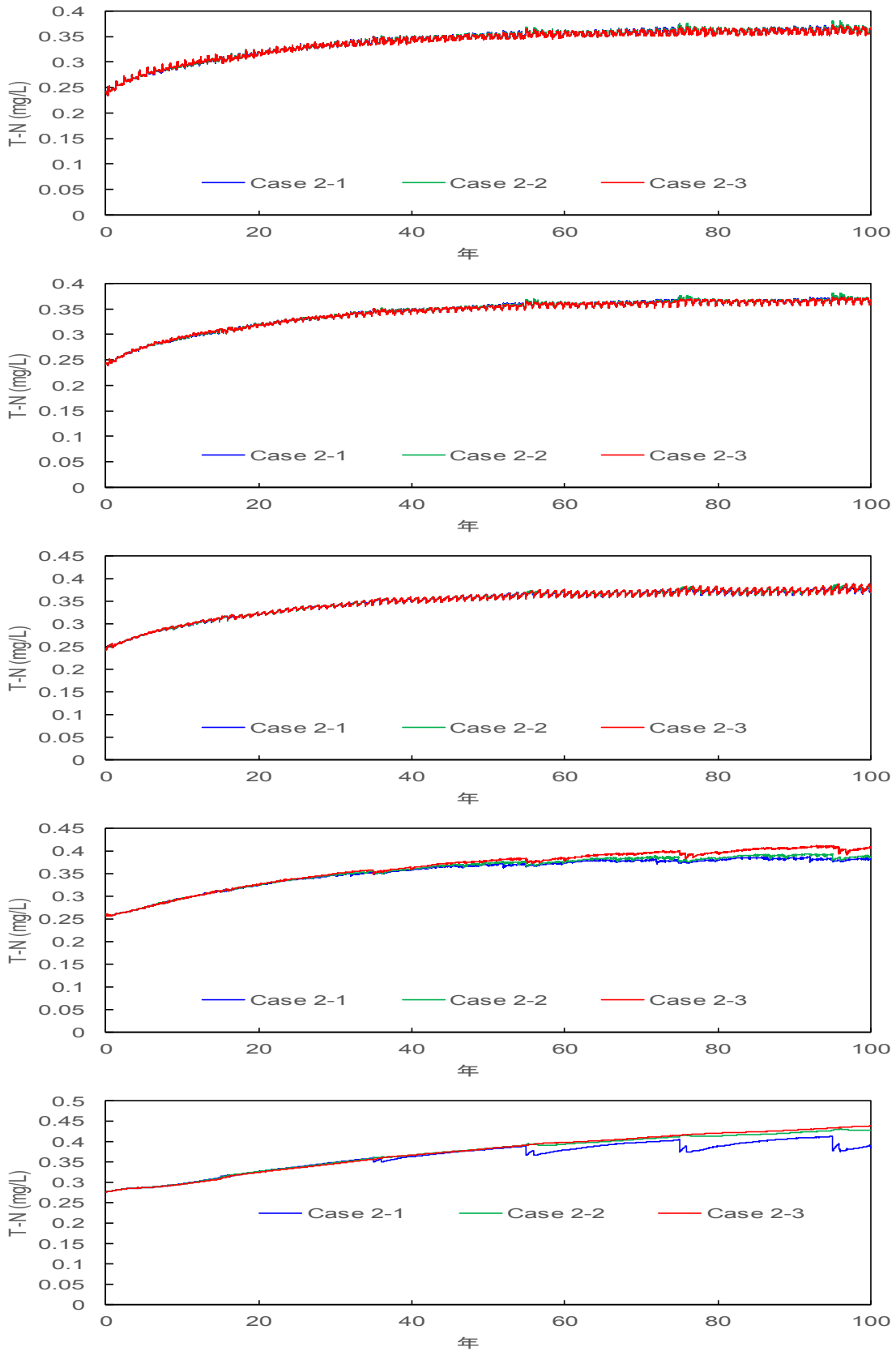


図 46 層別の全窒素長期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

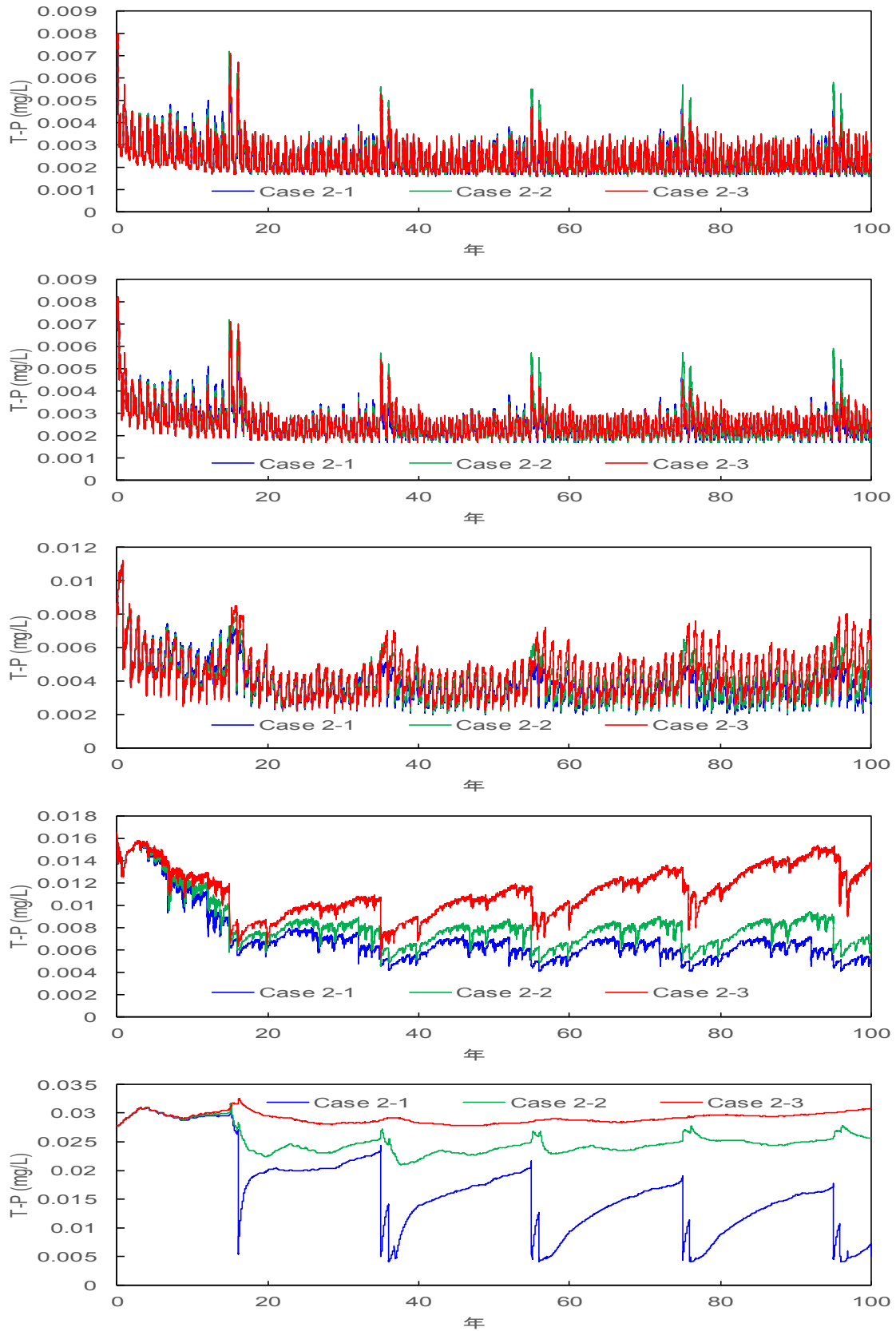


図 47 層別の全りん長期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

#### (4) 水質改善方策の検討

水質改善方策を実施した場合の水面下 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m の水質変動について検討する。図 48 に水温, 図 49 に溶存酸素量, 図 50 に COD, 図 51 に全窒素, 図 52 に全りんの変動を示す。

水温については, 各条件での計算結果に大きな違いが見られない。詳細に見てみると, 水面下 31.25m, 101.25m において, 水質改善方策を実施し, かつ取水量を増やすにつれて, 水温が高くなっている様子が分かる。これは, 底層から取水して湖外に送水したため, 鉛直混合によってわずかではあるが水温が上昇したものと考えられる。一方, 表層の水温は, 表層での熱収支によって支配されるため, 各条件での差異はほとんどない。溶存酸素量については, Case 3-1 に比べて, 水質改善方策を実施した場合に高くなる傾向が見られた。Case 3-2~Case 3-5 の結果を見てみると, 取水量の増加にともなって溶存酸素量の上昇率が高くなっている様子が分かる。ただし, Case 3-6 の下層からの取水の場合は, 底層からの取水の場合に比べて効果は限定的である。COD については, 表層では水質改善方策を実施した場合に濃度が高くなる様子が見られる。これは, 図 52 に示すように, 全りんが上昇したことによって一次生産が高くなったためと考えられる。ただし, COD, 全りんともに, 下層および底層では各条件でほぼ同じ濃度となっている。また, 全窒素については, すべての層において各条件での差異はほとんど見られない。

