

池田湖の底層水質の改善方策に係る報告書



平成 29 年 3 月

池田湖底層水質改善方策検討会

写真1	写真2
	写真3
写真4	写真5

写真1（池田湖と開闢岳）

池田湖は約5,000年前の火山活動によってできた水面標高66mに位置するカルデラ湖で、長径4km、周囲15km、最大水深233mの九州最大の湖である。

開闢岳は薩摩富士の別名を持つ標高924mの火山で、周辺地域は景勝地であり霧島錦江湾国立公園に含まれる。

写真2（茶畑）

池田湖を調整池として利用し、国及び県による畑地かんがい事業が実施され、指宿市、枕崎市、南九州市の畑地60.72km²において茶や野菜などの生産が行われるようになった。

写真3（オオウナギ）

池田湖に生息しているオオウナギは大きいもので体長2m、胴回り50cmにもなる。池田湖には多く生息していることからオオウナギ群生地として指宿市の天然記念物に指定されている。

写真4（頭首工）

畑地かんがい事業においては、池田湖の近隣にある3河川（馬渡川、高取川、集川）にそれぞれ頭首工を建設して池田湖に導水している。写真は馬渡川の頭首工である。

写真5（菜の花マラソン）

日本で一番早い年明け1月早々に市民マラソン大会として池田湖の湖畔などを走破する「いぶすき菜の花マラソン」が開催される。国内外から1万5千人ほどのランナーが参加する。

目 次

1	はじめに	1
2	池田湖に係る諸状況	2
	(1) 地理等の概要	2
	(2) 湖水の鉛直循環	2
	(3) 池田湖水質環境管理計画	3
	(4) 畑地かんがい等への利水	3
	(5) 3河川からの導水	3
	(6) 生物相	5
3	池田湖の水質等の状況	5
	(1) 水質汚濁に係る環境基準の類型指定等	5
	(2) 水質等の経年変化	7
	(3) 導水3河川の水質等の状況	20
	(4) 流向・流速	23
4	湖水の鉛直循環時の水質変化	25
	(1) 水温、溶存酸素量の鉛直連続測定	25
	(2) 全層循環における水質変化	30
5	池田湖の水質シミュレーション	33
	(1) シミュレーション条件・境界条件	33
	(2) 水質再現シミュレーション	37
	(3) 水質予測シミュレーション	40
	(4) 水質改善方策の検討	46
	(5) 水質改善予測シミュレーション	52
6	底層水質の改善方策	58
	(1) 湖水の鉛直循環の要件	58
	(2) 湖水の鉛直循環の発生する有効な方法	62
7	おわりに	67

謝 辞

参考文献

池田湖底層水質改善方策検討会会則

検討会委員

1 はじめに

閉鎖性水域である池田湖においては、昭和 56～57 年に透明度の低下や淡水赤潮が発生するなど水質の悪化が顕在化したことから、鹿児島県は、昭和 58 年 3 月に池田湖の水質を将来にわたって良好に保全するため「第 1 期池田湖水質環境管理計画」を策定した。その後数度の計画改訂を行い、平成 23 年 3 月に「第 4 期池田湖水質環境管理計画」（以下、「第 4 期管理計画」）を策定し、水質汚濁の発生源対策や水質環境保全の普及啓発に係る総合的な対策を推進してきている。

第 4 期管理計画における課題の一つは、近年池田湖において表層から底層までに及ぶ湖水の鉛直循環が不十分なため、表層の溶存酸素を多く含んだ湖水が底層に供給されず、底層において無酸素状態が続いており、底泥中の窒素やりんが溶出・蓄積し底層の水質悪化が顕在化していることである。このような状況において、表層から底層までに及ぶ湖水の鉛直循環が発生すると、底層域の窒素やりんが表層に供給され、赤潮の発生を招きやすくなる懸念される。また、畑地かんがいへの送水などにも影響を与えることが懸念される。

そこで、第 4 期管理計画では、底層水の水質状況を把握することや底層の水質改善を推進するため、冬季の気温や湖水の水温変化が、鉛直循環に及ぼす影響について解析することとしている。また、地球温暖化の鉛直循環に対する影響を考慮した場合の溶存酸素、窒素及びりんなどの水質変化について、数値モデルによ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方策について、数値モデルを用いて湖水の鉛直循環の可能性や水質への影響をシミュレーションし、専門家などによる検討・意見を踏まえて実用可能な改善方策を提示することとしている。

このようなことから鹿児島県は、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、池田湖の底層水質に係る改善方策について検討を進めてきた。検討会では、表 1 の内容で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た。この数値モデルは、東京大学の北澤氏らが研究しているものであり、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・りん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並びに琵琶湖における気温上昇と水質・生態系に係る影響について研究がなされている^{1) - 4)}。

この報告書は、池田湖の底層の無酸素状態を改善するため、より実用的な湖水の鉛直循環の方策について、有効な方法を検討するための知見を提供することを目的とする。

表 1 検討会における作業分担

機 関 名	内 容
東京大学生産技術研究所	数値モデル・水質シミュレーション
鹿児島大学農学部	水質調査・分析
指宿市環境政策課	水質調査・分析
(一財)鹿児島県環境技術協会	水質等調査・分析
鹿児島県環境保全課、環境保健センター	水質等調査・分析

2 池田湖に係る諸状況

(1) 地理等の概要

池田湖は鹿児島県本土南部に位置する水面標高 66m のカルデラ湖で、長径 4 km、周囲 15km、水面積 10.95km² のやや楕円形をした最大水深 233m の深水湖である（写真 1）。

周辺地域は年平均気温 18℃前後と温暖であり、日最高気温 30℃以上で、近年では最低気温 0℃以上の年もみられる。年降水量は 1,500～2,500mm である。



写真 1 池田湖の周辺状況（北東側を望む）

(2) 湖水の鉛直循環

従来、池田湖は厳冬季にのみ表層と底層の湖水が鉛直循環する湖とされているが（図 1）、近年においては温暖化の影響により冬期においても表層の湖水が十分に冷却されず、鉛直方向の循環が底層まで到達しない状態が続いている。このため溶存酸素を多く含む表層の湖水が底層に供給されないため、底層の湖水が無酸素状態となり底泥中から窒素やリンの溶出などがおこり、底層における窒素やリンの濃度が高くなり水質悪化が顕在化してきている。今後このような状態で底層の溶存酸素が上昇する規模の鉛直循環（以下、「全層循環」）が発生した場合、表層において窒素やリンの濃度が上昇するとともに、溶存酸素量が低下するため、水質や生態系に影響を及ぼすことが懸念される。

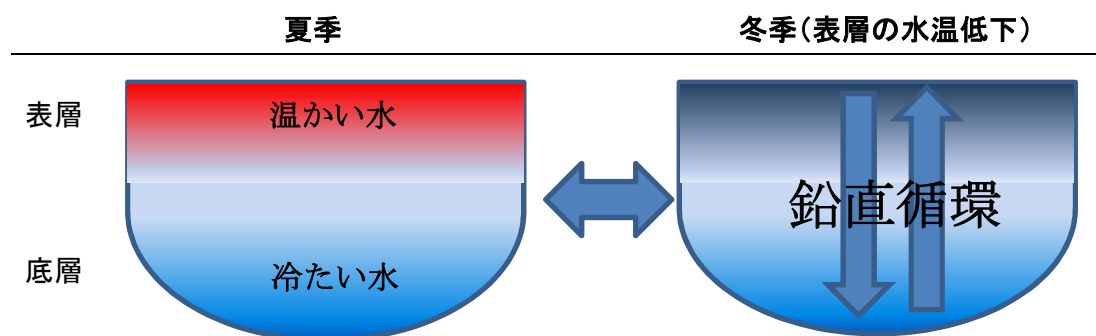


図 1 湖水の鉛直循環のイメージ図

(3) 池田湖水質環境管理計画

鹿児島県は、池田湖において透明度の低下や、淡水赤潮の発生などがみられたことから、昭和 58 年 3 月に水質が将来にわたって良好に保たれるよう池田湖の集水域を対象とする池田湖水質環境管理計画を策定し「水質環境保全目標」を設定した。

管理計画では、化学的酸素要求量（以下、「COD」）、全窒素、全りんについてそれぞれ汚濁負荷量を算出しており、平成 20 年度の調査結果は表 2 のとおりであった。COD については降雨（直接）や生活排水に、全窒素は 3 河川からの導水や降雨（直接）に、全りんは生活排水や農畜産・山林に由来する割合が高かった。また、工場や水産養殖については、平成 20 年度の調査時点においては事業活動がなかったため、これらに係る汚濁負荷はなかった。

表 2 池田湖に流入及び流出する汚濁負荷量 (単位：kg/日)

区 分	汚濁負荷源	COD	全窒素	全りん	
流入	人為的汚濁源	生活排水	43	9	1.3
		農畜産・山林	41	22	1.3
		工 場	0	0	0
		水産養殖	0	0	0
		3 河川からの導水	38	112	0.9
	降雨（直接）	136	28	0.1	
流出	畑かんへ送水	31	3	0	
	漏 水	100	13	1.6	

※平成 20 年度調査結果

(4) 畑地かんがい等への利水

昭和 45 年から平成 6 年にかけて国及び県による南薩地域における畑地かんがい事業（以下、「畑かん」）が行われたが、池田湖は調整池の役割を担っている。池田湖北西部の畑地 60.72 km²において、茶や野菜等の生産が盛んになった。

畑かん以外の利水は、指宿市内には池田湖からの伏流水とされる「京田湧水」があり、その湧水は平成の名水百選にも選定されており、唐船峡においてはそうめん流しにも利用されている。また、指宿市は池田湖近隣において地下水を水道水源に利用している。

(5) 3 河川からの導水

池田湖には流入 5 河川と流出 1 河川が接続している。流入河川はいずれも小規模であり、湖の直接集水域がわずか 12.34km²と狭く十分な畑かん用水が確保できないことから（図 2）、近隣の 3 河川（馬渡川、高取川及び集川）から池田湖へ導水している（図 3）。

この 3 河川からの導水量と畑かんへの送水量とのバランスについては、池田湖の水面標高が 62m から 66m の範囲内で水収支が成り立つように取り決められている。

また、導水している 3 河川の窒素濃度が池田湖の湖水よりも高濃度であるため、可能な限り導水量を抑制することが、池田湖の窒素濃度の安定若しくは上昇の防止には効果的である。このことから管理計画においては、年間の平均的な導水量を約 800 万 m³以下に制限することにより、全窒素に係る汚濁負荷を許容量以下に出来ると予測している。

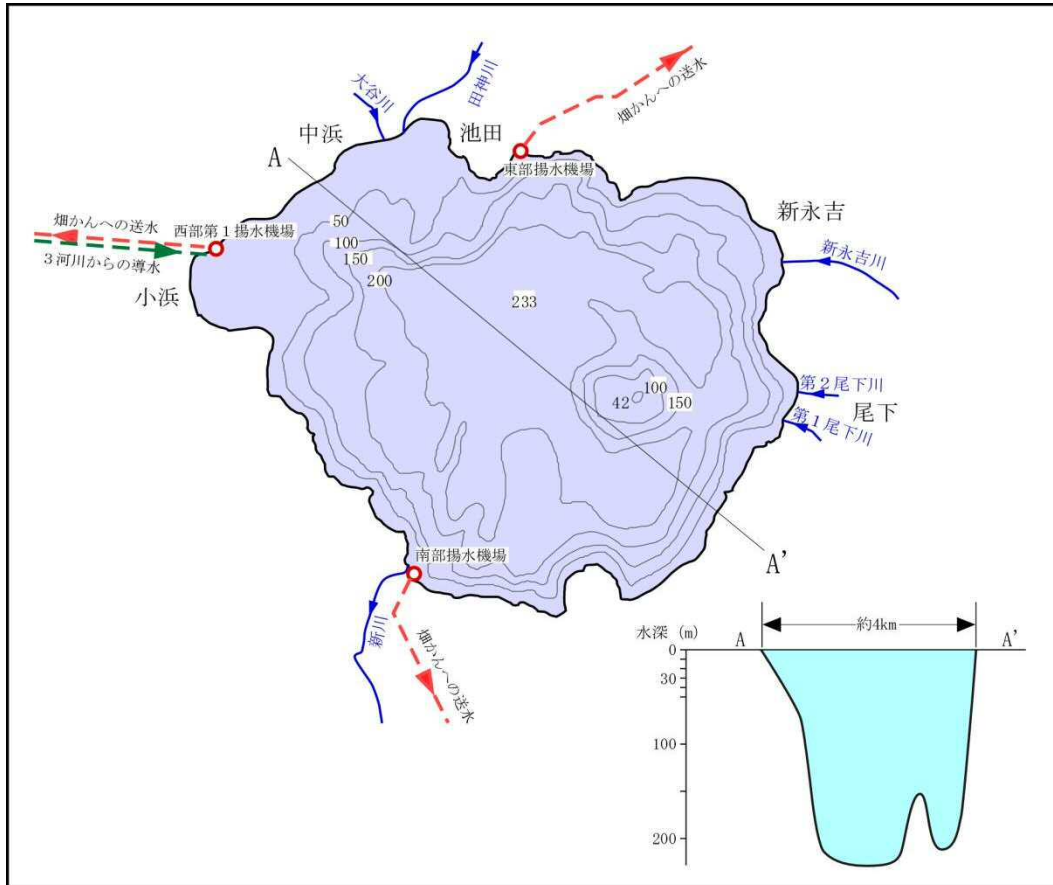


図 2 池田湖に接続する河川及び畑かんへの送水状況

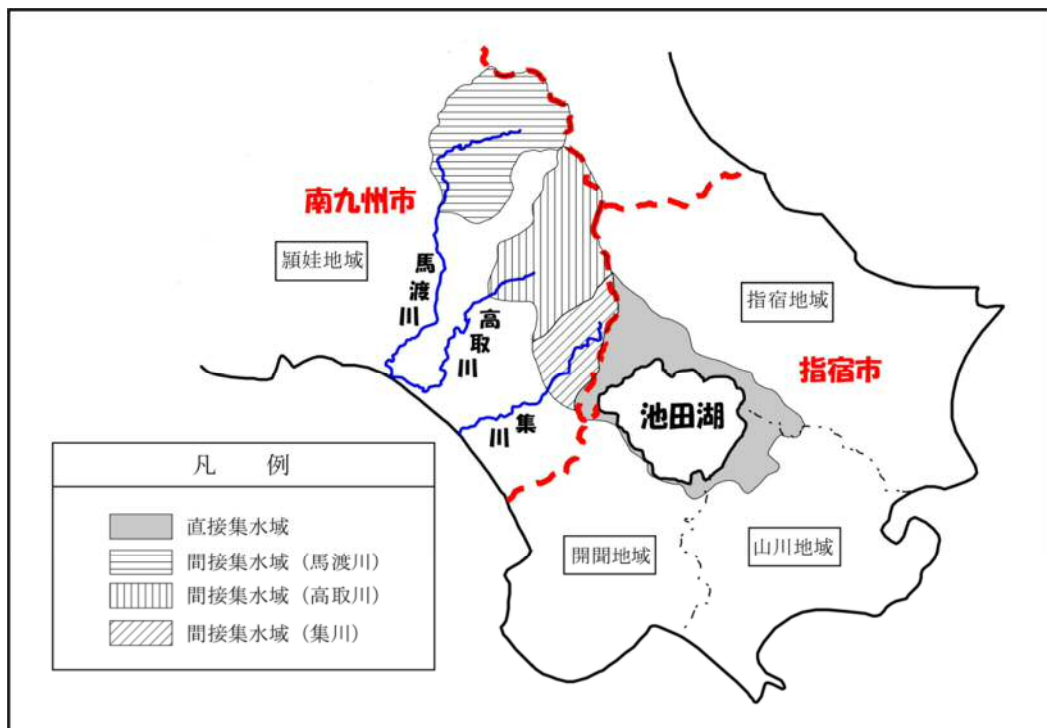


図 3 池田湖の直接集水域及び導水 3 河川による間接集水域

(6) 生物相

池田湖にはもともと魚類はほとんど生息していなかったが、放流事業以後、コイ、ワカサギ、アユ等が生息している。管理計画に記載されている生息情報によると魚類は 25 種で、このうち保護上重要な魚類はウナギ、オオウナギ、ドジョウ、メダカである。特に、オオウナギは、池田湖には多く生息していることからオオウナギ群生地として指宿市の天然記念物に指定されている。近年ドジョウ、メダカについては確認されていない。