以上をまとめると, 底層取水については, 取水量に応じた効果が見られる。一方, 下層での取水については, 底層取水に比べて水質改善効果が低かった。

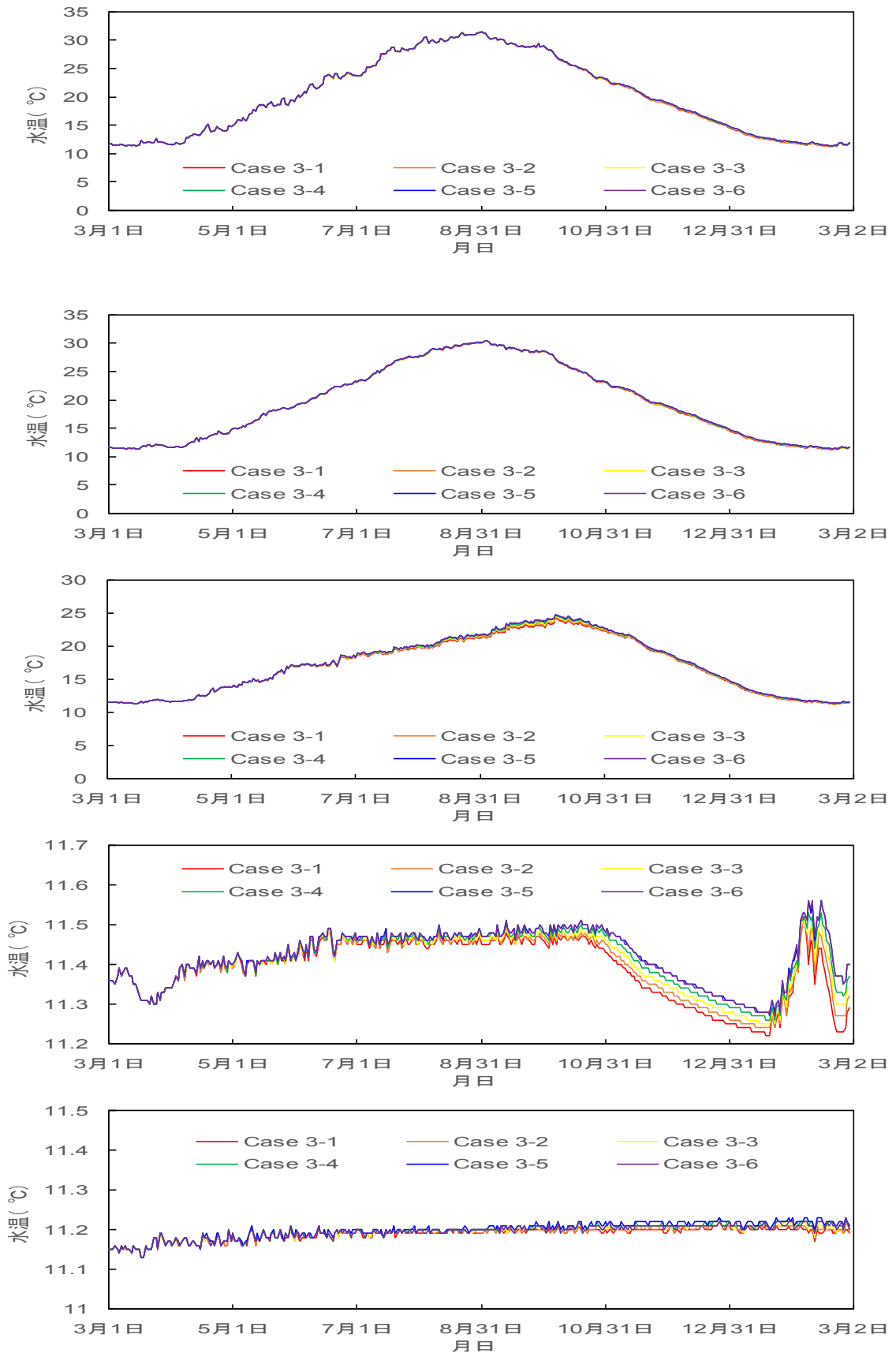


図 48 層別の水溫短期變動予測  
(上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

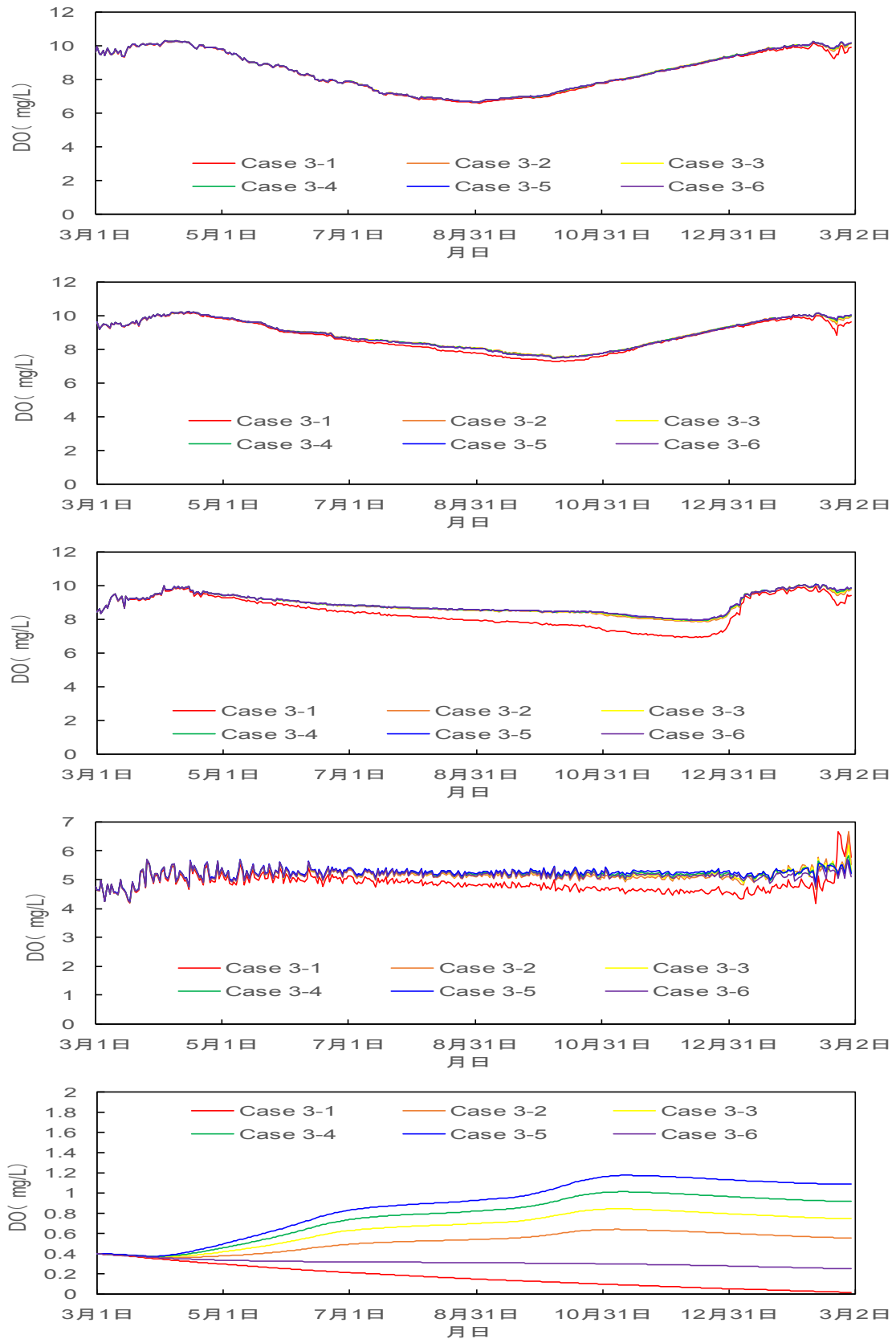


図 49 層別の溶存酸素量短期変動予測  
(上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m



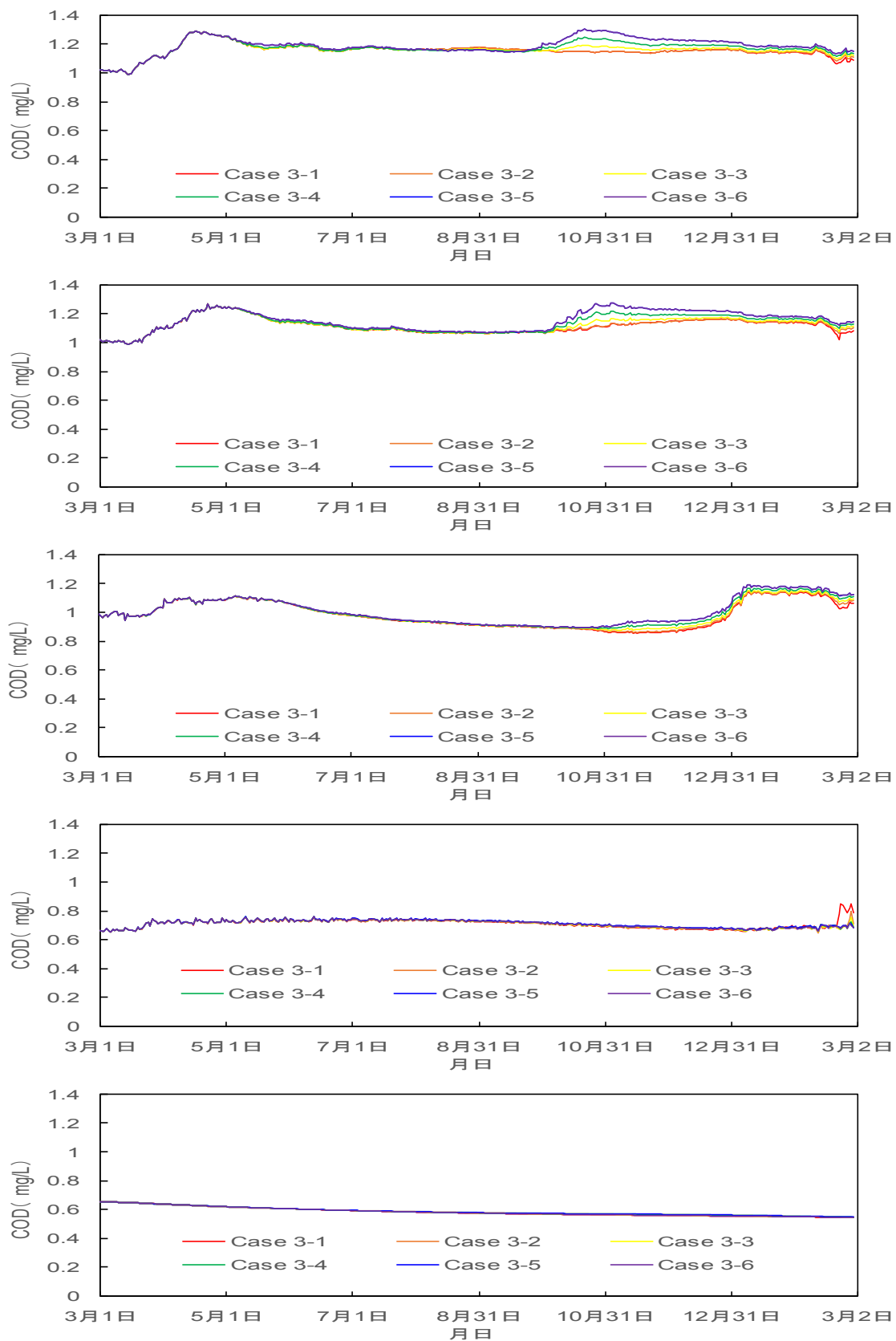


図 50 層別のCOD短期変動予測  
(上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

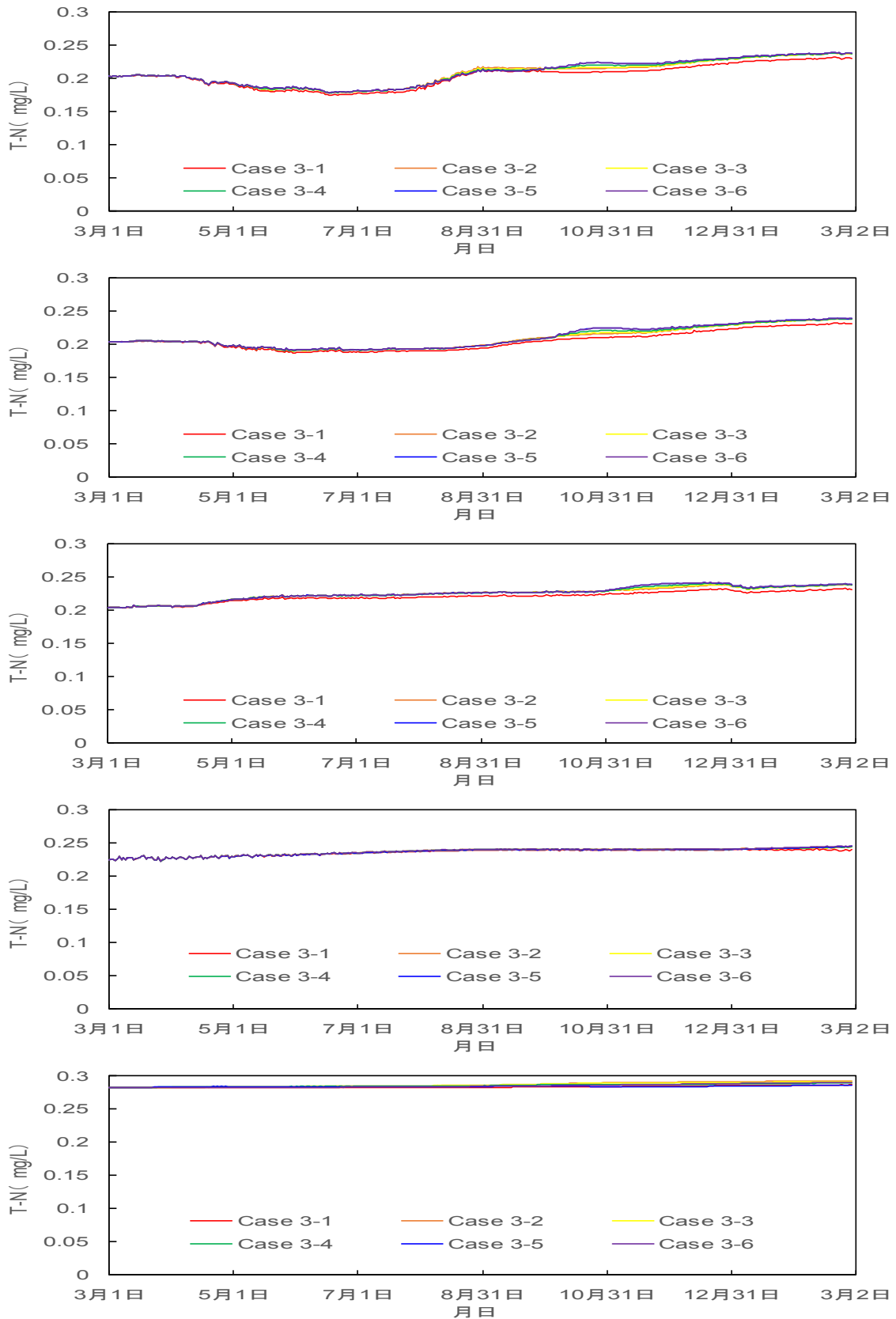


図 51 層別の全窒素短期変動予測  
(上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

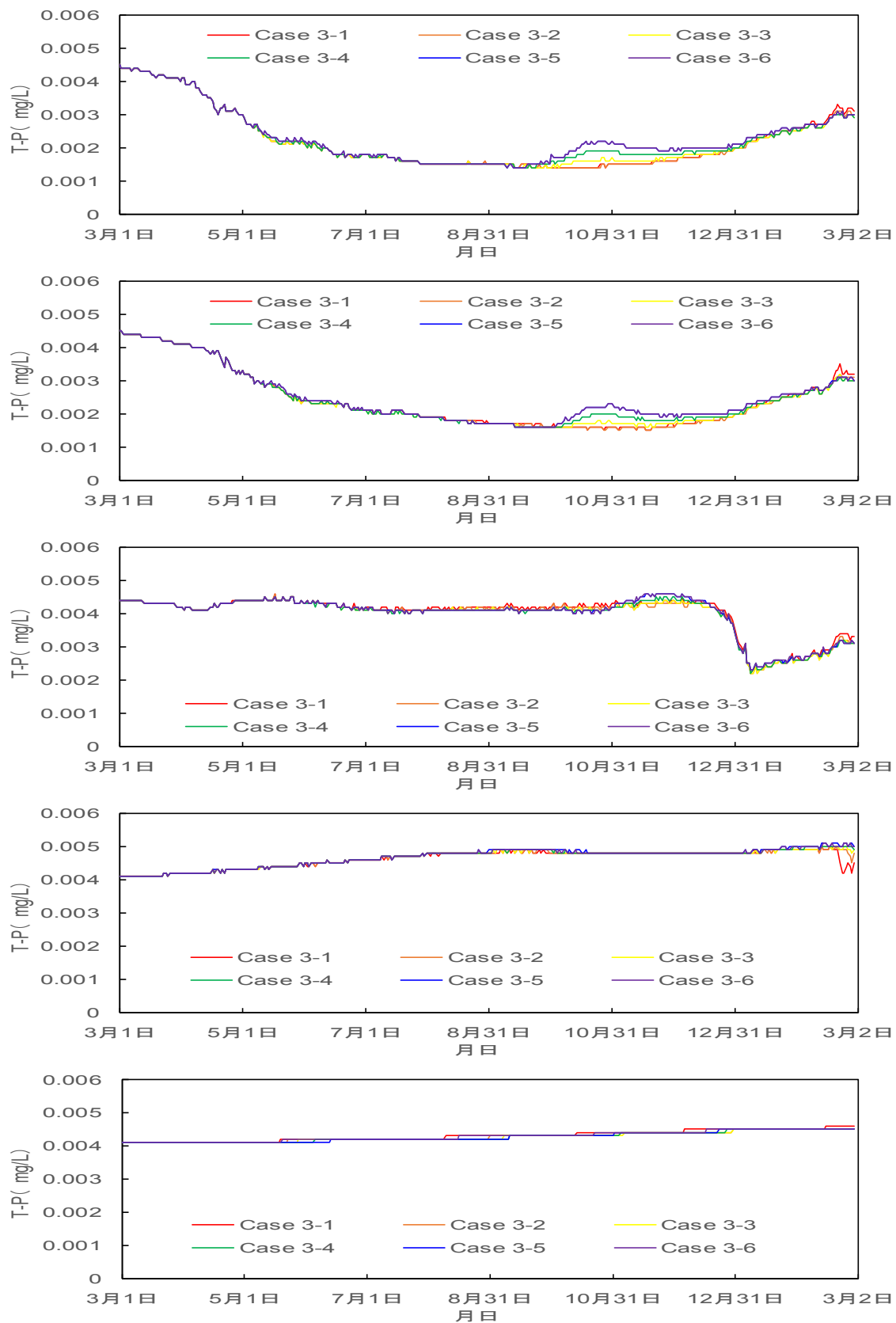


図 52 層別の全りん短期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

## (5) 水質改善予測シミュレーション

水質改善方策を 20 年間実施した場合の水面下 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m の水質変動について検討する。図 53 に水温, 図 54 に溶存酸素量, 図 55 に COD, 図 56 に全窒素, 図 57 に全りんの変動を示す。

水温については, 表層では各条件での計算結果に大きな違いが見られない。しかし, 底層では, Case 4-2 で水温が高く, Case 4-3 でも水温がやや高くなっている様子が分かる。したがって, 湖内で循環させる方が, 鉛直混合の効果が大きいことが分かる。溶存酸素量についても同様で, Case 4-2 や Case 4-3 では溶存酸素量がほぼ飽和酸素量に達しているのが分かる。一方, Case 4-1 や Case 4-4 においても, 溶存酸素量の低下は抑制されており, 概ね 3mg/L 以上となっている。また, 鉛直方向の循環が強くなると, 飽和酸素量に回復している。しかし, Case 4-5 では, 深度 101.25m の値は Case 4-1 や Case 4-4 の値と同等であるものの, 深度 201.25m の溶存酸素量が低くなっている。これは, 取水位置が 5 m 程度高い位置にあることに起因する。COD および全窒素については, 各条件で大きな差が見られなかったが, COD については, 湖内で循環させた場合の方が, 表層で低く, 底層で高くなる傾向が見られた。さらに, 全りんについても, COD とは逆に, 湖内で循環させた場合に, 表層で高く, 底層で低くなる傾向が見られた。全りんは, さらに溶存酸素量の影響を受けて, 溶存酸素量が低い Case 4-1 と Case 4-4, および溶存酸素量がさらに低い Case 4-5 の順に高くなる様子が見られた。

以上をまとめると, 湖内で循環させる場合が最も効果が高いが, 底層から 0.26 m<sup>3</sup>/秒を取水することによって, 今後 100 年間に気温が 2℃ 上昇する場合でも, 底層の溶存酸素量が今後 20 年間にわたって概ね 3 mg/L 以上となり, 水質改善効果が期待される。