保護上重要な貝類としては、ドブガイ（ヌマガイ）、カラスガイ、モノアラガイが確認されている。

また、水草植物は 11 種が確認され、保護上重要な種としてミズハコベ、クロモなど 9 種が確認されている。

3 池田湖の水質等の状況

(1) 水質汚濁に係る環境基準の類型指定等

ア 環境基本法に基づく水質汚濁に係る環境基準の類型指定状況

池田湖においては、「水質汚濁に係る環境基準について(昭和 46 年環境庁告示第 59 号)」に基づき、生活環境の保全に関する環境基準に対して、昭和 52 年 6 月に COD 等 5 項目の A 類型、昭和 60 年 6 月に窒素及びりんの II 類型、平成 22 年 3 月に水生生物の生息状況の生物 B 類型に指定されている（表 3）。

また、池田湖では現在類型指定されていないが平成 28 年 3 月に施行された底層溶存酸素量に係る生活環境の保全に関する環境基準は、湖沼において水生生物が生息・再生産する場の適応性として 2.0~4.0mg/L 以上が望ましいとしている（表 4）。

表 3 池田湖における生活環境の保全に関する環境基準の指定内容

類 型	項 目	基 準 値	適 応 性
A	水素イオン濃度 (pH)	6.5 以上 8.5 以下	水道 2, 3 級 水産 2, 3 級 水浴 工業用水 1, 2 級 農業用水 環境保全
	COD	3 mg/L 以下	
	浮遊物質	5 mg/L 以下	
	溶存酸素量	7.5 mg/L 以上	
	大腸菌群数	1,000MPN/100mL 以下	
II	全窒素 ^{注)}	0.2 mg/L 以下	水道 1, 2, 3 級 水産 1, 2, 3 種 水浴 工業用水 農業用水 環境保全
	全燐	0.01 mg/L 以下	
生物 B	全亜鉛	0.03 mg/L 以下	コイ、フナ等比較的高温域を好む水生生物及びこれらの餌生物が生息する水域
	ノニルフェノール	0.002 mg/L 以下	
	直鎖アルキルベンゼン スルホン酸及びその塩	0.05 mg/L 以下	

注) 全窒素については当分の間適用しない。

表 4 底層溶存酸素量に係る生活環境の保全に関する環境基準（湖沼）

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

備 考

- 1 基準値は、日間平均値とする。
- 2 底面近傍で溶存酸素量の変化が大きいが想定される場合の採水には、横型のバンドン採水器を用いる。

イ 池田湖水質環境管理計画による水質環境保全目標等の設定状況

管理計画において、池田湖の閉鎖性水域という特性等を考慮して、水質汚濁の代表的指標であるCOD及び植物プランクトンの増殖などによる水質汚濁を抑制する観点から、全窒素、全りんについて水質環境保全目標を設定し、池田湖の水質を将来とも良好に保全することとしている。

また、同目標値を維持・達成するために各項目に対して、許容汚濁負荷量を定めている（表 5）。

表 5 水質環境保全目標及び許容汚濁負荷量

項 目	水質環境保全目標値及び許容汚濁負荷量		
	COD	全窒素	全りん
水質環境保全目標	3mg/L 以下	0.2mg/L 以下	0.01mg/L 以下
許容汚濁負荷量	419kg/日	135kg/日	18.8kg/日

備 考

- 1 CODの水質環境保全目標値は、各基準点における全層平均の年間75%値とする。
- 2 全窒素及び全りんの水質環境保全目標値は、各基準点における表層の年間平均値とする。

(2) 水質等の経年変化

ア 調査地点

池田湖においては、公共用水域の常時監視調査を実施している。本報告書の調査地点は湖心（基準点2）とし、水質等の経年変化は水深0.5m（以下、「表層」）、100m（以下、「下層」）、200m（以下、「底層」）で把握した。

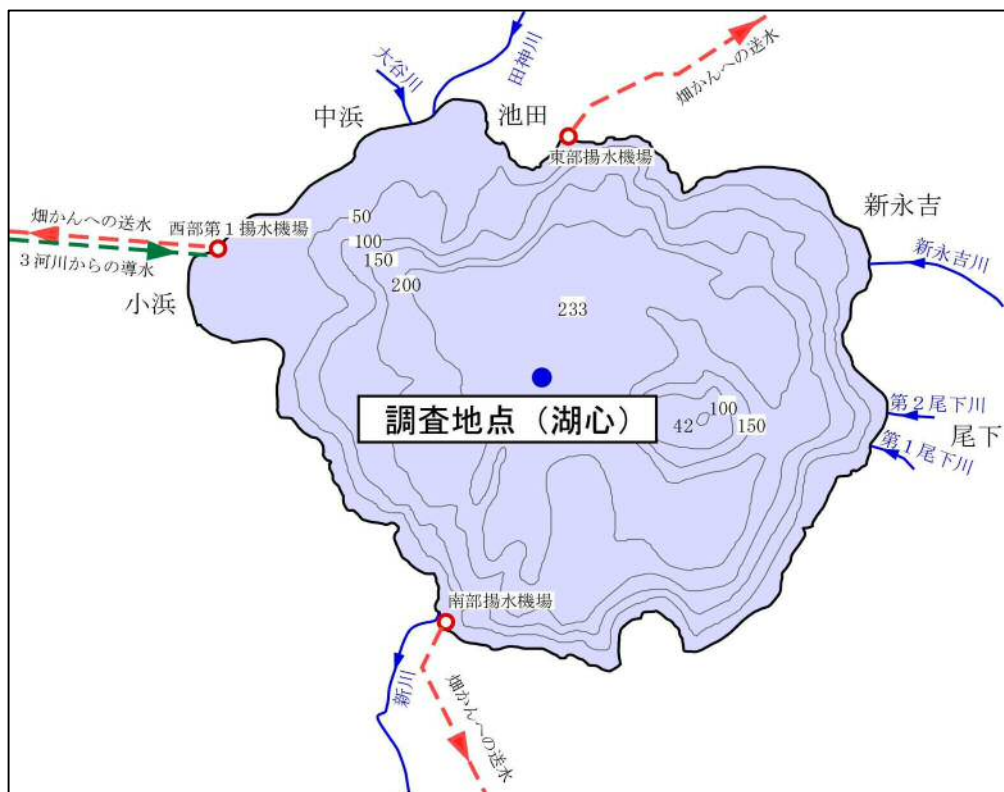
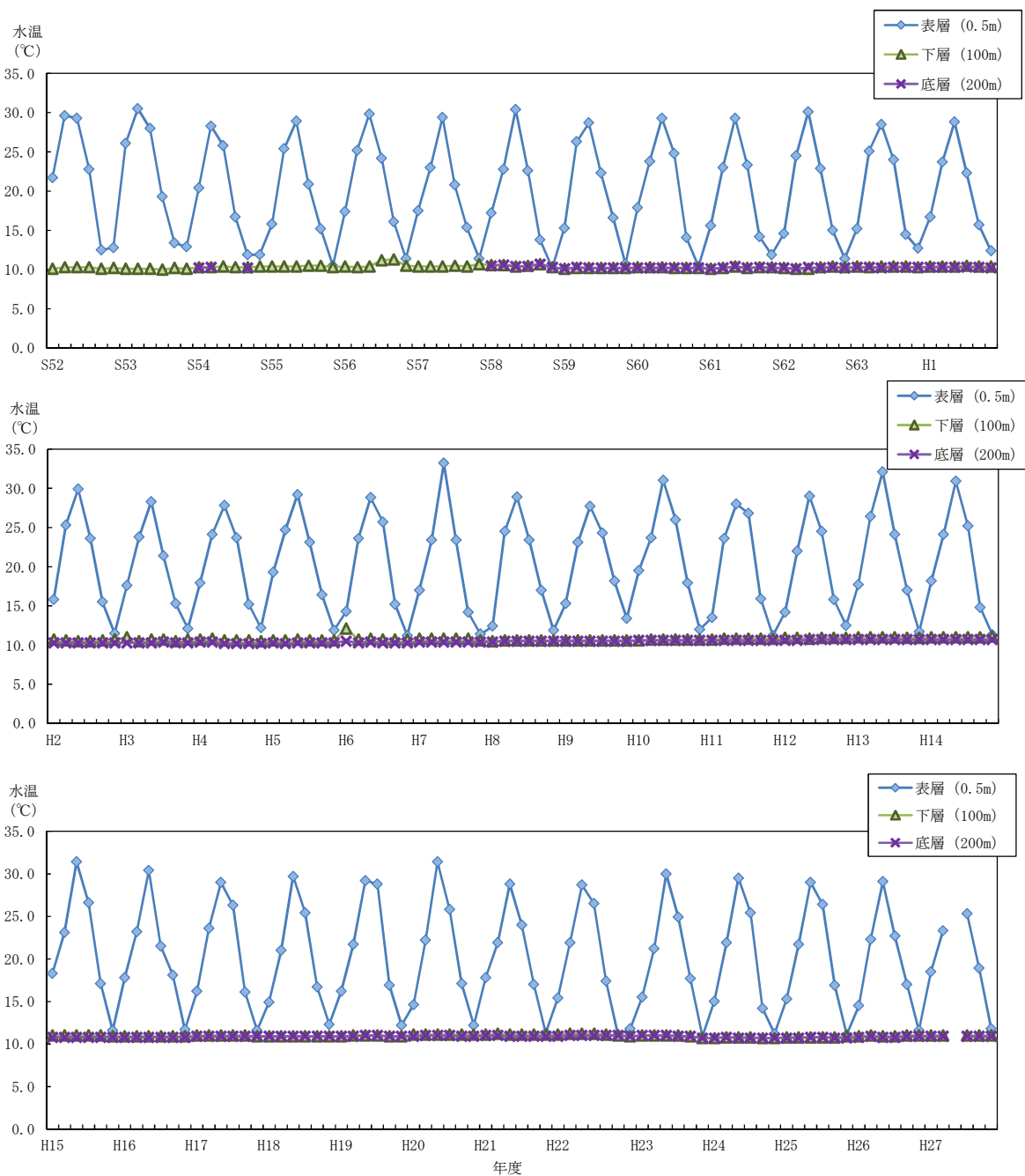


図 4 調査地点の位置

イ 水温

(7) 層別水温の推移

図 5 に示す水温の推移をみると、表層（0.5m）の水温は気温の影響を受け、夏季は30℃前後まで上昇し、冬季は概ね10～13℃に低下する。下層（100m）や底層（200m）では大幅な変動はみられない。



※平成 27 年 8 月は欠測である。

図 5 層別水温の推移

(4) 冬季水温の推移

図 6 に示す冬季水温（各年度 2 月の水温）の推移をみると、表層（0.5m）では気象等の影響を強く受け 10～13℃の範囲で変動しながら概ね横ばいで推移している。下層（100m）や底層（200m）では平成 22 年度までの約 30 年間で約 1℃の継続的な水温上昇がみられ、平成 23 年度に 0.3℃の水温低下が確認されたが、その後再び上昇傾向を示している。