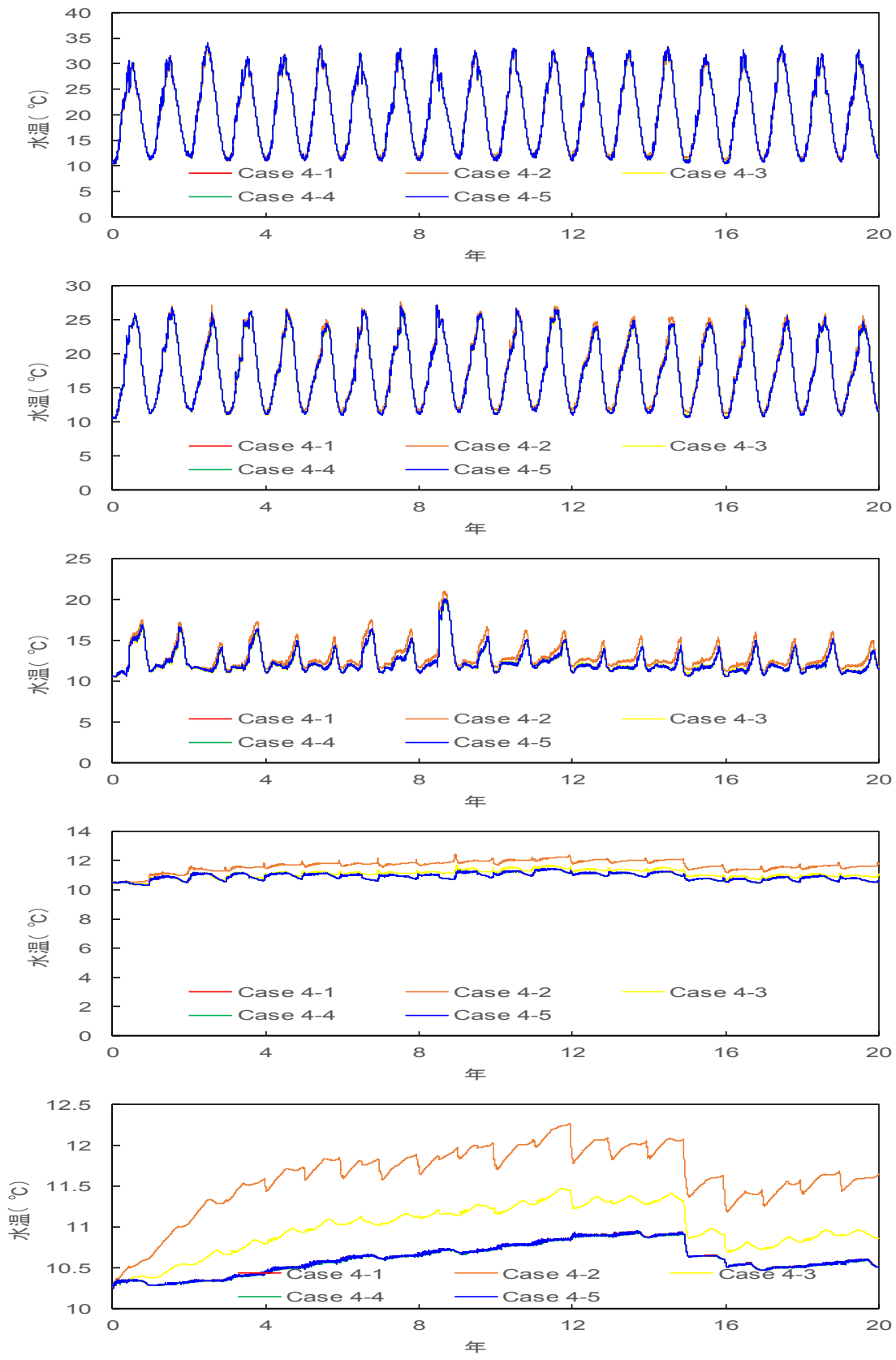


図 53 層別の水温中期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

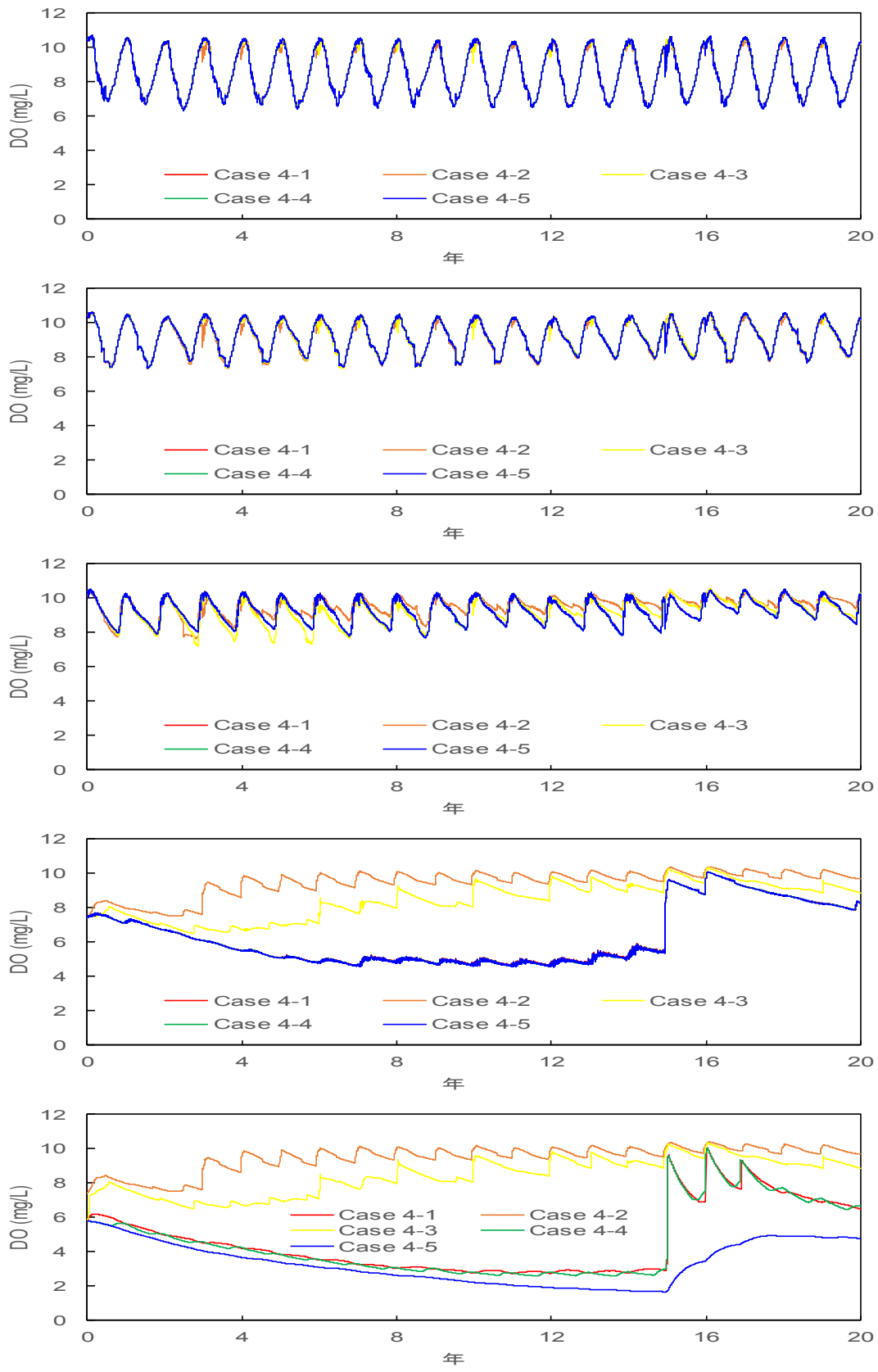


図 54 層別の溶存酸素量中期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

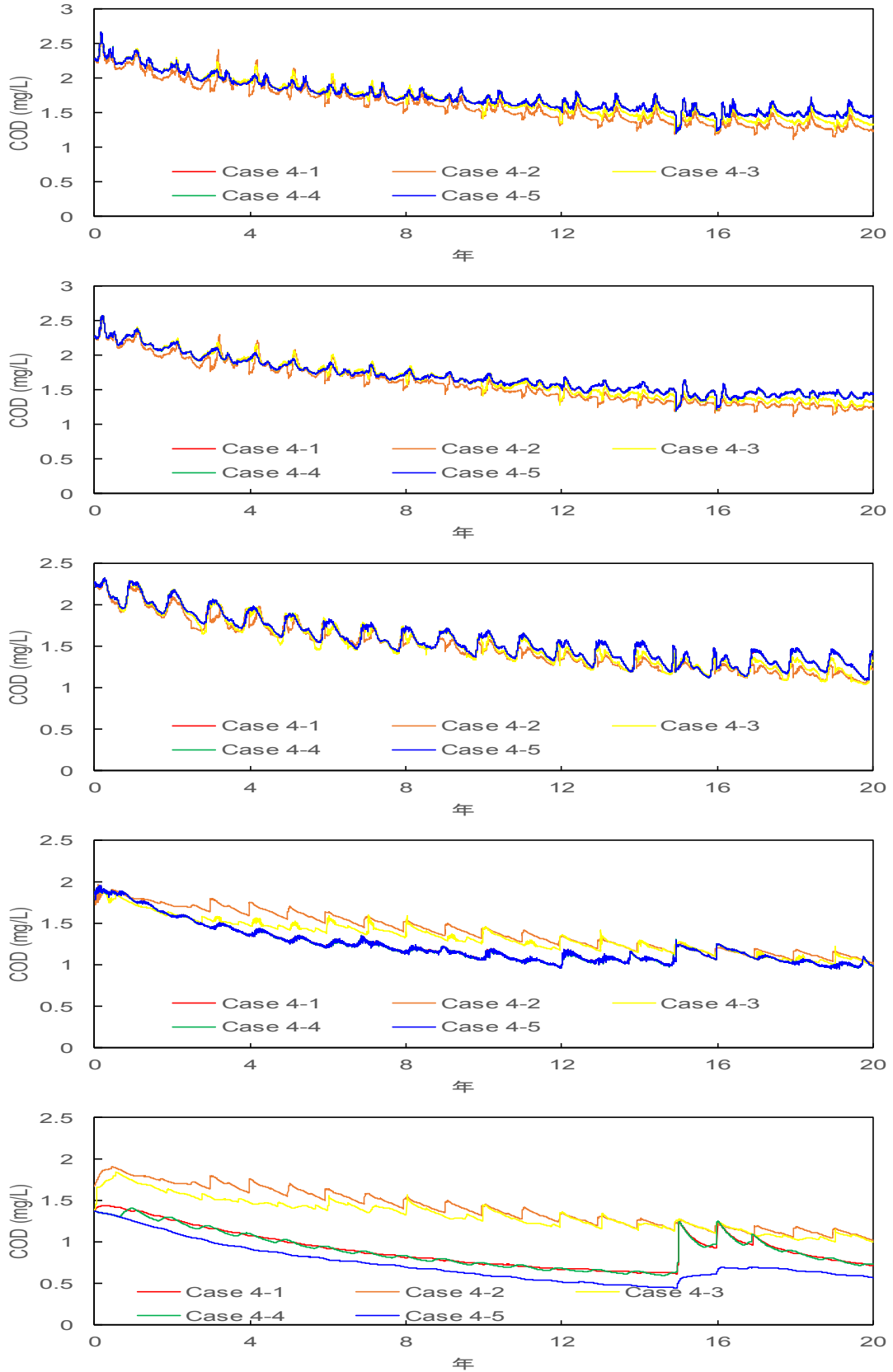


図 55 層別のCOD中期変動予測  
(上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

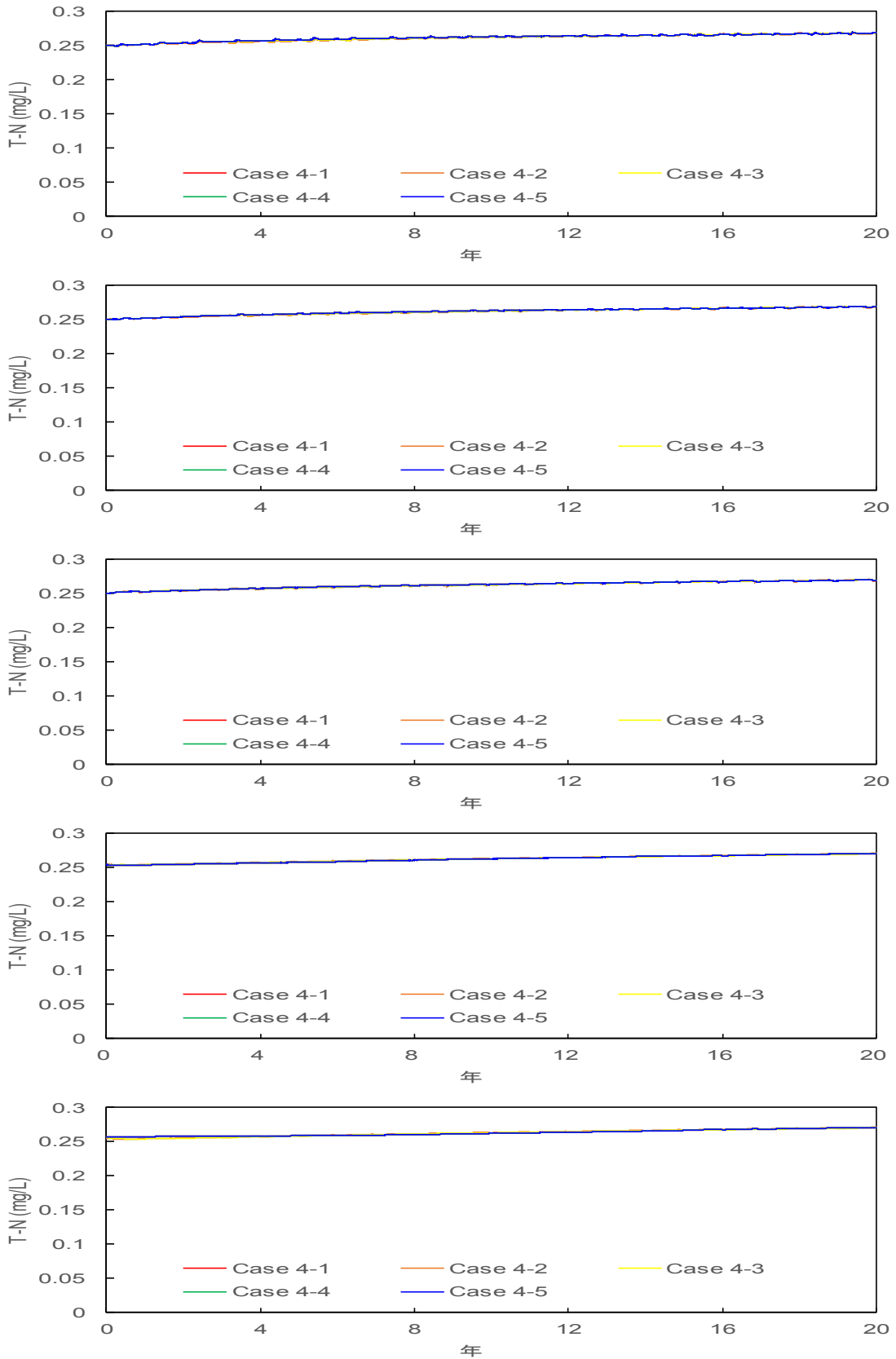


図 56 層別の全窒素中期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m



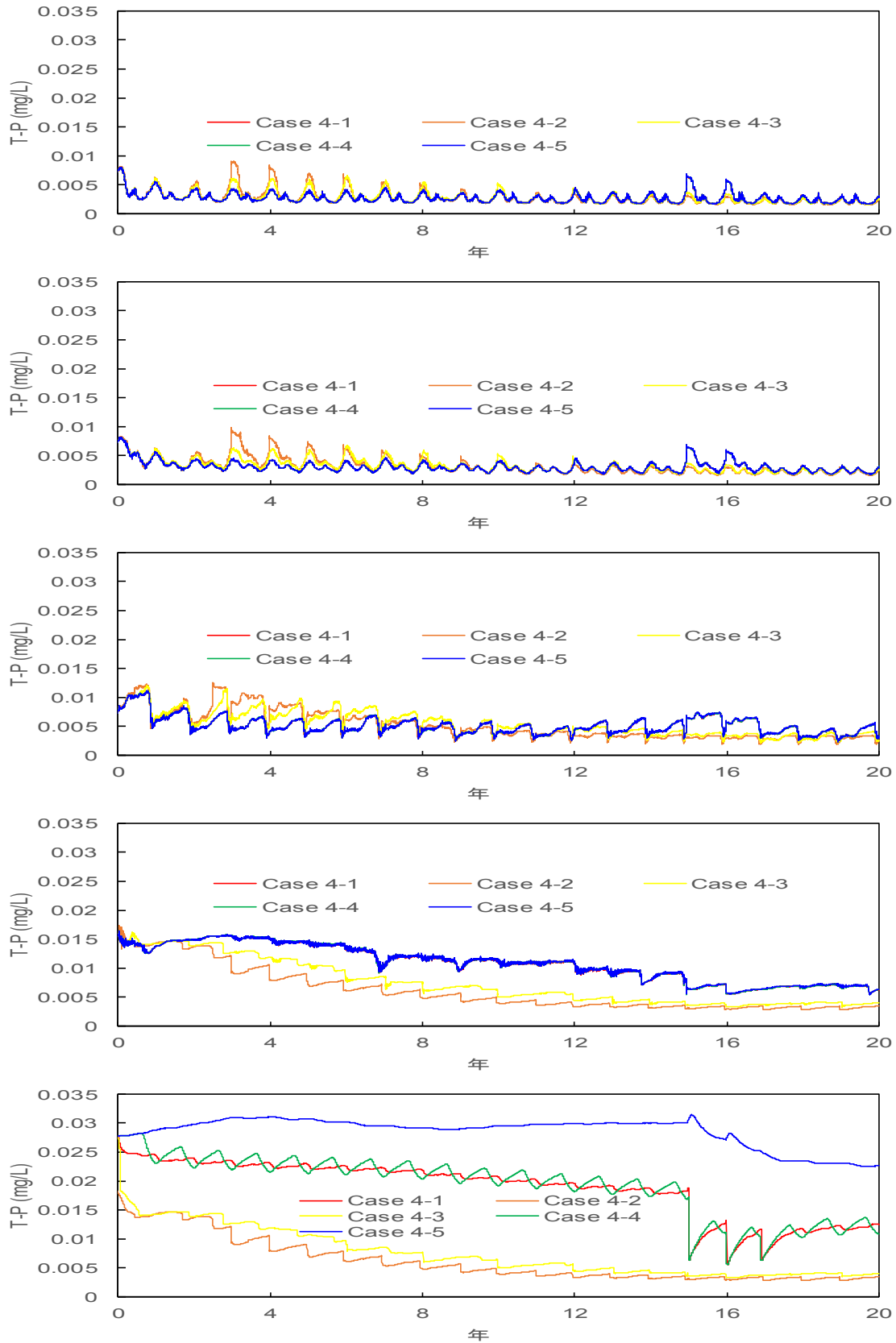


図 57 層別の全りん中期変動予測  
 (上から) 1.25m, 16.25m, 31.25m, 101.25m, 201.25m

## 6 底層水質の改善方策

### (1) 湖水の鉛直循環の要件

#### ア 気温と水温

池田湖の水質について連続的に調査が行われている昭和 58 年度以降において、池田湖で全層循環が発生したと考えられるのは、底層の溶存酸素量の推移から推測すると、昭和 58 年度 2 月、昭和 60 年度 2 月、平成 22 年度 2 月及び平成 23 年度 2 月である。

これらの年度における池田湖の冬季（2 月）における層別水温の推移は図 58 のとおりであり、指宿地域気象観測所における冬季平均気温の推移（図 59）と照合すると、1 月の平均気温がおよそ 7℃を下回ることが、全層循環が発生する要件として考えられる。

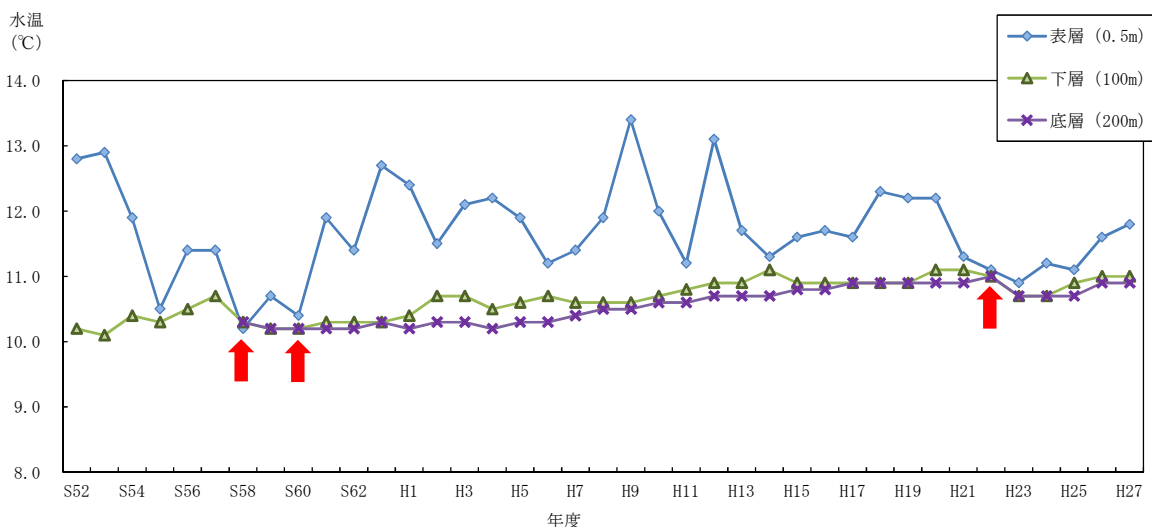


図 58 冬季（2 月）における層別水温の推移（図 6 再掲）

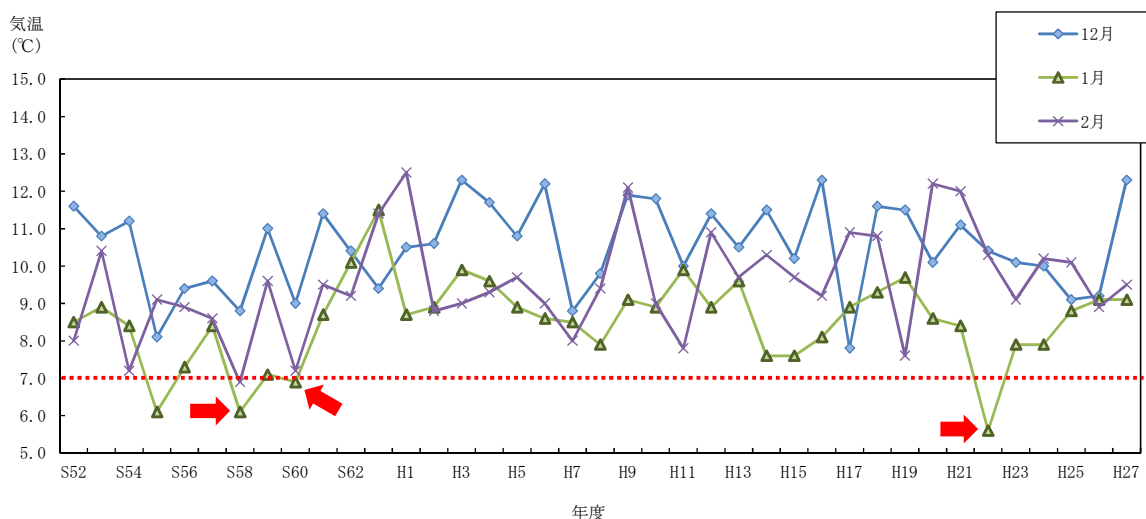


図 59 指宿地域気象観測所における冬季平均気温の推移

## イ 全層循環時の水質変化

平成 22 年度冬期に全層循環が発生した際の水温（図 60）の変化をみると、平成 22 年 11 月下旬に 20m 層において大幅な水温変動（上昇）が確認されており、続いて平成 23 年 1 月上旬に 40m 層で、更に平成 23 年 1 月中旬に 80m 層で上昇が見られ、上層から水塊が到達したことを示唆していた。

また、同時期の溶存酸素量（図 61）の変化をみると、平成 23 年 2 月上旬に大幅な変動（上昇）が 200m 層で確認されており、水塊が達したことが示唆され約 2 ヶ月かけて全層循環が発生したことがうかがえた。