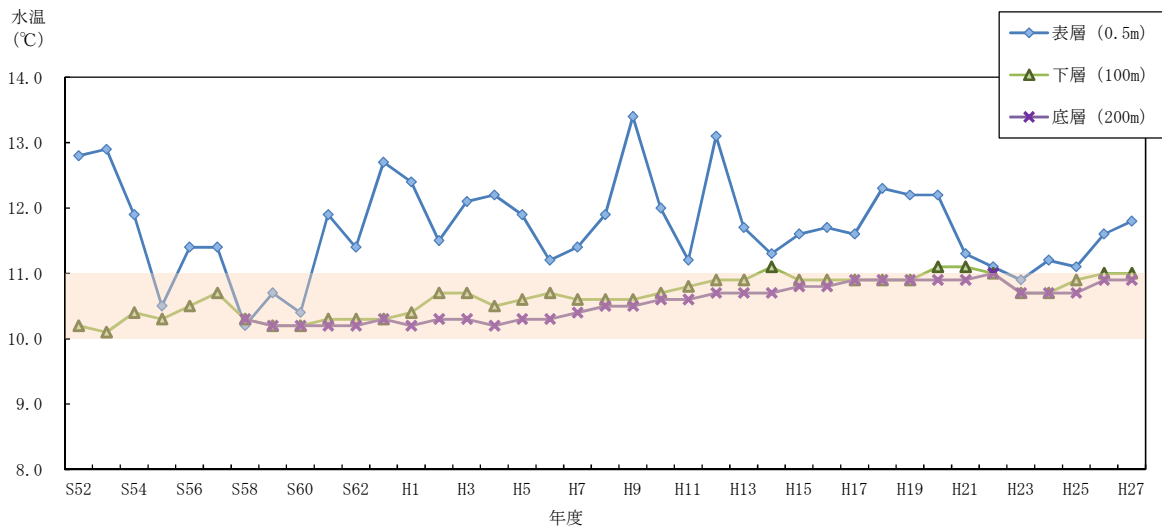


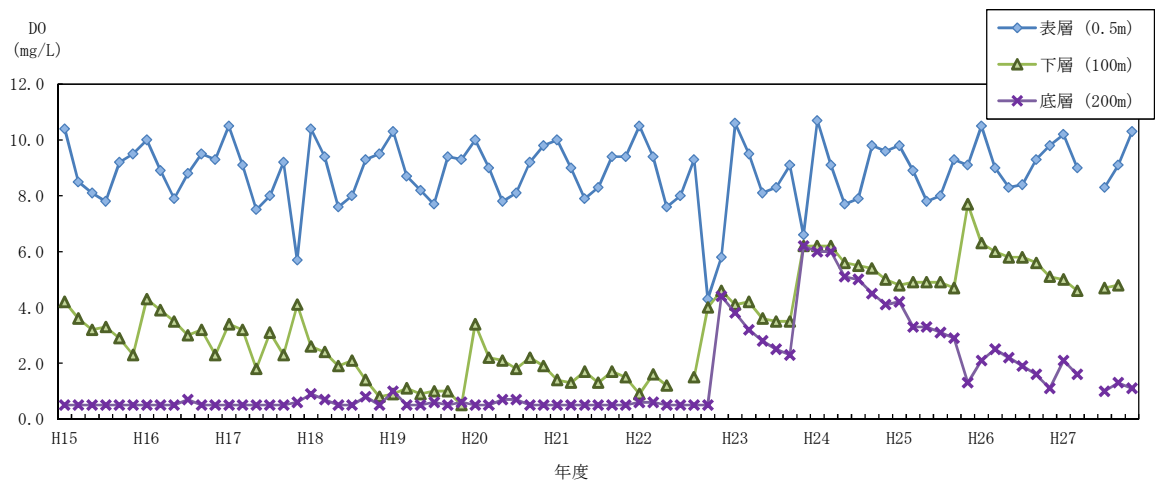
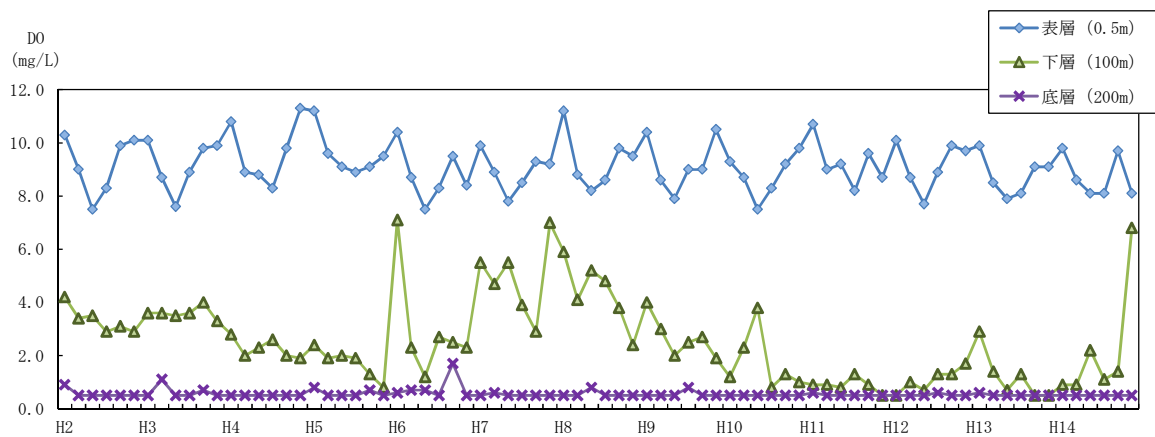
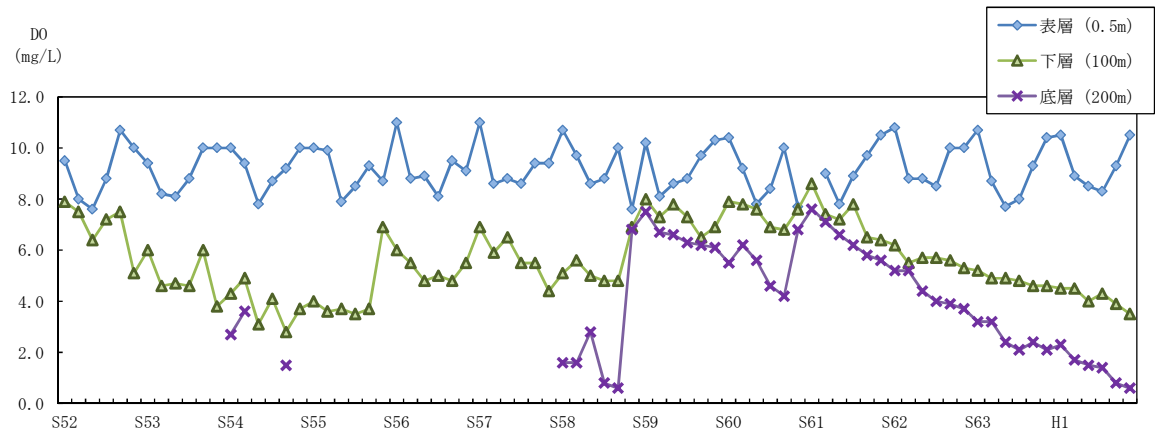
図 6 冬季（2月）における層別水温の推移

ウ 溶存酸素量

図 7 に示す溶存酸素量の推移をみると、表層（0.5m）では約 8～11mg/L の範囲で季節的な変化を繰り返しながら概ね横ばいで推移しているが、平成 17、22、23 年度 2 月には 4.3～6.6mg/L と低い値を示した。

下層（100m）及び底層（200m）では、昭和 61 年度 4 月をピークに低下傾向を示し、下層では平成 6 年度 4 月や平成 7、14 年度 2 月などにやや溶存酸素量の回復がみられたが、底層では平成 2 年度 6 月以降概ね 0.5mg/L 未満と極めて低いレベルで推移した。平成 22 年度 2 月には昭和 60 年度以来 25 年ぶりに底層の溶存酸素量が 4.4mg/L まで上昇し、平成 23 年度 2 月に再び 6.2mg/L まで上昇したが、以降は低下傾向が継続している。

溶存酸素量の調査結果から推察すると、全層循環が起こることは少なく、底層のデータが連続的に観測された昭和 58 年度以降では、昭和 58、60 年度及び平成 22、23 年度に発生したものと考えられ、表層の溶存酸素量の低下を考慮すると、平成 17 年度には底層まで達した鉛直循環が発生したものと推察される。



※平成 27 年 8 月は欠測である。

図 7 層別の溶存酸素量の推移

エ COD

(7) 水質環境保全目標の達成状況

CODの水質環境保全目標の評価方法は全層平均 75%値となっている。図 8 に示す全層平均 75%値の推移をみると、昭和 52 年度以降、顕著な濃度変化はみられず、1.3～2.2mg/L の範囲で推移しており水質環境保全目標（3 mg/L 以下）を達成している。

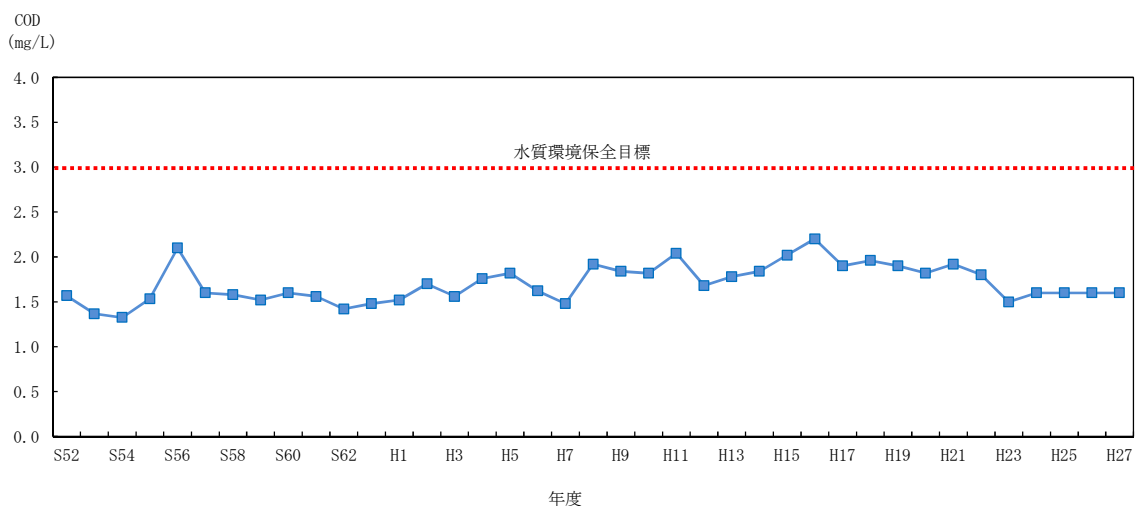


図 8 CODの全層平均 75%値の推移

(4) 層別濃度の推移

図 9 に示す各層 75%値は、表層（0.5m）は昭和 56 年度を除くと、概ね 2～3 mg/L の範囲を横ばいで推移している。また、下層（100m）は 1 mg/L 前後でほぼ横ばいで推移している。一方、底層（200m）は、平成 3 年度までは 1 mg/L 以下でほぼ横ばいで推移していたが、それ以降顕著な上昇傾向を示し、平成 11 年度から平成 18 年度は 2 mg/L 前後を横ばいで推移していた。平成 19 年度は 1.3 mg/L に低下し、その後横ばいで推移しているが、これは、平成 17 年度 2 月の底層まで達した鉛直循環の影響を受けたものと考えられる。

季節的な変化としては、図 10 に示すように表層では冬季に低く、春季～秋季にかけてプランクトンの増殖とともに上昇傾向にあるが、底層においては顕著な季節的な変化はみられない。

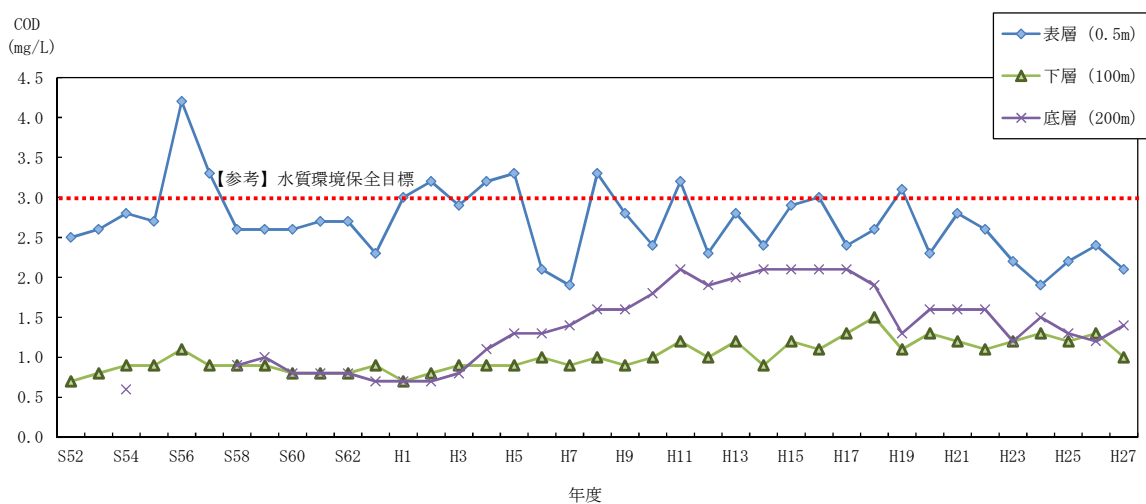
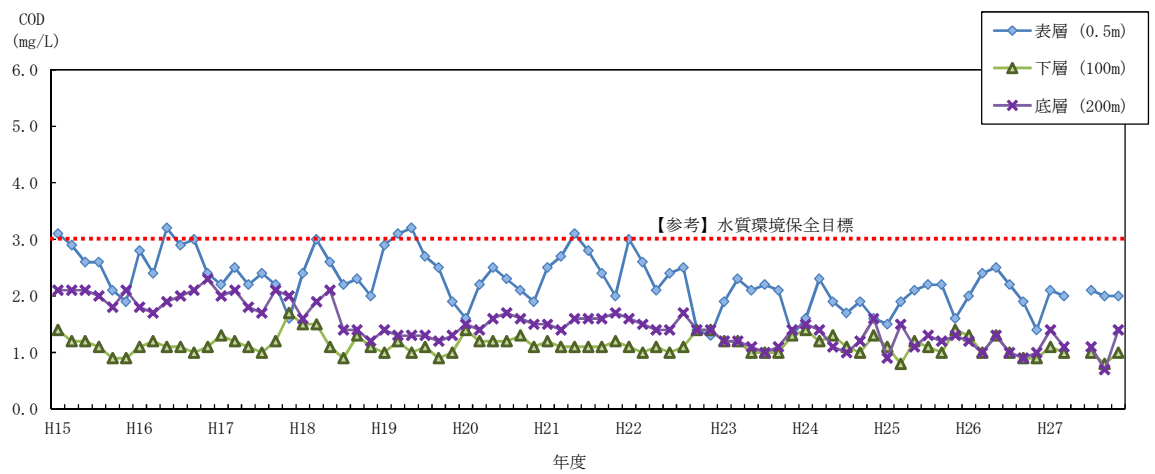
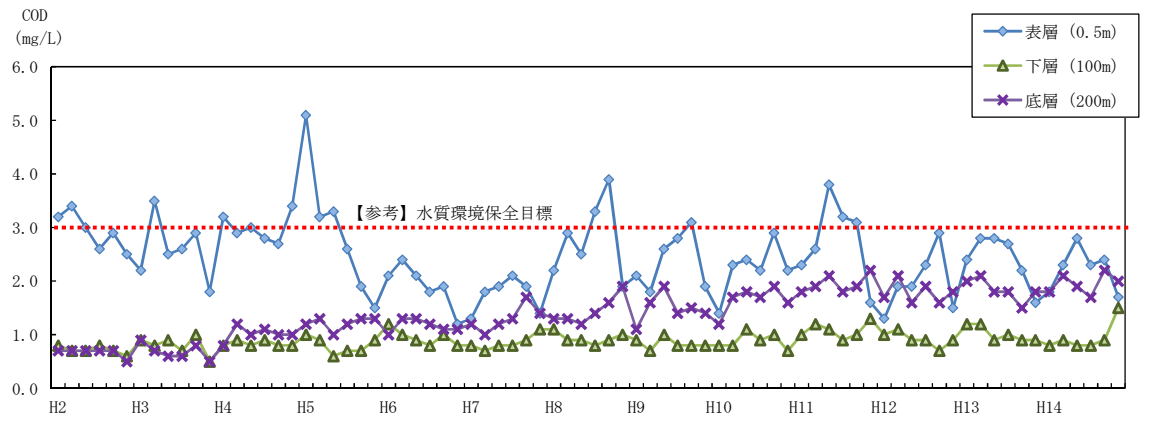
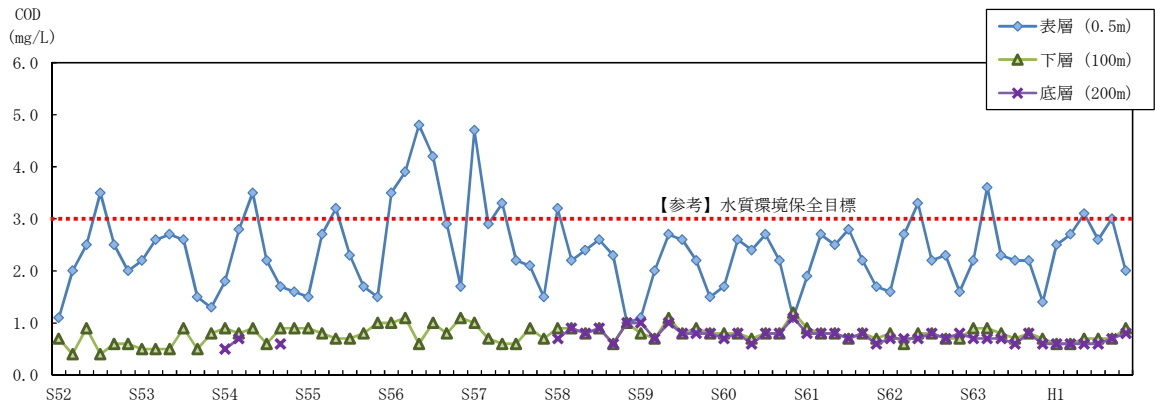