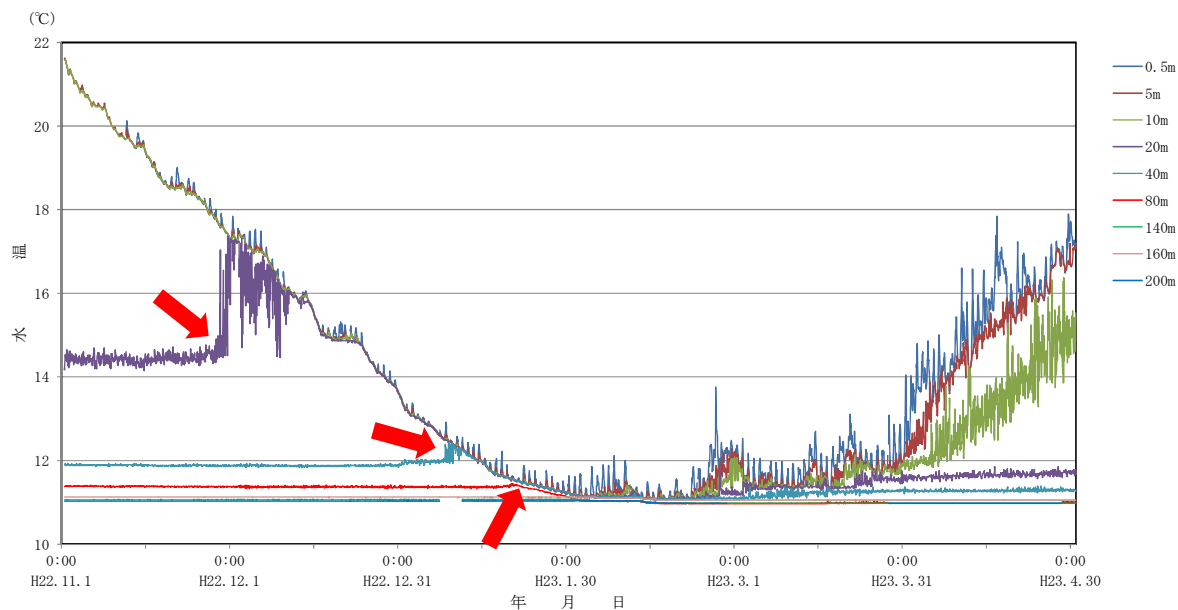


図 60 平成 22 年度鉛直水温測定結果（図 27 再掲）

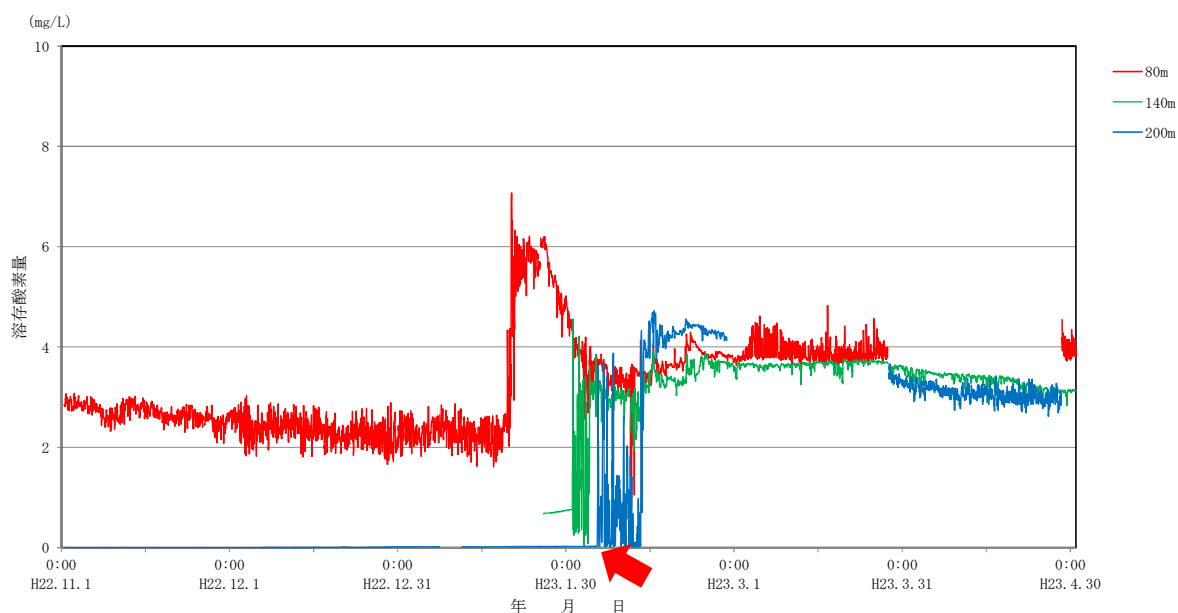


図 61 平成 22 年度鉛直溶存酸素量の測定結果（図 29 再掲）

## ウ 長期予測（温暖化の影響）

国連の気候変動に関する政府間パネル（I P C C）の第5次評価報告書（平成26年発表）によると、「21世紀末（2081年～2100年）の気温は、現在（1986～2005年）よりも上昇する。」としており、「今世紀末の世界平均気温変化は0.3～4.8℃の範囲（一部抜粋）となる可能性が高い」と予測している。

また、気象庁の地球温暖化予測情報第8巻（平成25年3月）は、温室効果ガス濃度の変化などを踏まえた気候モデルによるシミュレーションを行っており、21世紀末（2076～2095年を想定）には20世紀末（1980～1999年を想定）と比較して、日本付近で年平均気温が3℃程度上昇すると予測している。

池田湖においても近年30年間で下層や底層の水温が継続的に約1℃上昇しているところであるが、今後における更なる温暖化の影響を検討するため、100年間で平均気温が過去20年間に比べて更に線形に2℃及び5℃上昇する場合についてシミュレーションを行った（それぞれCase 2-2 及び Case 2-3）。

図62は更なる温暖化を考慮した場合の底層における溶存酸素量の変動であるが、今後平均気温が過去20年間に比べて変化しない場合であるCase 2-1は、溶存酸素量が繰り返し飽和濃度まで達している。一方、Case 2-2 及び Case 2-3は、いずれもピークトップが徐々に減少することが予測され、温暖化が今後更に進むと全層循環が発生しにくくなることが示唆された。

また、図63に示す底層における全りんの変動については、Case 2-1の場合においては減少するが、温暖化が更に進むCase 2-2 及び Case 2-3の場合には高い濃度のまま推移することが示唆された。

これらのことから、今後温暖化が更に進む場合において、底層の無酸素状態を改善するためには人工的な方策が必要であることが示唆された。

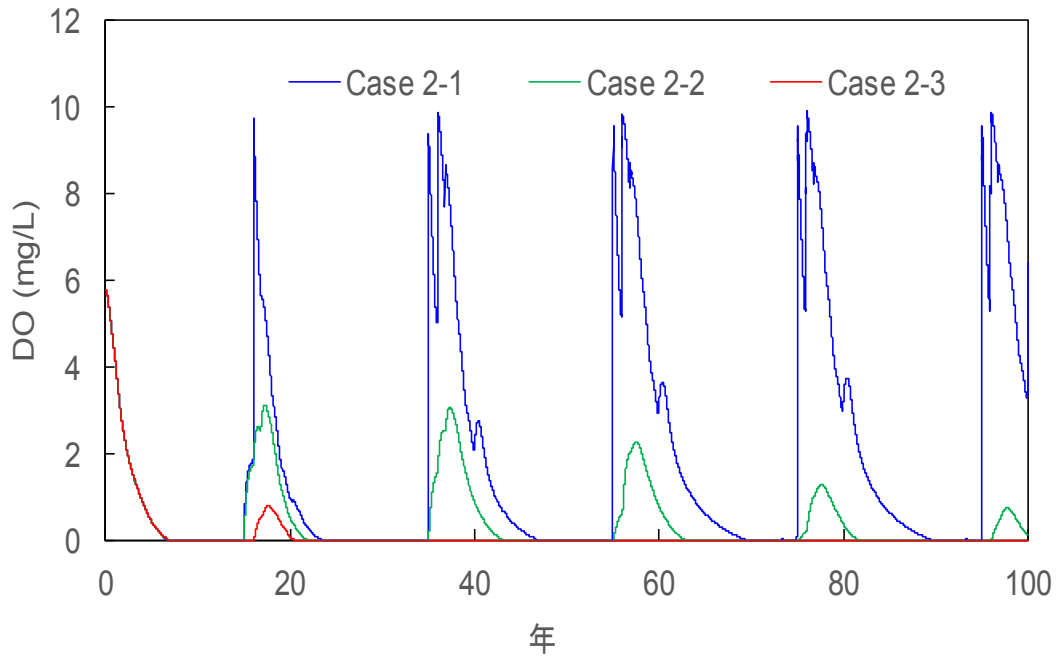


図 62 水面下 201.25m の溶存酸素量長期変動予測 (図 44 再掲)

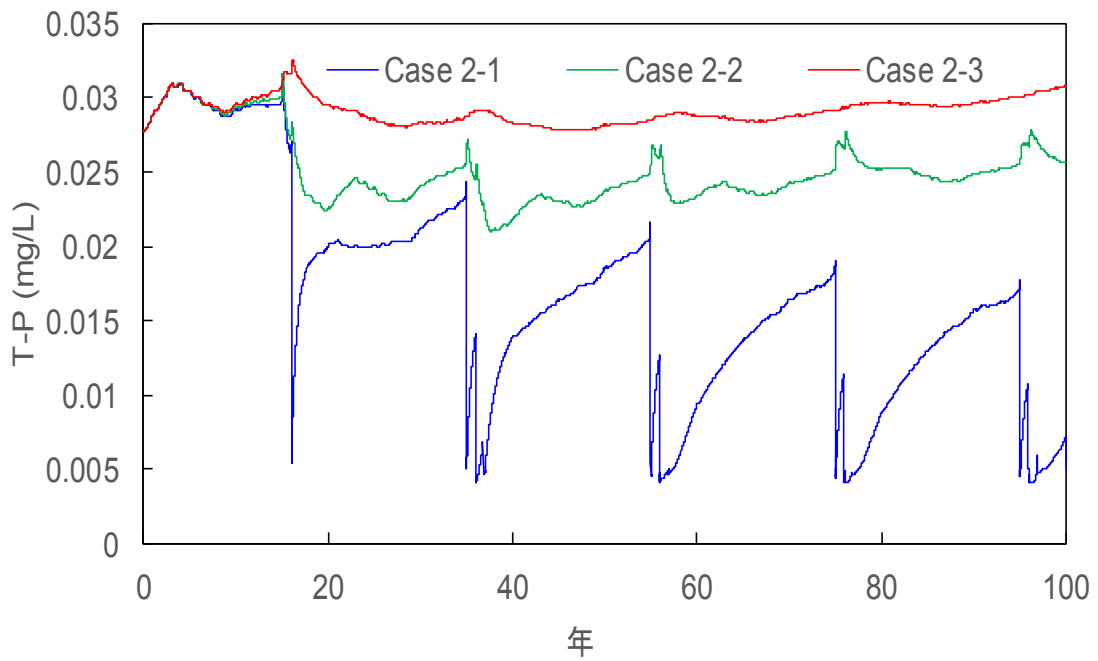


図 63 水面下 201.25m の全りん長期変動予測 (図 47 再掲)

## (2) 湖水の鉛直循環の発生する有効な方法

### ア 短期予測

池田湖における3河川からの導水及び畑かんへの送水については、従来どおりの利水を継続したうえで、底層の溶存酸素などの水質が、より改善されると考えられる条件として、湖心において底層（水深200m）から取水し湖外へ送水する場合のシミュレーションを行った。取水については、その量を変えてシミュレーションし、湖水の鉛直循環の発生について検討を行った。

また、より実用的な方策として、底層よりも浅い地点の下層（水深100m）において、同様に実施した場合についてもシミュレーションを行った（Case 3-6）。

なお、改善方策に係る効果の有無を知る目的からシミュレーション期間は1年とした。

さらに、取水量の条件については、池田湖に接続する5河川からの平水時における流入量の合計が0.23m<sup>3</sup>/秒であることを参考にして、Case 3-2の取水量を0.26m<sup>3</sup>/秒と設定した。続いてその2倍量、3倍量及び4倍量とし、それぞれCase 3-3、Case 3-4及びCase 3-5とした。

併せて、取水量については、「池田湖底層溶存酸素改善実験報告書<sup>5)</sup>（平成22年1月）」で使用した装置の仕様を参考にして実現可能な規模とした。この実験報告書の具体的な仕様は、湖水を鉛直下方へモーターを用いて移送するもので、移送管径1,000mmφ、モーター容量7.5kw、移送量2,400m<sup>3</sup>/時（=0.67m<sup>3</sup>/秒）という内容であった。ちなみに、この時の実験は、平成19年9月から1年間において、湖岸から300mの地点で湖水を表層から下層（水深100m）へ移送するもので、実験結果は「冬季の湖水循環により水深40m層～80m層まで広がった高濃度の溶存酸素が、本装置による循環流により春季から夏季に水深100m層へ供給されるなど、水深40m層～100m層の溶存酸素が高い濃度で維持されることが示唆された。」というものであった。