図 9 CODの各層 75%値の推移



※平成 27 年 8 月は欠測である。

図 10 層別のCODの推移

オ 全窒素

(7) 水質環境保全目標の達成状況

全窒素の水質環境保全目標の評価方法は表層年平均値となっている。図 11 に示す表層年平均値の推移をみると、昭和 52 年度以降では、平成 19 年度まで水質環境保全目標（0.2mg/L 以下）を達成しない年度が多かったが、平成 20 年度以降は濃度が低下し、平成 26 年度を除いて目標を達成している。

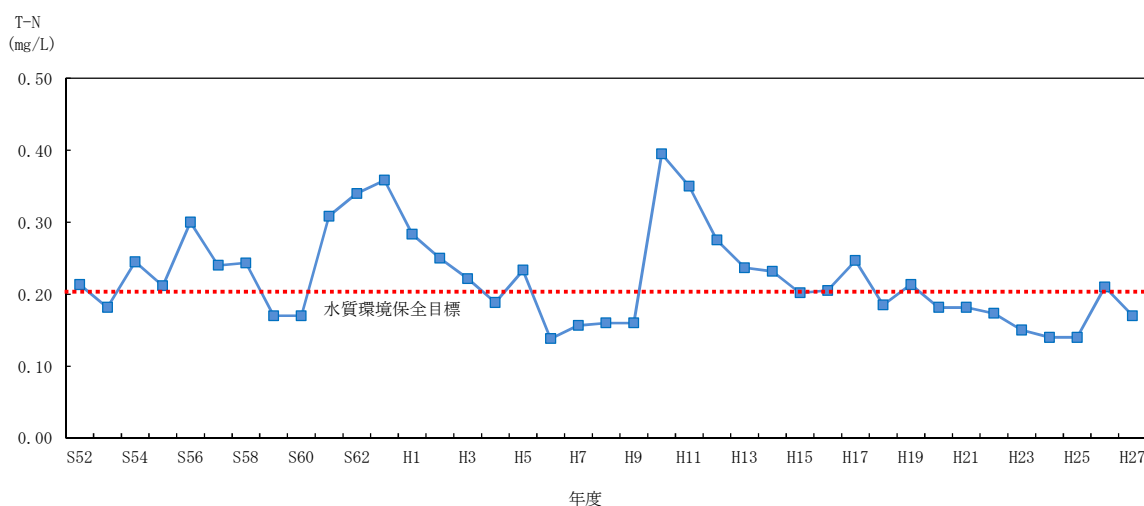


図 11 全窒素の年平均値の推移

(4) 層別濃度の推移

図 12 に示す全窒素の各層年平均値の推移をみると、表層（0.5m）は昭和 61 年度以降濃度が上昇し、平成 3 年度まで 0.20mg/L を超過した。平成 6～9 年度は 0.20mg/L を下回ったが、平成 10 年度に 0.40mg/L と急激に濃度が上昇し、平成 20 年度まで濃度が低下しながら 0.20mg/L を超過する時期が多くみられた。平成 20 年度以降も濃度の低下傾向は継続し、平成 26 年度に 0.21mg/L と上昇したが、概ね 0.20mg/L を下回っている。下層（100m）は平成 9 年度までは時間差がみられるが表層とほぼ同様の変動傾向を示している。底層（200m）は、平成 3 年度までは表層とほぼ同様の変動傾向を示していたが、それ以降急激な上昇傾向を示し、平成 15 年度は 0.54mg/L まで上昇した。その後、平成 18 年度に急激に減少し、平成 19 年度には 0.20mg/L まで減少している。これは、平成 17 年度 2 月の底層まで達した鉛直循環の影響を受けたものであると考えられる。平成 19 年度以降は微増傾向にあり、平成 27 年度は 0.32mg/L まで上昇している。

底層の全窒素濃度の上昇要因は、平成 3～22 年度については底層の無酸素状態の継続に伴い硝酸態窒素は減少するものの、底泥からのアンモニア態窒素の溶出量が多いことによるものである。また、平成 2 年度以前及び平成 23 年度以降については硝酸態窒素が蓄積してきたことによるものである（図 13）。

なお、層別の全窒素の濃度推移は図 14 に示すとおりである。

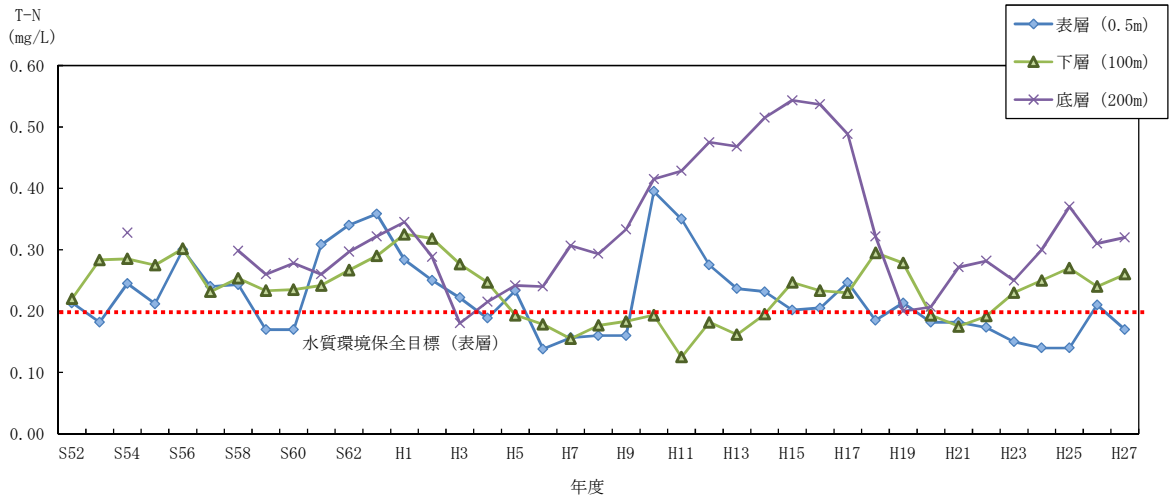


図 12 全窒素の各層年平均値の推移

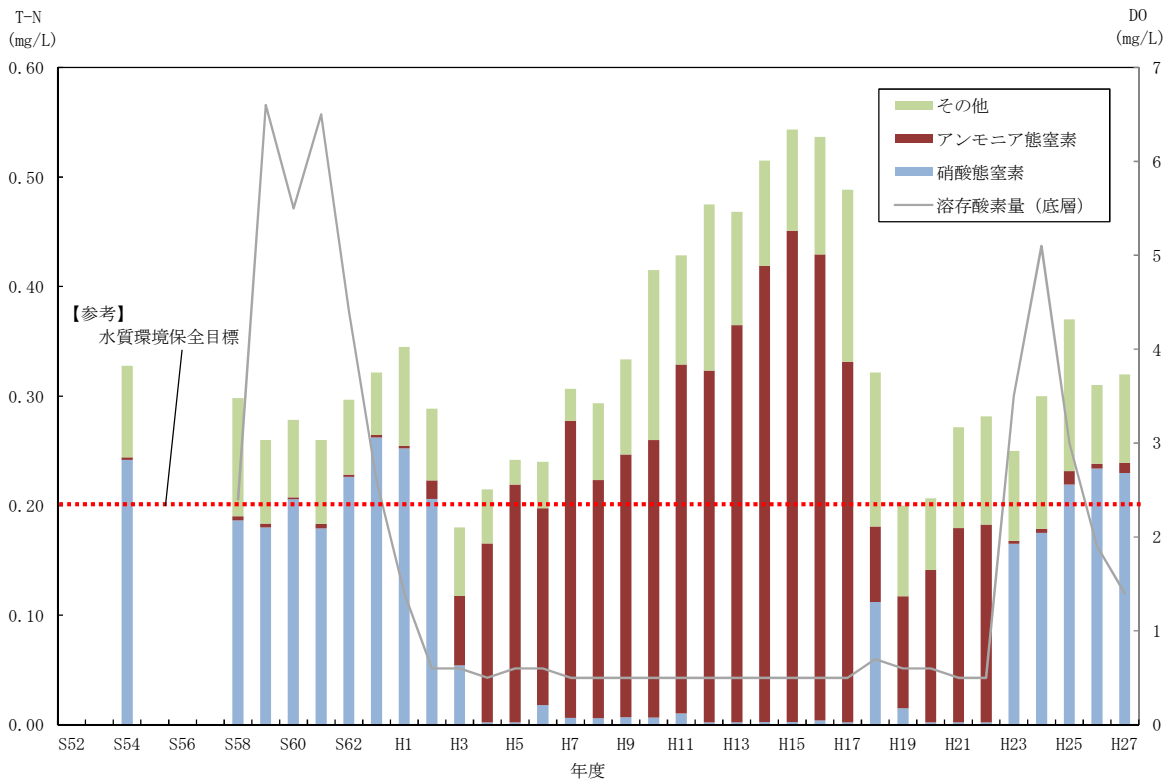
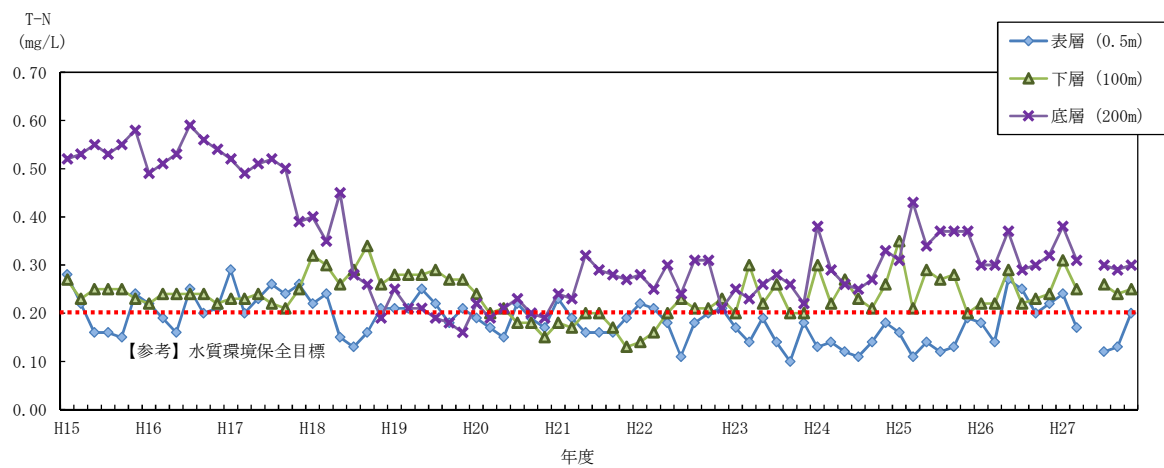
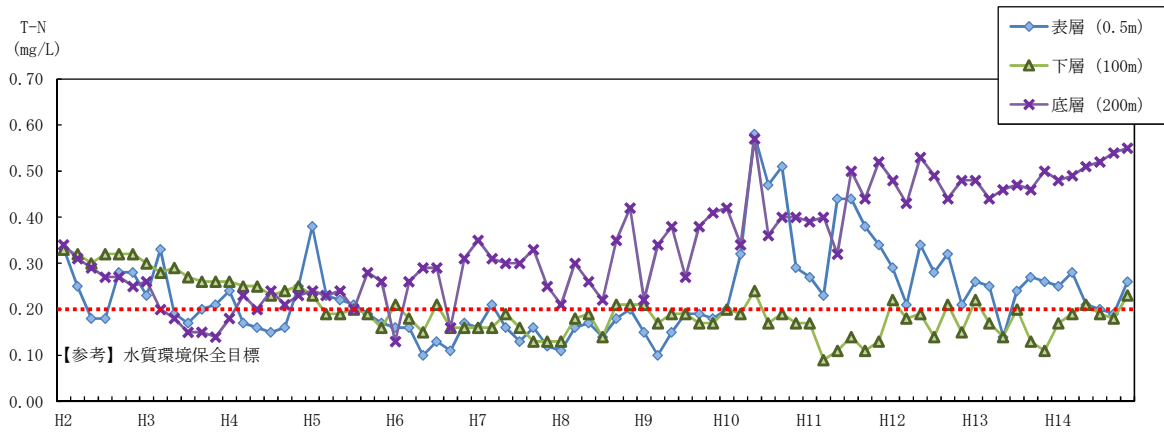
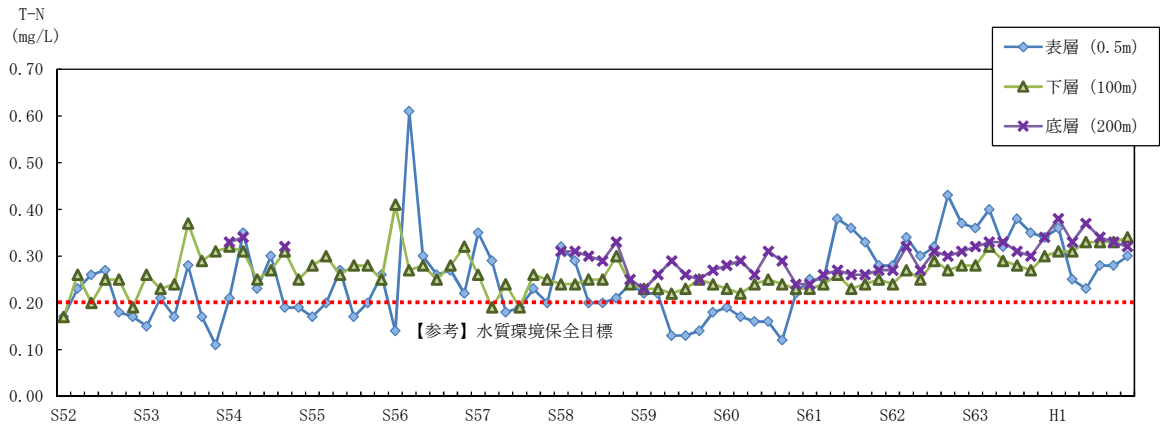


図 13 底層における全窒素中各態窒素の構成割合の推移



※平成 27 年 8 月は欠測である。

図 14 層別の全窒素の推移

カ 全りん

(7) 水質環境保全目標の達成状況

全りんの水質環境保全目標の評価方法は表層年平均値となっている。図 15 に示す表層年平均値は、昭和 50 年度代に水質環境保全目標（0.01mg/L 以下）を超過する時期がみられ、昭和 61 年度から平成 5 年度まで上昇傾向にあったが、平成 6 年度以降、顕著な濃度変化はみられず、0.003~0.007mg/L の範囲で推移しており目標を達成している。

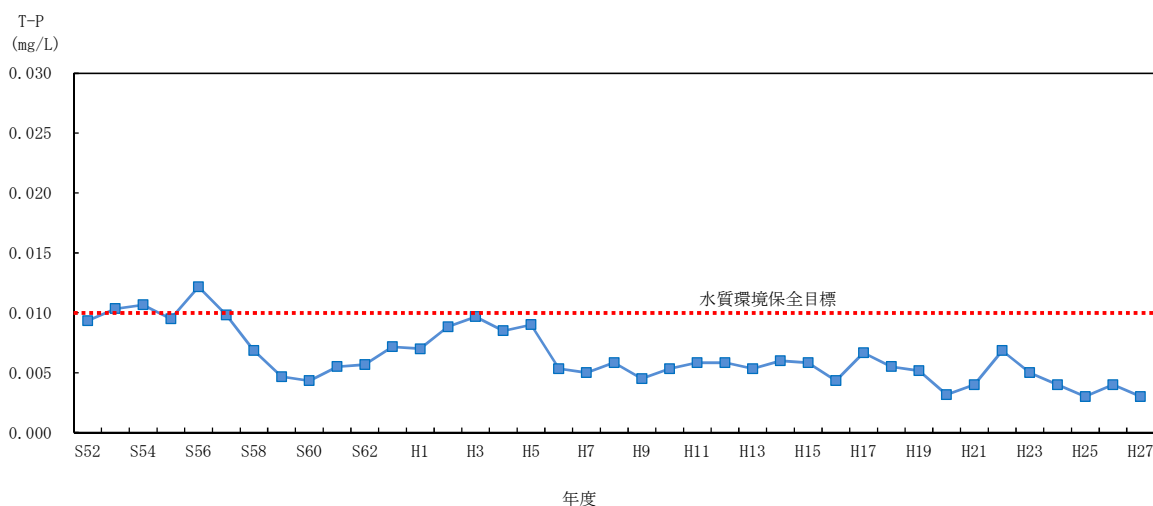


図 15 全りんの年平均値の推移

(4) 層別濃度の推移

図 16 に示す全りんの各層年平均値の推移をみると、表層（0.5m）は昭和 53~57 年度に 0.010mg/L 以上を示したが、それ以降は 0.010mg/L 以下で推移している。下層（100m）は概ね 0.005mg/L 以下を横ばいで推移している。底層（200m）は、平成 3 年度まではほぼ一定の低い値で推移していたが、平成 3 年度以降急激な増加傾向を示し、平成 16 年度は 0.070mg/L を超える高濃度となった。しかし、平成 17 年度 2 月の底層まで達した鉛直循環の影響を受けて、平成 18 年度は 0.006mg/L と急激に減少し、その後、平成 3 年度以降と同様な上昇傾向を示していたが、平成 22 年度 2 月の全層循環により、平成 23 年度以降は低下した状態が継続している。

平成 3~22 年度の底層の全りん濃度の上昇要因は、無酸素状態の継続に伴いりん酸態りんが底泥から溶出してきたことによるものである（図 17）。

なお、層別の全りんの濃度推移は図 18 に示すとおりである。

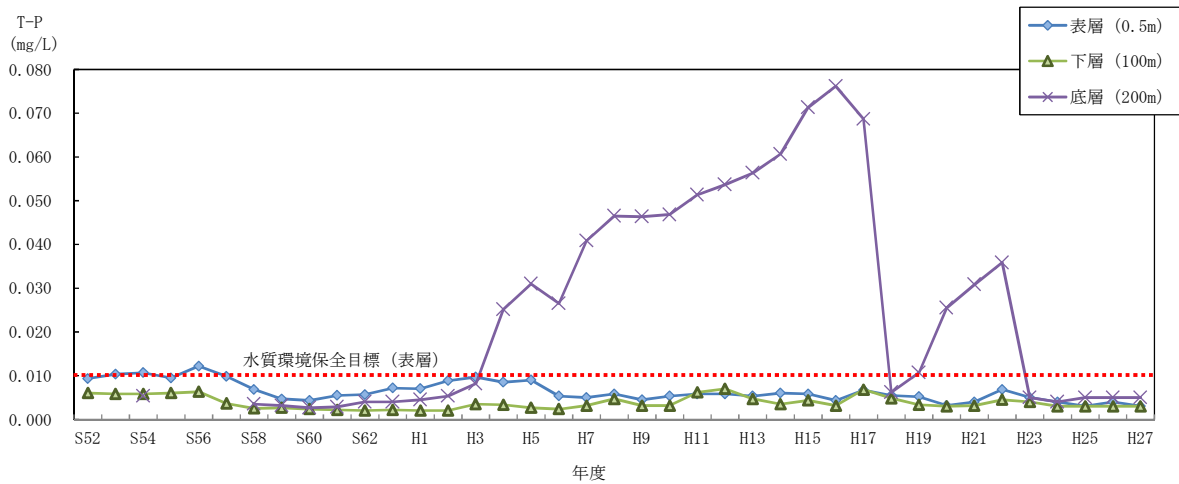


図 16 全りんの各層年平均値の推移

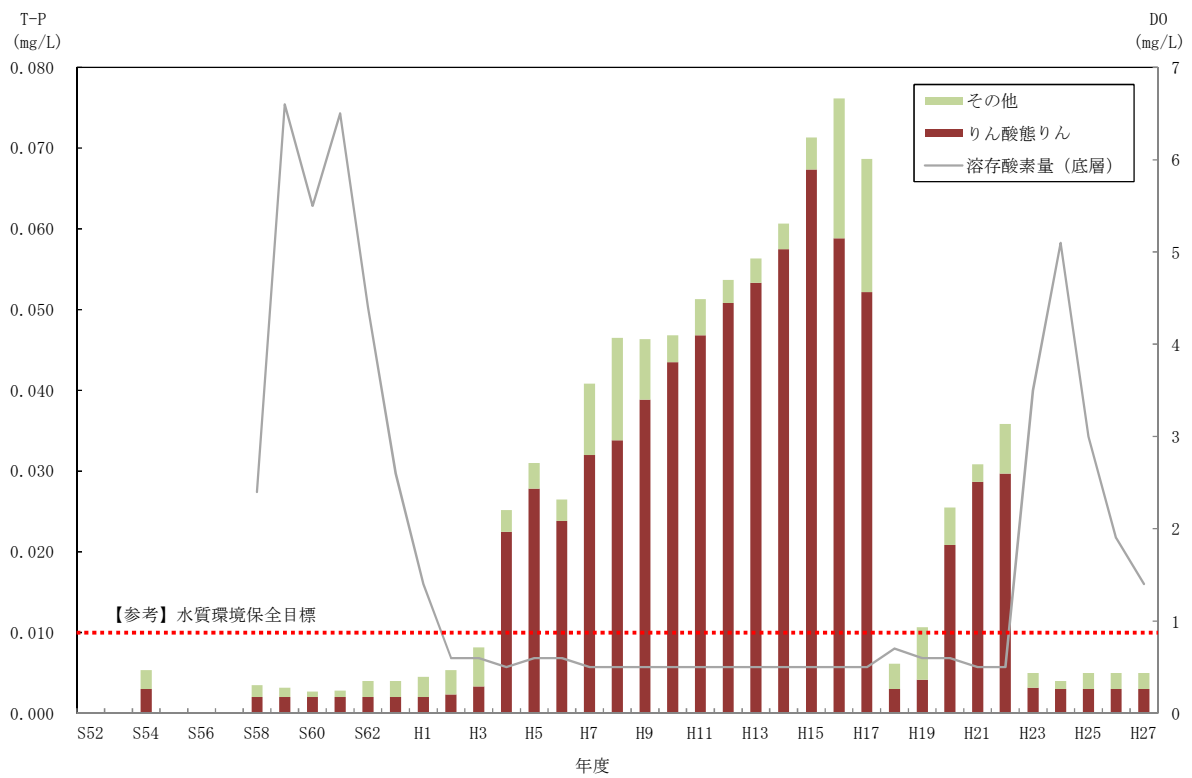
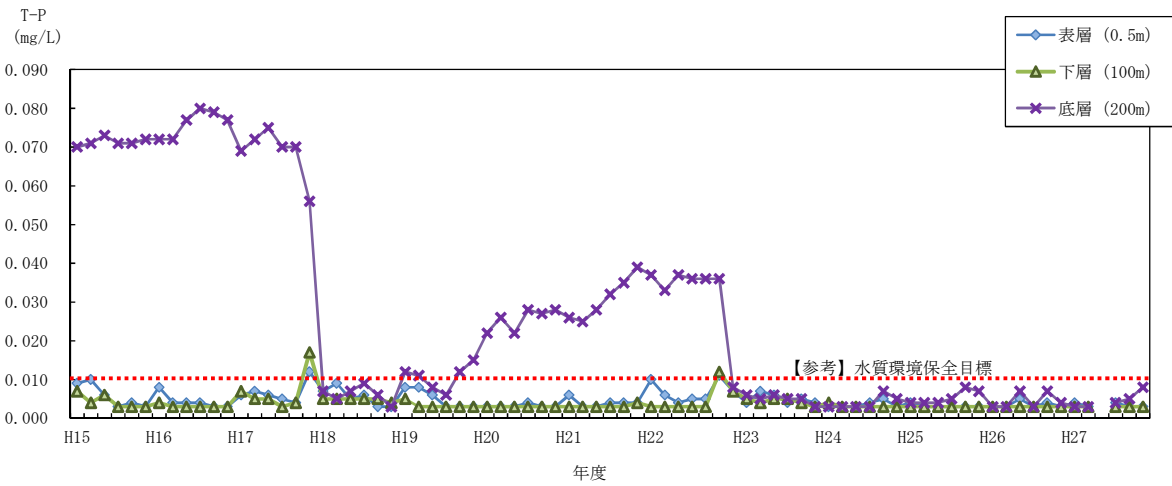
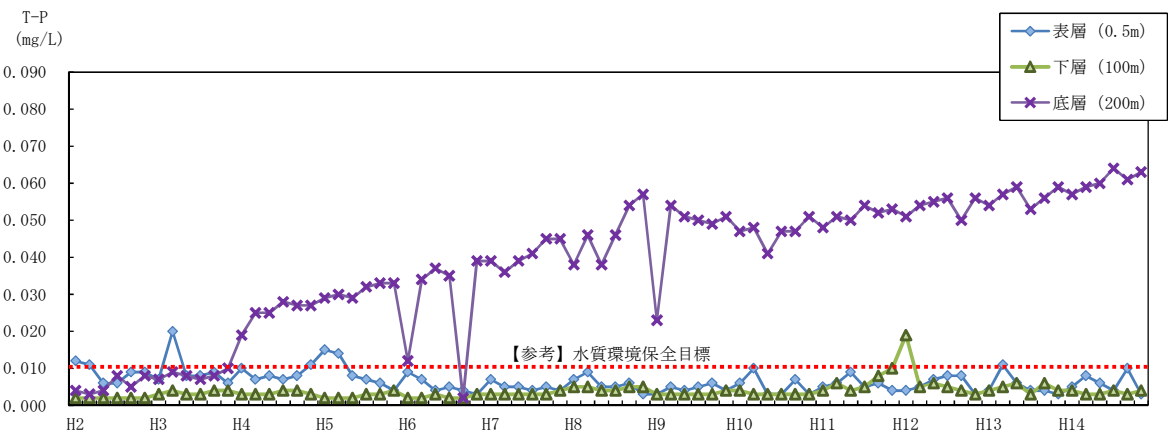
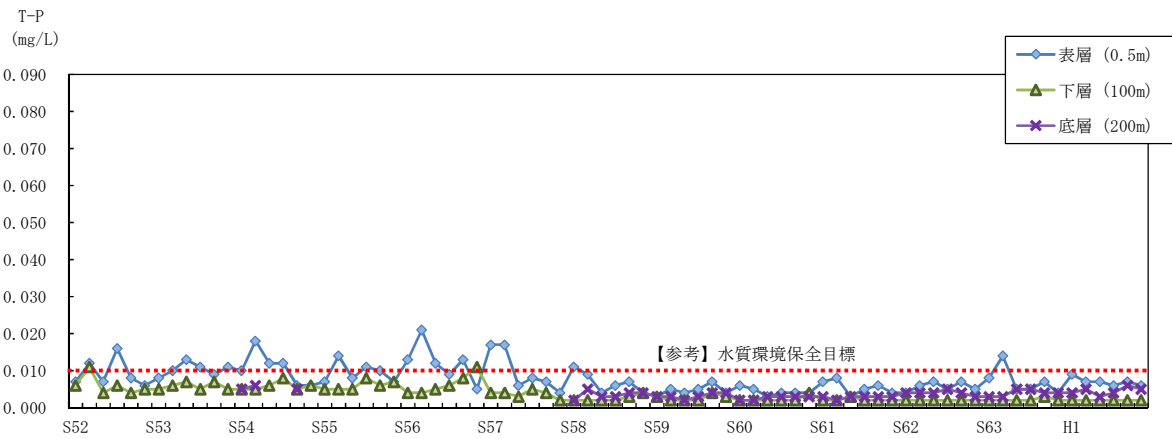


図 17 底層における全りん中りん酸態りんの構成割合の推移



※平成 27 年 8 月は欠測である。

図 18 層別の全りんの濃度推移

(3) 導水 3 河川の水質等の状況

ア 水収支量の経年変化

(7) 導水量

図 19 に示すように南九州市穎娃地域の馬渡川、高取川及び集川から池田湖への導水は昭和 57 年 7 月から開始され、平成 27 年度までに累計で 26,077 万 m³ が導水されている。導水量が最も多かったのは平成 10 年度の 2,500 万 m³ で、池田湖容積（14 億 7,000 万 m³）の 1.7% に相当する水量である。次いで昭和 62 年度の 2,352 万 m³、平成 11 年度の 2,089 万 m³ であり、この他の年度でも昭和 61 年度及び平成 8、9、13、16、17、20、26 年度は 800 万 m³/年以上の導水量となっている。

図 20 に示す河川別の導水量をみると、馬渡川及び高取川からの導水が主体となっており、集川から行われたのは昭和 61～62 年度及び平成 8～10 年度、16～19、21 年度であった。

(4) 送水量

図 19 に示すように畑かんへの池田湖からの送水は昭和 57 年度 8 月から開始されている。送水量が最も多かったのは平成 6 年度の 1,219 万 m³ で、次いで平成 25 年度の 876 万 m³、平成 19 年度の 804 万 m³ である。