シミュレーション結果については、取水をしない場合であるCase 3-1と比較して行った。図64は底層の溶存酸素量の変動であるが、Case 3-1は徐々に減少したが、取水を行った場合のCase 3-2、Case 3-3、Case 3-4及びCase 3-5は、いずれも溶存酸素量は実施後において増加することが示唆された。溶存酸素量については、取水量の増加に伴って底層の溶存酸素量も増加することが示唆され、いずれの条件も1年後には増加する結果となった。

なお、下層（水深100m）から取水した場合においては、溶存酸素量の改善効果はみられるものの徐々に減少することが示唆された。一方、図65に示す底層の全りんについては、いずれの条件も水質悪化となる大きな増加は見られなかった。

これらのシミュレーションの結果から、底層の溶存酸素量を高めるためには、より底層で取水することが必要であること及び取水量は多いほど溶存酸素量の改善効果も大きいことが示唆された。

改善方策を実施する場合は、池田湖において底層の水深200mほどの深い位置において取水する技術的な方法や、0.26m<sup>3</sup>/秒の取水量を通年において湖外へ送水し続けるコスト的なことや、送水先を河川若しくは畑かん用水とする地域的な課題について、あらかじめ検討することが必要であると考えられる。

また、具体的には池田湖の利水については、現在、主に畑かんに送水しているが、送

水に当たっては水面標高が 62m から 66m の範囲でのみ行うことが地域で決められているため、水面標高が 62m よりも下方の水深で取水することや、湖外へ送水する場合は、底層の湖水が嫌気状態となっており異臭のする恐れがあるため、池田湖唯一の流出河川である新川へ送水するには、河川管理者や内水面漁協などの各関係者との協議があらかじめ必要であり、さらには河川等における生態系に対する影響の有無などについても、あらかじめ検討したうえで実施することが必要である。

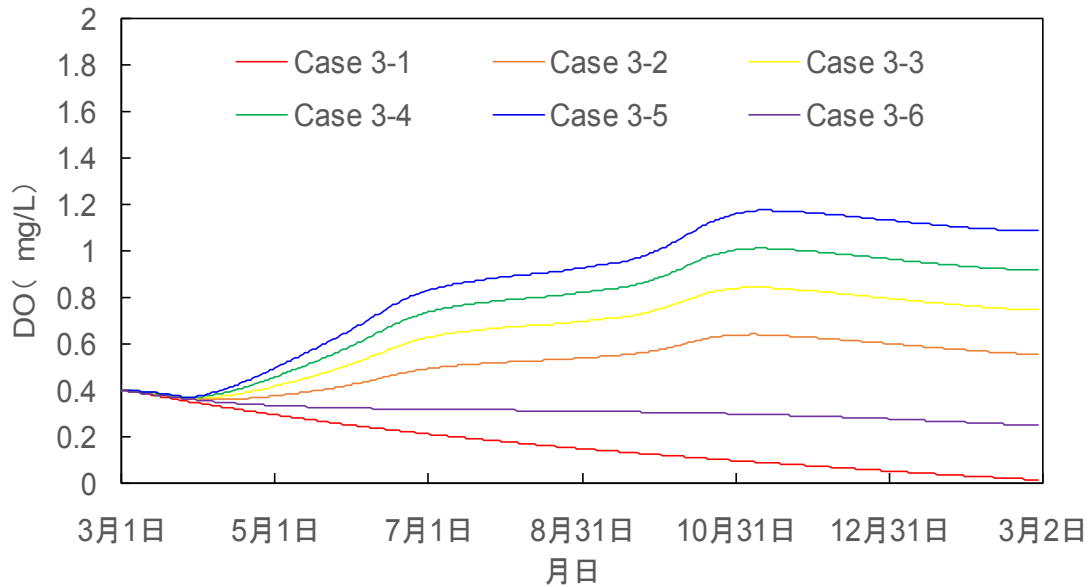


図 64 水面下 201.25m の溶存酸素量短期変動予測 (図 49 再掲)

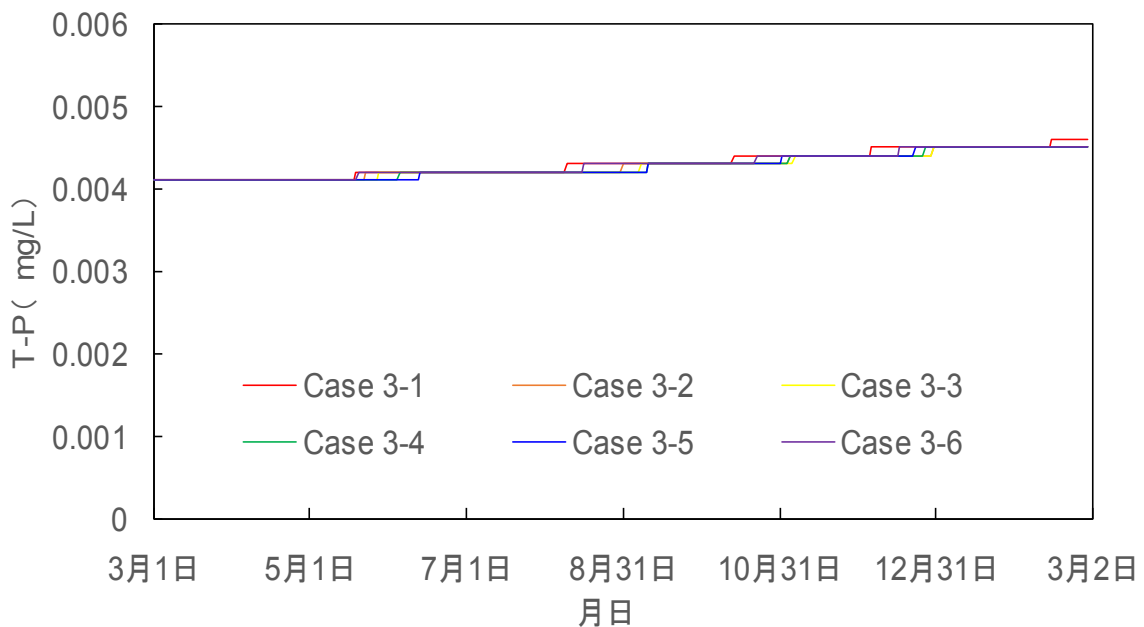


図 65 水面下 201.25m の全りん短期変動予測 (図 52 再掲)

## イ 中期予測

温暖化の影響として 100 年間で 2℃線形的に気温が上昇することを加味したうえで、改善方を講じた場合における底層の溶存酸素量等の水質についてシミュレーションを実施した。改善方の条件としては、短期予測の課題等を踏まえて、湖内において湖心で湖水を鉛直循環する場合について行った (Case 4-2, Case 4-3)。

シミュレーションにおける鉛直方向への移送量は、0.26m<sup>3</sup>/秒とし、上方(底層から表層)へ移送する場合 (Case 4-2) 及び下方(表層から底層)へ移送する場合 (Case 4-3) についてシミュレーションを行った。期間は近い将来における底層等の水質を予測することを目的としたことから 20 年間で行った。

また、改善方を実施する際の運転コストの低減を考慮して、底層から取水する期間を秋から冬に集中的に行い湖外へ送水する場合 (Case 4-4) と、改善策がより容易に実施出来ることを考慮して、湖心ではなく湖岸により近い湖端(取水位置が 200m よりも 5 m 程度高い位置)において通年で取水し湖外へ送水する場合 (Case 4-5) についてもシミュレーションを行った。

シミュレーション結果については、湖心において底層から取水量 0.26m<sup>3</sup>/秒を通年で取水する場合の Case 4-1 と比較して行った。図 66 は底層の水温変動であるが、Case 4-2 及び Case 4-3 については、水温が徐々に上昇するものの後年において鉛直循環が見込まれる時期は低下することが示唆された。Case 4-4 及び Case 4-5 については、Case 4-1 と同等の結果であった。

図 67 の溶存酸素量については、Case 4-2 及び Case 4-3 の場合、年間における季節変動はあるもののほぼ同濃度で推移し維持されることが示唆された。Case 4-4 及び Case 4-5 については、後年の鉛直循環が見込まれる時期において一時的に飽和酸素量まで上昇するもののその後は減少することが示唆された。図 68 の全窒素については、いずれの条件も水質悪化となる大きな増加は見られなかった。図 69 の全りんについては、Case 4-2 及び Case 4-3 の場合、年間の季節変動はあるものの徐々に濃度は減少し水質が改善することが示唆された。Case 4-4 及び Case 4-5 については、後年の鉛直循環が見込まれる時期において一時的に濃度が低下し水質が改善するもののその後は増加することが示唆された。

これらのシミュレーション結果から、底層の溶存酸素量を高めるためには、湖内において湖水を鉛直方向に移送することが、溶存酸素量の改善において効果の大きいことが示唆された。

池田湖の水深が 200m ほどもあることから、底層においては水圧が高いことを考慮し、移送する技術的な方法についても、あらかじめ検討することが必要であると考えられる。

また、注意すべき点としては、上方(底層から表層)へ湖水を移送する場合は、底層の湖水が嫌気状態であるため異臭のする恐れがあることから、畑かんに利用する場合は関係者との協議があらかじめ必要であることや、池田湖近隣の住民等に対してあらかじめ周知し理解を得ることが必要であると考えられた。



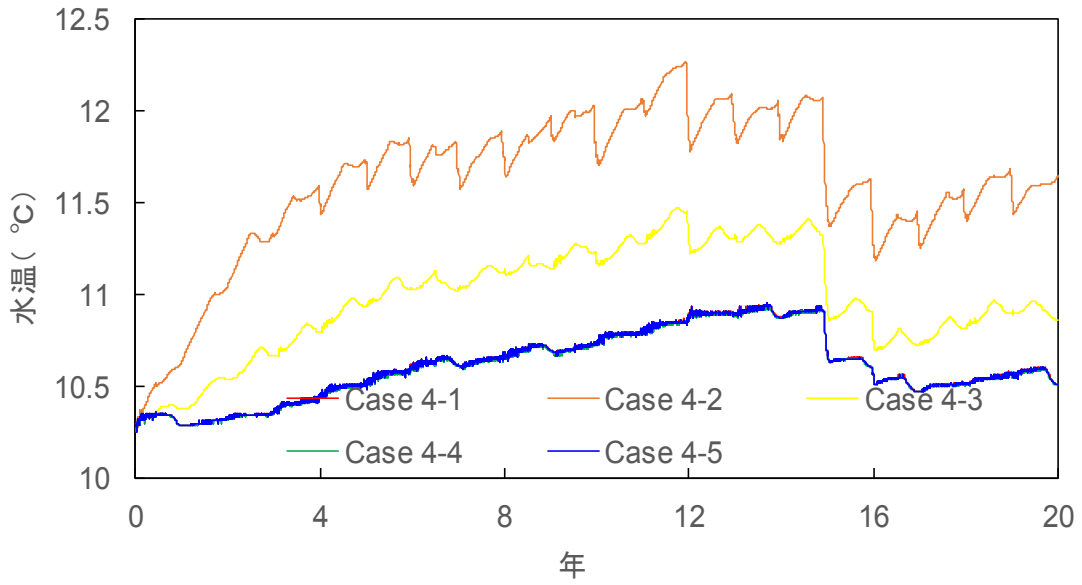


図 66 水面下 201.25m の水温中期変動予測 (図 53 再掲)