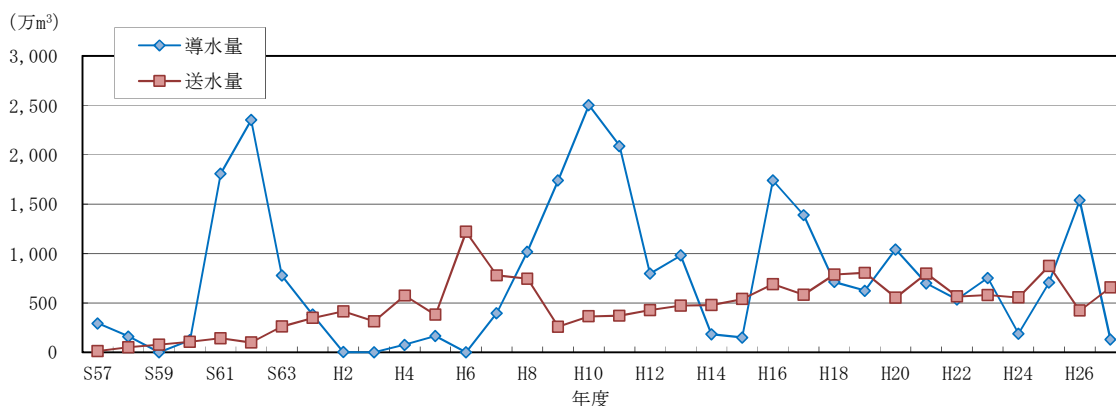


図 19 池田湖における導水量及び送水量の推移

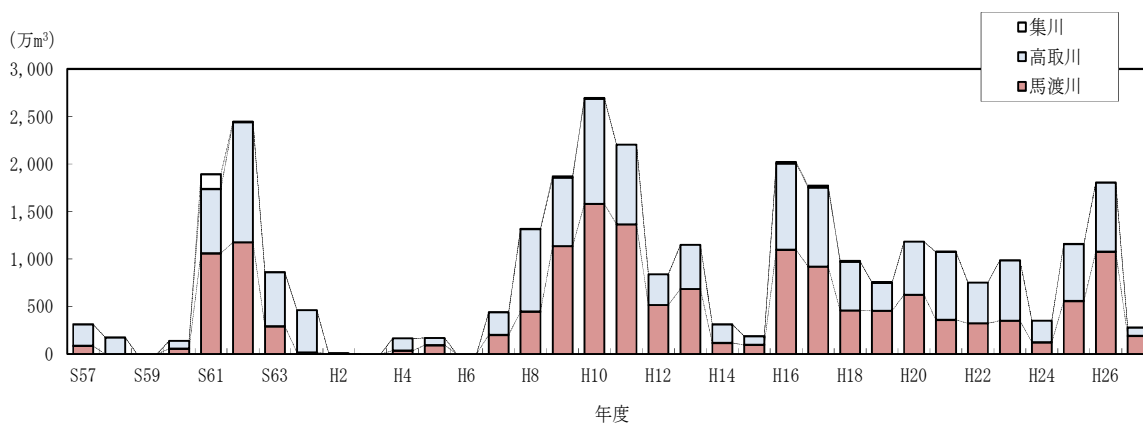


図 20 3 河川からの導水量の推移

イ 水質等の経年変化

(7) COD

図 21 に示す昭和 59 年度以降の年平均値は、馬渡川では平成 10 年度まで 1 mg/L 弱であったが、その後やや上昇傾向を示し、平成 14 年度以降は横ばいで推移し、平成 27 年度は 1.4mg/L となっている。高取川では昭和 59 年度以降 1 mg/L 前後のレベルでほぼ横ばいで推移し、平成 27 年度は 0.8mg/L となっている。集川は平成 2 年度までは 1 mg/L 程度であったが、その後やや上昇傾向を示し、平成 12 年度は 2.6mg/L、平成 16 年度は 2.3mg/L と高い値を示し、平成 27 年度は 1.5mg/L となっている。

なお、池田湖における水質環境保全目標（3 mg/L）と比較すると近年は 3～6 割程度の濃度となっている。

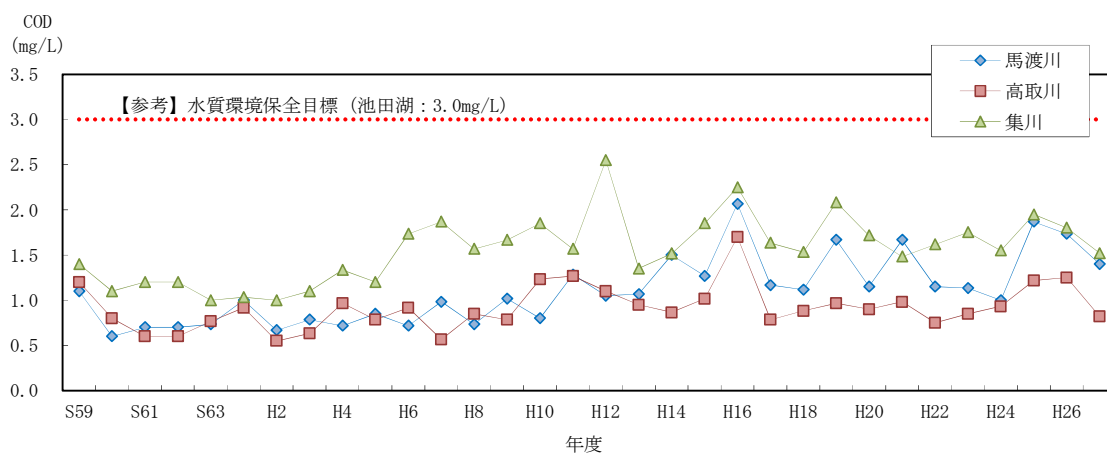


図 21 CODの年平均値の推移

(4) 全窒素

図 22 に示す昭和 59 年度以降の年平均値は、馬渡川及び高取川では、昭和 59 年度～平成 2 年度は上昇傾向を、平成 2 年度以降はやや下降傾向を示し、平成 27 年度はそれぞれ 2.6mg/L、4.3mg/L となっている。集川も馬渡川や高取川と同様に、昭和 59 年度～平成 2 年度は上昇傾向を、平成 2 年度以降はやや下降傾向を示したが、平成 9、10 年度と再び上昇し、平成 10 年度は 16.5mg/L と高い値を示した。その後は下降傾向にあり、平成 27 年度は 9.0mg/L となっている。

なお、近年下降傾向にはあるものの、池田湖における水質環境保全目標（0.2mg/L）と比較すると 13～45 倍の濃度となっている。

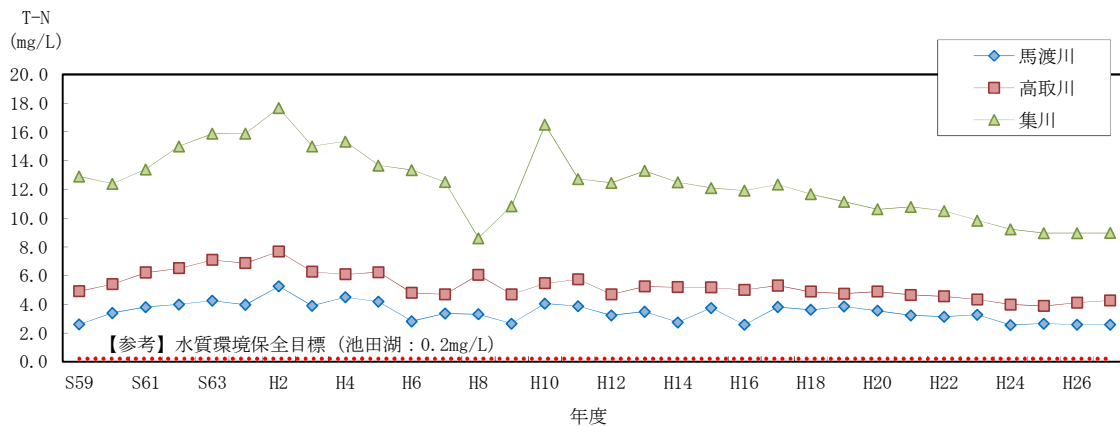


図 22 全窒素の年平均値の推移

(ウ) 全りん

図 23 に示す昭和 59 年度以降の年平均値は、馬渡川や高取川では、昭和 59 年度～平成 19 年度はほぼ横ばいで推移し、平成 19 年度以降はやや上昇傾向を示し、平成 27 年度はそれぞれ 0.034mg/L, 0.027mg/L となっている。集川では平成 2 年度以前は 0.03mg/L 前後であったが、平成 2～12 年度は上昇傾向を示し、平成 12 年度以降は横ばいで推移し、平成 27 年度は 0.058mg/L となっている。

なお、池田湖における水質環境保全目標 (0.01mg/L) と比較すると近年は 3～6 倍の濃度となっている。

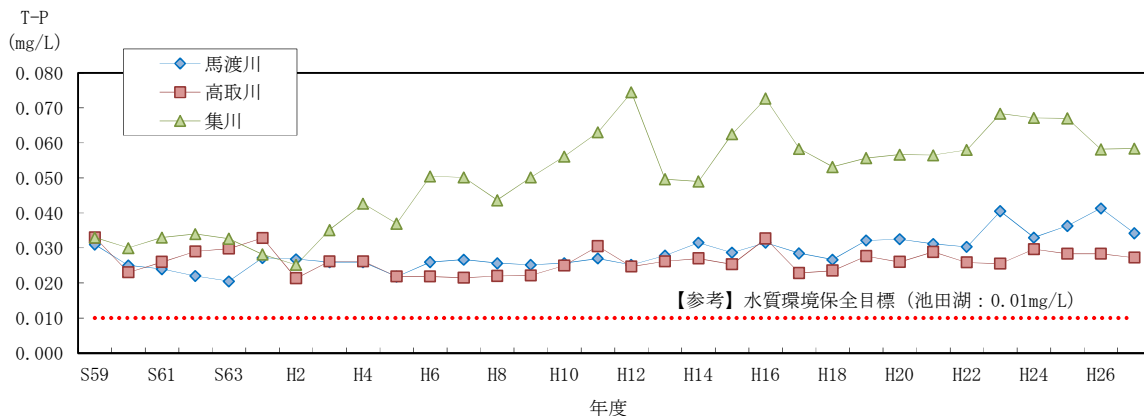


図 23 全りんの年平均値の推移

(4) 流向・流速

ア 測定方法

(7) 測定地点及び測定層

測定地点は湖心(図 4, p. 7)とし, 水面下 7.15m から 4 m 間隔の計 57 層(7.15~231.15 m) で測定を実施した。

(4) 測定期間

測定期間は, 平成 28 年 3 月 4 日~平成 28 年 3 月 7 日の 4 日間である。

(4) 測定項目

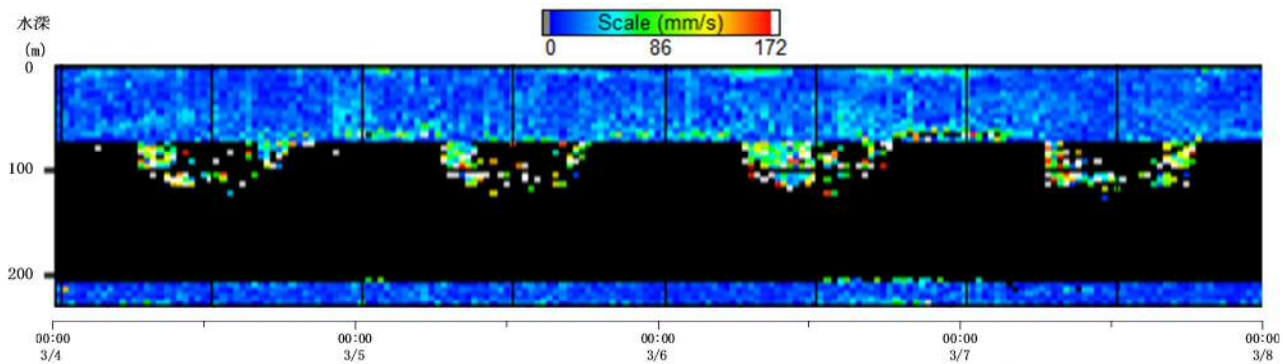
測定項目として流向・流速(3 軸方向)を設定し, 20 分間隔で測定した。

イ 測定結果

流速全測定結果を図 24 に, 各層の流況ベクトル図を図 25 に, 測定期間中の指宿地域気象観測所の風向・風速を図 26 に示す。

本測定には, 超音波ドップラー流速分布計(以下, 「流速分布計」)を観測機器として使用したが, この流速分布計は水中に向けて超音波ビームを発射し, 水中のプランクトンや浮遊砂などの散乱体に当たって反射させることで, 流向・流速データを得ている。このプランクトンや浮遊砂が水中に少ないと反射強度が弱くなり, 正しい測定データが得られない。今回の測定では, 71.15~207.15m 層では反射強度が弱かったため, 本報告では反射強度の強かった, 7.15m 層及び 223.15m 層について解析を行う。ちなみに, 図 24 に示す流速全測定結果をみると, 70.15~100.15m 層で 24 時間周期の流速の変動がみられるが, 変動がみられる層は上記した反射強度が弱かった層であるため, 明確な理由は分からない。

各層ごとにみると, 7.15m 層の流向は, 北西が最も多く, 流速の平均値は 28mm/秒, 最大値は 90mm/秒であった。223.15m 層の流向は, 北及び北北東が最も多く, 流速の平均値は 14mm/秒, 最大値は 38mm/秒であった。



備考 反射強度の弱かった測定結果も記載してある。

図 24 流速全測定結果

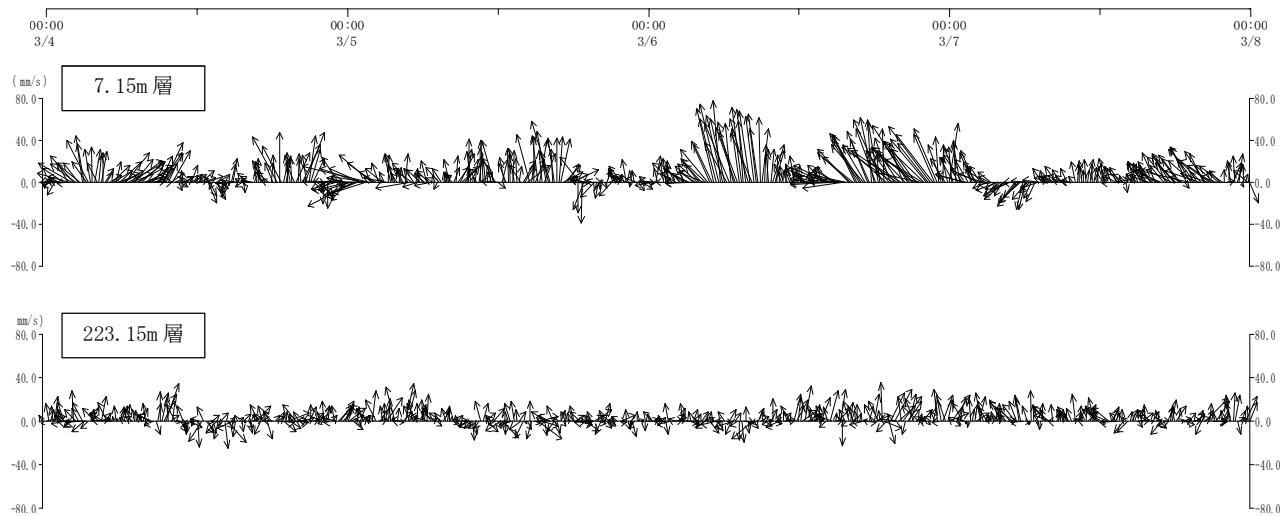
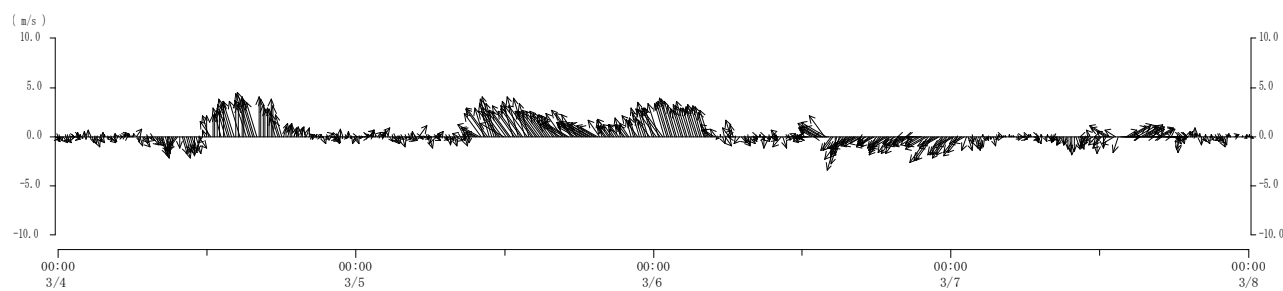


図 25 流況ベクトル図



備考 ベクトルの向きは、風の吹き去る方向を示す。

図 26 測定期間中の指宿地域気象観測所の風向・風速図

4 湖水の鉛直循環時の水質変化

(1) 水温，溶存酸素量の鉛直連続測定

ア 測定方法

(7) 測定地点及び測定層

測定地点は湖心（図 4，p. 7）とし，測定層は表 6 に示すとおりである。

表 6 水温，溶存酸素量の鉛直連続測定層

測定年度	測定層 (m)											
	0.5	5	10	20	40	80	100	120	140	160	180	200
平成 22～23 年度	○	○	○	○	○	◎			◎	○		◎
平成 25 年度	○		○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
平成 26 年度	○		○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
平成 27 年度	○					◎		○	◎	○		◎

備考 測定層の“○”は水温のみ，“◎”は水温＋溶存酸素量を測定したことを示す。

(4) 測定期間

測定は，平成 22～23 年度，平成 25，26，27 年度の計 4 回実施し，各測定期間は表 7 に示すとおりである。

平成 26 年度の測定結果は，平成 25 年度と同様であったことから掲載しない。また，平成 27 年度の測定結果は，測定期間中に測定項目の明確な変動が確認されなかったことから掲載しない。

表 7 水温，溶存酸素量の鉛直連続測定期間

測定年度	測定期間
平成 22～23 年度	平成 22 年 9 月 1 日～平成 23 年 8 月 26 日 (約 1 年間)
平成 25 年度	平成 25 年 11 月 28 日～平成 26 年 4 月 9 日 (約 4 ヶ月半)
平成 26 年度	平成 26 年 12 月 4 日～平成 27 年 4 月 15 日 (約 4 ヶ月半)
平成 27 年度	平成 28 年 1 月 27 日～平成 28 年 3 月 7 日 (約 1 ヶ月半)

(5) 測定項目

測定項目として水温，溶存酸素量を設定し，1 時間間隔で測定した。

イ 測定結果

(7) 鉛直水温

a 平成 22, 23 年度

平成 22, 23 年度の鉛直水温測定結果のうち, 平成 22 年 11 月 1 日～平成 23 年 4 月 30 日の期間を抜粋したものを図 27 に示す。

11 月下旬に, 20m 層で大幅な水温変動 (上昇) が確認され, 半月程度の時間を経て, 10m 以浅層とほぼ同水温に, 40m 層では 1 月上旬に 1 週間程度で 20m 以浅層とほぼ同水温となった。

80m 層では 1 月 17 日, 140m 層では 1 月 31 日頃から水温変動が確認され, 2 月 4 日には 80m 層から 200m 層まで 40m 以浅層とほぼ同水温となった。

b 平成 25 年度

平成 25 年度の鉛直水温測定結果を図 28 に示す。

平成 26 年 1 月 14 日頃に 40m 層, 平成 26 年 2 月 8 日頃に 80m 層で大幅な水温変動 (低下) が確認され, 20m 以浅層とほぼ同水温となった。100m 層では 80m 層とほぼ同水温になることがあったが一時的であった。また, 120m 層以深層は測定期間中ほぼ同水温で推移していた。

c 平成 27 年度

測定期間を通して, 80m 層の水温は 11.1～11.2℃で, 120m, 140m, 160m 層は 11.1℃で, 200m 層は 10.9～11.0℃でほぼ一定水温を保っていた。

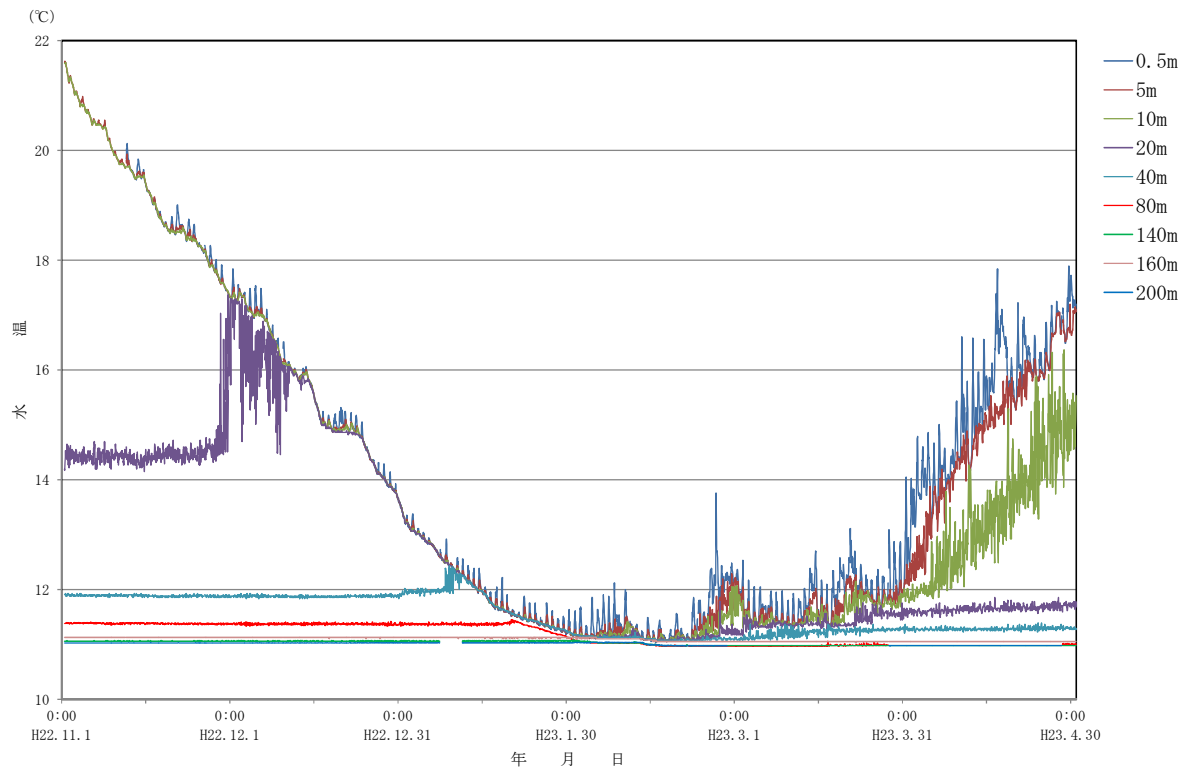


図 27 平成 22 年度鉛直水温測定結果 (平成 22 年 11 月 1 日～平成 23 年 4 月 30 日抜粋)

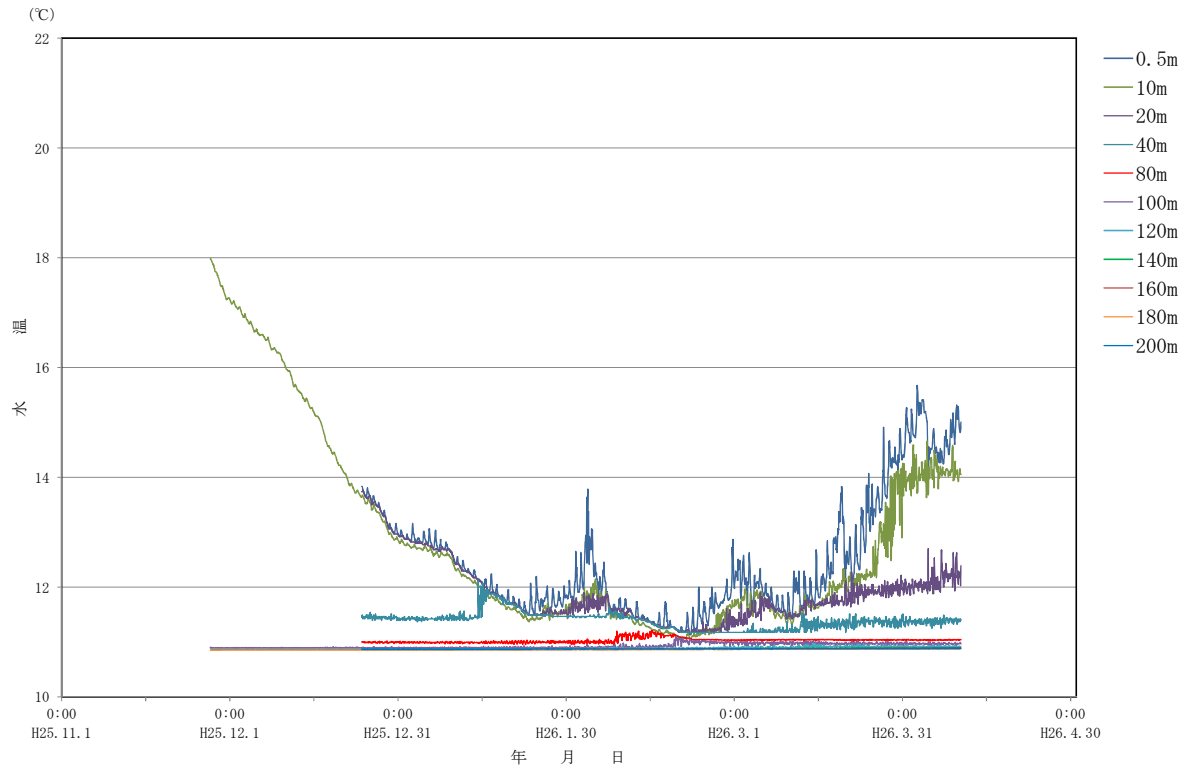


図 28 平成 25 年度鉛直水温測定結果 (平成 25 年 11 月 28 日～平成 26 年 4 月 9 日)

(4) 鉛直溶存酸素量

a 平成 22, 23 年度

平成 22, 23 年度の鉛直溶存酸素量測定結果のうち、平成 22 年 11 月 1 日～平成 23 年 4 月 30 日の期間を抜粋したものを図 29 に示す。

10 月以降、80m 層は 2～3mg/L、140m 層は 0.7～0.8mg/L、200m 層は 0mg/L とほぼ横ばいで推移していたが、1 月 17 日に 80m 層で、1 月 31 日に 140m 層で、2 月 4 日に 200m 層で溶存酸素量の大幅な変動（上昇）が確認され、2 月 12～13 日以降、80m 層は 3.5～4.0mg/L、140m 層は 3.0～3.5mg/L、200m 層は 4.0～4.5mg/L の範囲で推移した。

このことから、平成 23 年 2 月上旬に、全層循環が発生したと考えられる。

b 平成 25 年度

平成 25 年度の鉛直溶存酸素量測定結果を図 30 に示す。

約 5mg/L で推移していた 80m 層において平成 26 年 2 月 8 日頃に、約 4mg/L で推移していた 100m 層において平成 26 年 2 月 18 日頃に大幅な変動（上昇）が確認され、120m 以深の層に明瞭な変動は確認されなかった。

このことから、平成 25 年度は 100m 層まで鉛直循環が発生したと考えられる。

c 平成 27 年度

測定期間を通して、80m 層は 5.3～6.1mg/L で、140m 層は 1.5～3.0mg/L で、200m 層は 0.5 mg/L 未満～0.5mg/L とほぼ横ばいで推移していた。

平成 22 年度に全層、平成 25 年度に 100m 層まで確認された鉛直循環は、平成 27 年度には確認されなかった。

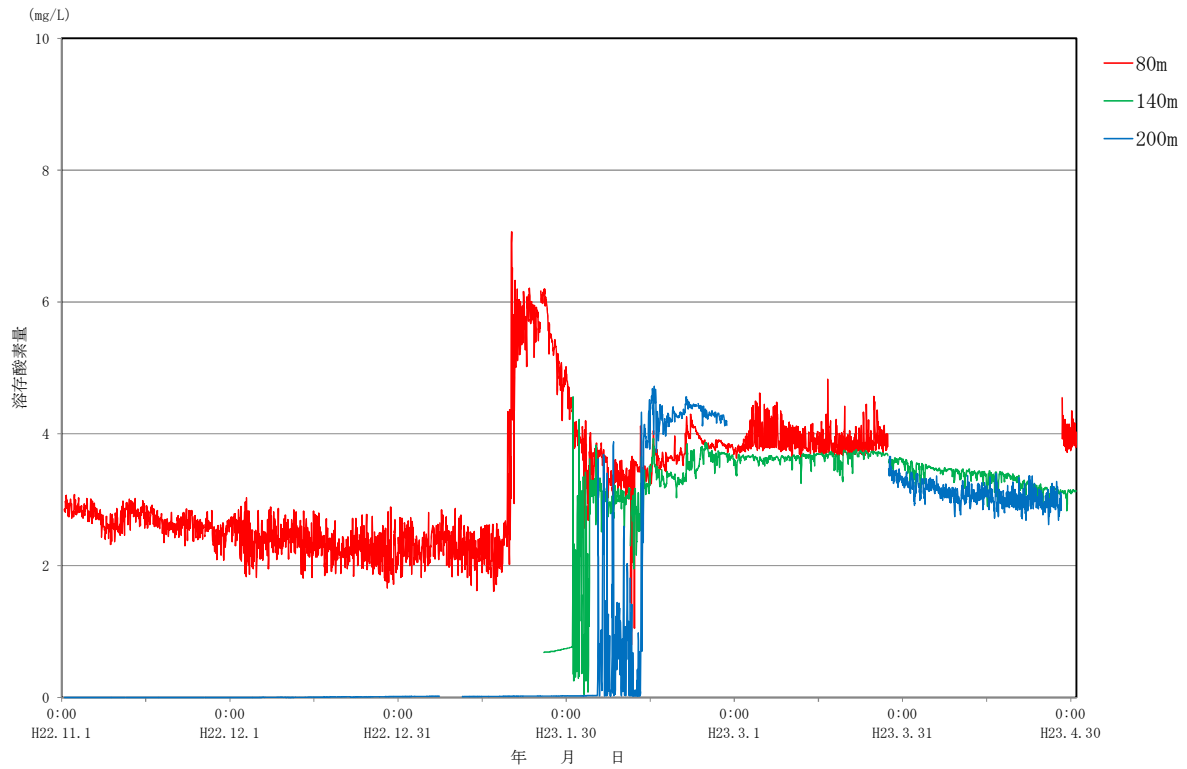


図 29 平成 22 年度鉛直溶存酸素量測定結果(平成 22 年 11 月 1 日～平成 23 年 4 月 30 日抜粋)