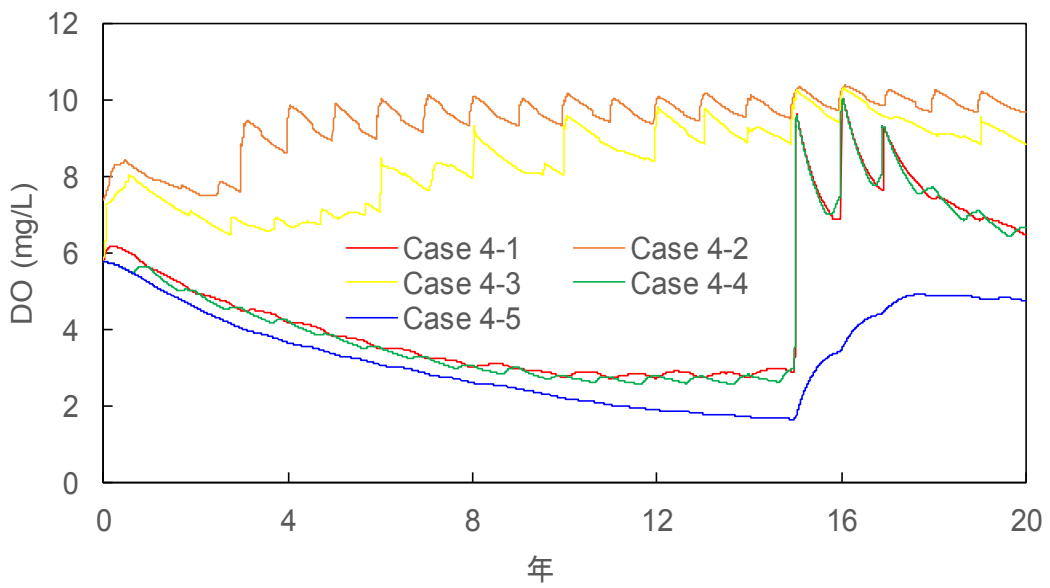


図 67 水面下 201.25m の溶存酸素量中期変動予測 (図 54 再掲)

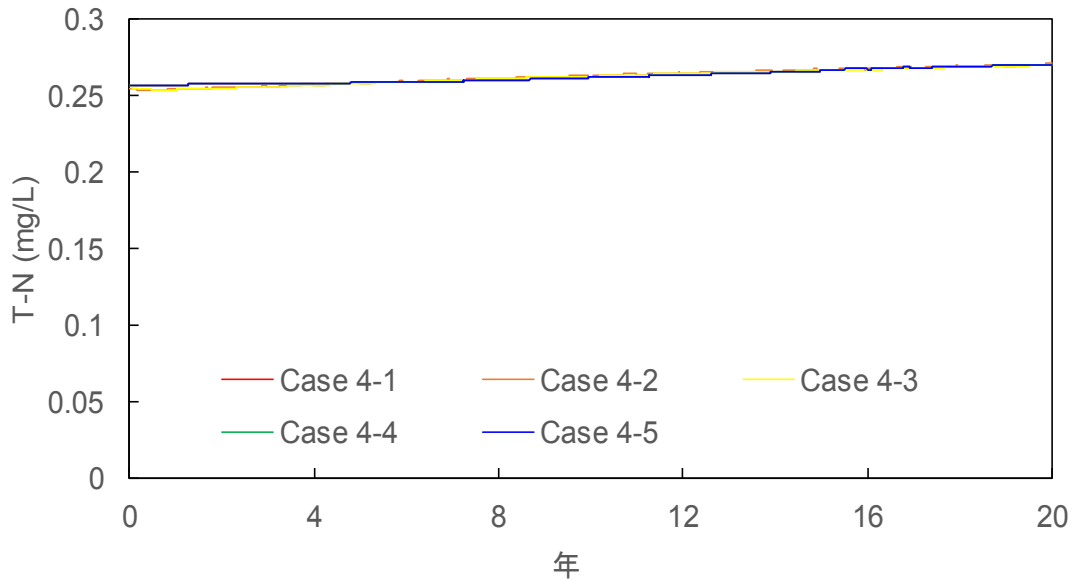


図 68 水面下 201.25mの全窒素中期変動予測 (図 56 再掲)

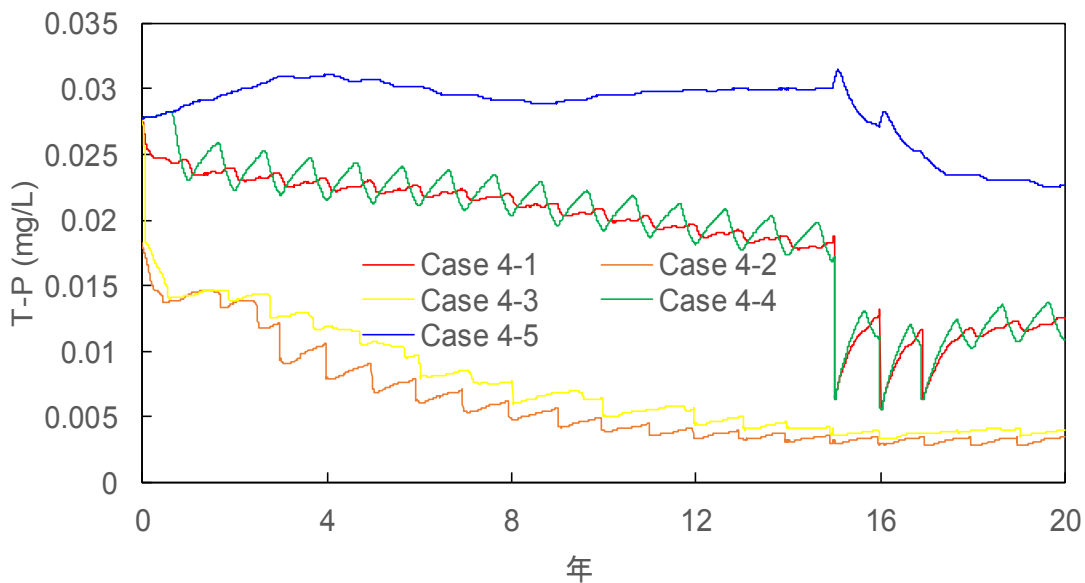


図 69 水面下 201.25mの全りん中期変動予測 (図 57 再掲)

以上の短期予測及び中期予測によるシミュレーションの結果から考えられるより実用的な池田湖の底層の無酸素状態の改善方策としては、①湖内で循環すること（鉛直下方への移送が望ましい）、②より底層に近い位置から取水すること、続いて③湖心で実施すること、④通年で実施することが重要であることを示唆する結果であった。

また、改善方策の効果が現れるのは、Case 4-2, Case 4-3 の条件で実施した場合には、溶存酸素量についてみると、実施後数年で効果が現れ、底層の溶存酸素量が高濃度で維持され続けることを示唆する結果であった。

なお、今回のシミュレーションについては湖心の水質に係る検討を行ったものであるが、池田湖の底層全体の溶存酸素量の改善についても知見を得る必要があると考える。

## 7 おわりに

九州最大の湖である池田湖は、畑かんへの送水や水道水源等への利用など地域の産業や生活と密接に関連しているとともに、単なる調整池としての利用に留まらず、そこに生息している鳥類や魚類などの生物にとっても生態系を形成する重要な場所である。

当検討会では、池田湖の水質等について調査・分析を行うとともに、数値モデルを用いたシミュレーションにより温暖化の影響に係る水質予測を行うとともに、底層の無酸素状態を改善するための全層循環の可能性について知見を得た。その結果、全層循環を発生するためには、池田湖のより底層から取水し、湖内において鉛直循環する方法が最も水質改善に効果的であることが示唆された。

池田湖の水質については、底層における無酸素状態が継続している状況であることから、引き続き水質等を計画的に調査・分析し、早い段階で悪化の兆候を把握するとともに、その推移を注視していくことが必要である。特に冬季については調査頻度を高めるとともに、必要に応じて分析結果については専門家の意見をいただきながら適応策を検討するとともに、関係機関・団体に情報提供を行い周知し共通認識を持つことが重要である。

これまで鹿児島県、指宿市及び南九州市で構成する池田湖水質環境保全対策協議会は、池田湖の水質保全を図るため、地域の特色を活かしたイベントなどを開催し、より多くの方々に関心を持っていただくためのさまざまな普及啓発に努めてきている。

さらに、指宿市では池田湖の周辺に住む住民に対し高度処理合併浄化槽の設置について補助金を設けるなど、生活排水の湖への流入低減に対する施策を実施するとともに、地域住民と官民一体となった清掃活動を行うなどの取り組みを進めている。

今後とも、池田湖の重要性・唯一性について関係機関や地域の方々理解・協力しつつ、将来にわたって「美しい池田湖」であり続けるため、各々の取り組みがますます推進されることを期待する。

## 謝辞

本検討会における水質シミュレーションを実施するにあたり、鹿児島大学農学部 初井和朗教授に池田湖における溶存酸素量等に関する測定データをご提供いただいた。また鹿児島県農地整備課及び南薩地域振興局農村整備課に池田湖における送水量などに関するデータを提供いただいた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 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
- 3) 北澤大輔・石塚瞳・金野祥久・熊谷道夫 (2004) : 流動場－生態系結合数値モデルによる琵琶湖の水質解析, 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書, 51-56
- 4) 北澤大輔 (2011) : 深水湖の長期水質予測シミュレーション, 生産研究, 63(1), 65-68
- 5) 池田湖水質環境保全対策協議会・鹿児島県・三井造船株式会社 (2010) : 池田湖底層溶存酸素改善実験報告書, 1

## 池田湖底層水質改善方策検討会会則

(背景・目的)

第1条 池田湖においては、水質環境管理計画を策定し、総合的な環境保全対策を推進し、CODや窒素、りん汚濁負荷量削減を図っており、その水質は概ね良好な状況にある。

一方、十分な湖水循環の発生がなかったことなどから、底層では貧酸素状態が継続し、窒素やりん濃度が上昇傾向にある。

本検討会では、底層の貧酸素状態を改善するために、数値モデル等を用いた数値シミュレーション結果を踏まえ、有効な方策について提示することとする。

(組 織)

第2条 検討会は、別表に掲げる委員で構成する。

2 検討会には委員長を置き、委員長には環境保全課長をもってあてる。

3 事務局は、環境保全課環境管理係に置く。

(会 議)

第3条 会議は、委員長が必要と認めたときに開催する。

2 委員長は、必要と認めるときは、検討委員以外に関係機関の担当者等を会議に出席させることができる。

(その他)

第4条 この規約に定めるもののほか、必要な事項は、事務局で定める。

附 則

この会則は、平成24年12月26日から施行する。

### 検討会委員

東京大学生産技術研究所准教授 北澤 大輔

鹿児島大学農学部教授 舩井 和朗

一般財団法人鹿児島県環境技術協会環境調査部長 小湊 信一

指宿市環境政策課長 下吉 一宏

鹿児島県環境保健センター所長 大坪 充寛

鹿児島県環境林務部環境保全課長 藪 平一郎



発行／鹿児島県環境林務部環境保全課

〒890-8577 鹿児島市鴨池新町 10-1

TEL 099-286-2624

FAX 099-286-5548

URL <http://www.pref.kagoshima.jp/kurashi-kankyo/kankyo/suishitu/index.html>