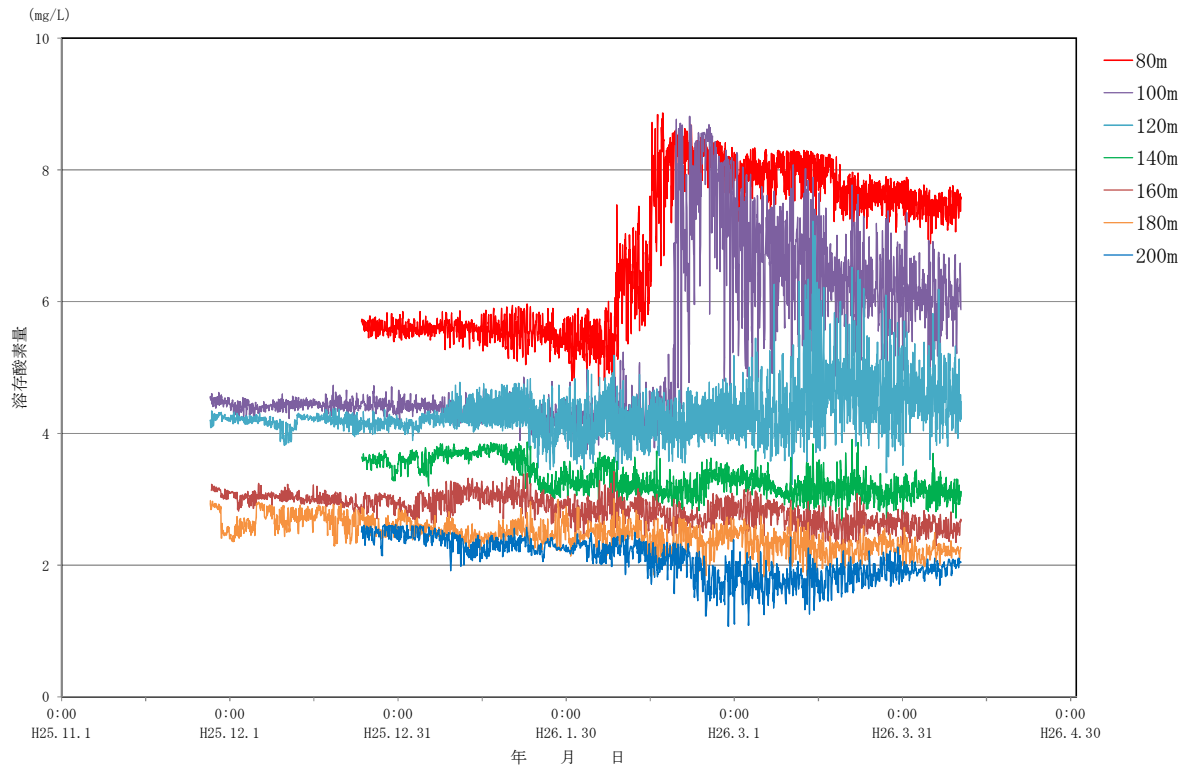


図 30 平成 25 年度鉛直溶存酸素量測定結果(平成 25 年 11 月 28 日～平成 26 年 4 月 9 日)

(2) 全層循環における水質変化

平成 23 年 2 月、池田湖において全層循環が発生した。全層循環前と全層循環後の水質変化について、溶存酸素量及び全窒素や全りんといった栄養塩類の挙動に着目し調査した。

ア 調査方法

(7) 調査地点及び採水層

調査地点は、池田湖の湖心において水深 0.5m, 15m, 30m, 100m, 110m, 120m, 150m及び200mの計8層で実施した。

(4) 調査期間

調査は、平成 22 年 4 月から平成 23 年 2 月の偶数月に実施した。また、平成 23 年 2 月 2 日の調査で湖水の鉛直循環の兆候が見られたため、平成 23 年 2 月 22 日に追加の調査を行った。

(7) 調査項目

調査項目として、水温、溶存酸素量、全窒素、全りんを設定した。

イ 調査結果

(7) 水温

図 31 に平成 22 年 4 月、6 月、8 月、10 月、12 月、平成 23 年 2 月 2 日、2 月 22 日の水温の鉛直分布をそれぞれ示す。年間を通し以下の変化をたどっていた。

① 4 月に表水層と深水層との間（水深 10～30m）に水温が急激に変化する水平層（水温躍層）が形成される。

② この層は 8 月に最も顕著に形成され、2 月に向けて徐々に水温差が小さくなる。

また、水深 100m 以深の水温は年間を通じて 10.9～11.0℃と一定であり、大きな変化は見られなかった。平成 23 年 2 月 22 日においては、全層循環が発生し各層の水温が均一化されたことで、表水層と深水層との水温差は 0.2℃と小さかった。

(4) 溶存酸素量

図 32 に層が顕著に形成される 8 月、完全に崩壊する前の状況であった 12 月、消失した 2 月（2 月 2 日及び 2 月 22 日）の溶存酸素量の鉛直分布を示す。

全層循環前の平成 22 年 8 月及び 12 月の結果を見ると、水深の浅い部分の溶存酸素量は異なるものの、ともに水深 100m から 110m を境に溶存酸素量の値が低くなり、水深 110m 以深で無酸素状態になっていることが分かる。

次に、全層循環の途中に相当すると考えられる平成 23 年 2 月 2 日の結果を見ると、表層から水深 110m 層までほぼ同じ値の溶存酸素量になり、120m 層及び 150m 層でも溶存酸素量が 12 月に比べ上昇していることが分かる。さらに、2 月 22 日の結果を見ると、表層から水深 200m 層までほぼ同じ水準の溶存酸素量になっていることが見て取れる。これらのことから、全層循環は突如発生するのではなく、鉛直循環が水深の浅い層から徐々に深い層へと到達し、最終的に全層循環の状況になったことが示唆される。

図 33 に 200m層における昭和 58 年 4 月から平成 28 年 4 月までの溶存酸素量の推移を示す（ただし、平成 28 年 4 月は速報値。）。この図より、平成 22 年度 2 月の全層循環の 1 年後の平成 23 年度 2 月にも全層循環が発生していることが分かる。平成 24 年 2 月以降、全層循環は発生しておらず、200m層の溶存酸素量は徐々に低下してきている。平成 24 年の全層循環により回復したときの溶存酸素量は 6.2mg/L であったが、4 年経過した平成 28 年 4 月には 0.6mg/L（速報値）まで低下した。昭和 60 年度に発生した全層循環による 200m層の溶存酸素量は 7.6mg/L（昭和 61 年 4 月）まで上昇し、平成 2 年 6 月には定量下限値 0.5mg/L 未満となっていることから、平成 24 年度以降の 200m層における溶存酸素量の低下速度（約 1.35mg/L/年）は、昭和 60 年度の全層循環の時（約 1.70mg/L/年）とほぼ同様であることが分かった。

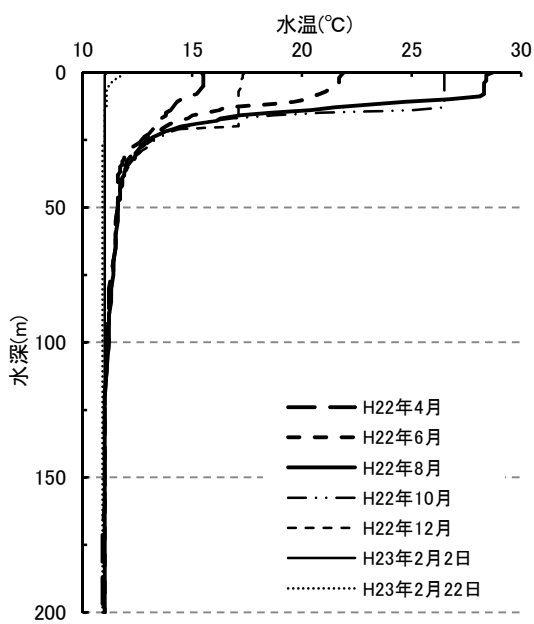


図 31 水温の鉛直分布

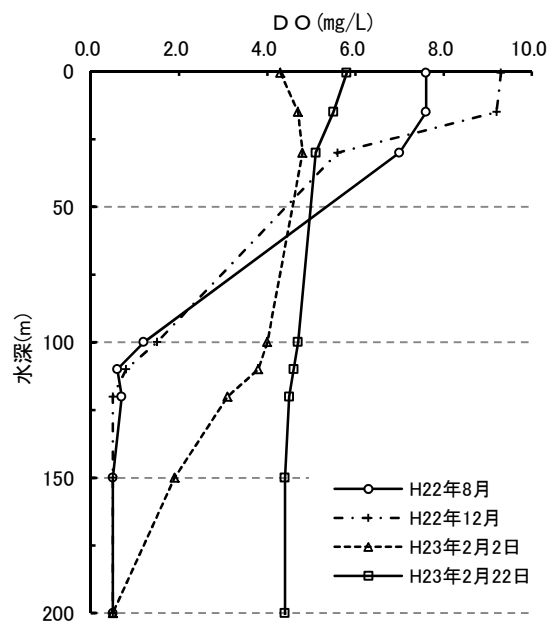


図 32 溶存酸素量の鉛直分布

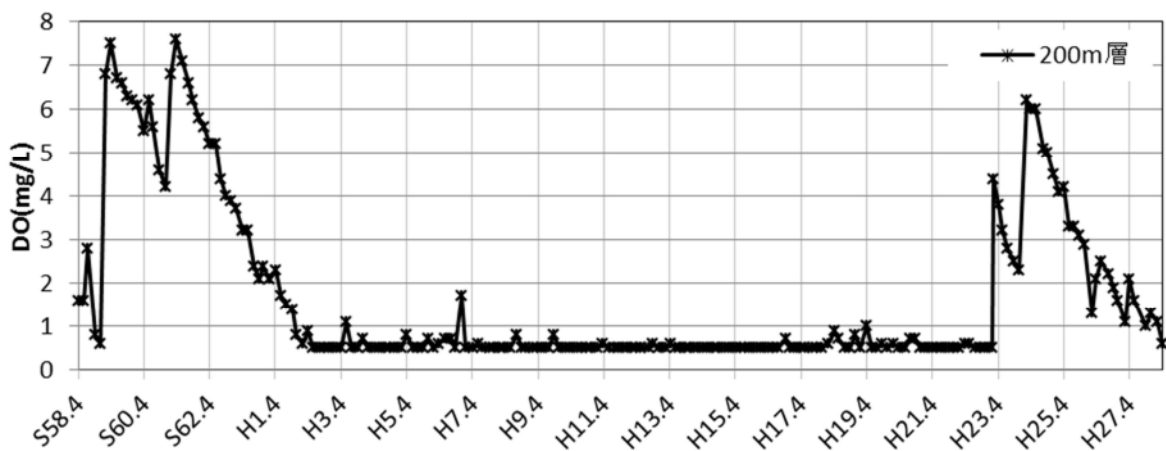


図 33 200m層の溶存酸素量の推移

(ウ) 全窒素

図 34 に、平成 22 年 8 月、12 月、平成 23 年 2 月 2 日、2 月 22 日の全窒素の鉛直分布を示す。

全層循環前（平成 22 年 8 月、12 月）の結果に着目すると、水深 30m 付近に全窒素濃度の極大部があることが見て取れる。その後深度が増すにつれて、全窒素濃度は減少し、水深 110m 付近に大きな濃度低下層が見られる。更に深度が増すと今度は全窒素濃度が増加に転じていることが見て取れる。

全層循環の途中であると考えられる平成 23 年 2 月 2 日の結果を見ると、水深 30m 付近の全窒素濃度の極大部は確認できるものの、水深 110m 付近の濃度低下層は消失していることが分かる。さらに、全層循環後の状況である平成 23 年 2 月 22 日の結果を見ると、水深 30m 付近の全窒素濃度の極大部も消失し、表層から底層に至るまで全層にわたり全窒素濃度が同じ水準になっていた。

(イ) 全りん

図 35 に、平成 22 年 8 月、12 月、平成 23 年 2 月 2 日、2 月 22 日の全りんの鉛直分布を示す。

全層循環前（平成 22 年 8 月、12 月）の結果に着目すると、いずれも水深 100m 層まで全りん濃度は同じ水準であり、その後深度が増すにつれて全りん濃度が上昇していることが分かる。

全層循環の途中であると考えられる平成 23 年 2 月 2 日の結果を見ると、表層から水深 110m 層までの全りん濃度は同じ水準であるが、その値は全層循環前の全りん濃度より高いものになっていた。また、水深 110m 以深においては深度が増すにつれて全りん濃度が上昇していた。全層循環後の状況である平成 23 年 2 月 22 日の結果を見ると、表層から底層に至るまで全層にわたり全りん濃度が同じ水準になっていた。

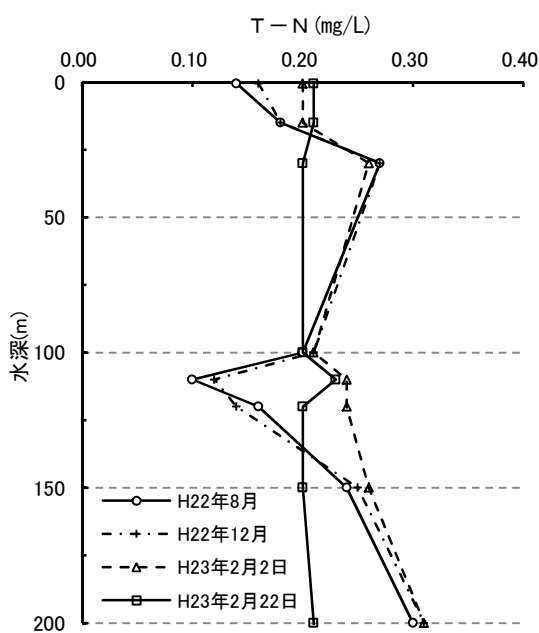


図 34 全窒素の鉛直分布

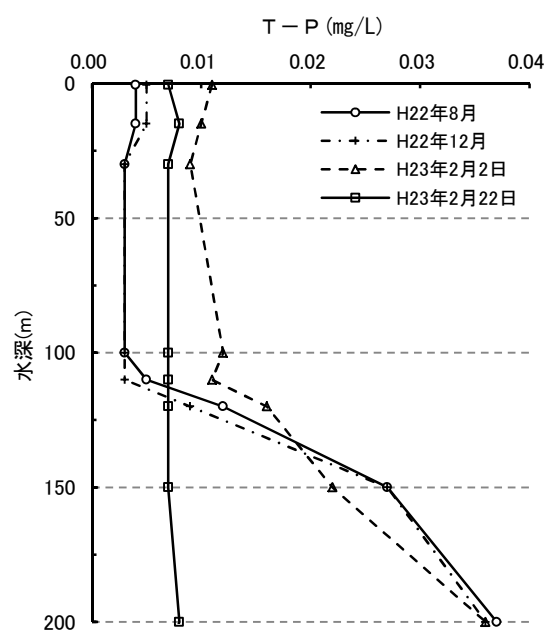


図 35 全りんの鉛直分布