

資料

池田湖の全層循環時の気象状況

Weather Conditions during All Layer Vertical Circulation in Lake Ikeda

山田正人 永田実土 田島義徳

1 はじめに

池田湖は、薩摩半島南部（指宿市）に位置し、火山活動によってできたカルデラ湖で、長径約4kmのやや楕円形をした九州最大の湖であり、最大水深233mはわが国で4番目である¹⁾。池田湖は社会活動の活発化に伴い水質汚濁が進行し、昭和50年代には大規模な淡水赤潮が発生した。このため、1983年に「池田湖水質環境管理計画」が策定され総合的な水質保全対策が講じられた。その結果、表層における池田湖の水質は概ね良好な状態を維持している¹⁾。池田湖の概況を図1に示す。

一方、温暖な地域に位置していること及びその水深から冬季における湖水の鉛直循環が湖底まで及ぶことが少なく、底層の貧酸素状態が長期に及ぶことがしばしばである。貧酸素状態が継続すると湖底に蓄積した栄養塩類が溶出することによる汚濁の進行が懸念されており、これまで全層循環時の気象条件など鉛直循環のメカニズムの検討がなされている^{2),3)}。今回、これらの検討に資するため、各年における湖水の鉛直循環の到達水深を各層

の水温の測定値から推計し、推計した到達水深に対する気象要素の重回帰分析の結果より、全層循環時の気象について、若干の知見を得たので報告する。

2 調査方法

2.1 調査地点

湖心であり、常時監視調査点の基準点2で調査した。調査点を図1に示す。

2.1.1 鉛直方向水温連続測定の方法及び調査期間

メモリー水深水温計を用い表層から底層（200m層）までの水温を連続測定した。調査は、各年度偶数月の常時監視調査時に実施した。年間を通じて水深200mまで水温測定を実施している1983年度から2021年度の39年間の測定データを用いた。

2.1.2 年間連続水温測定及び調査期間

湖心にブイをアンカーで固定し、鉛直方向にメモリー

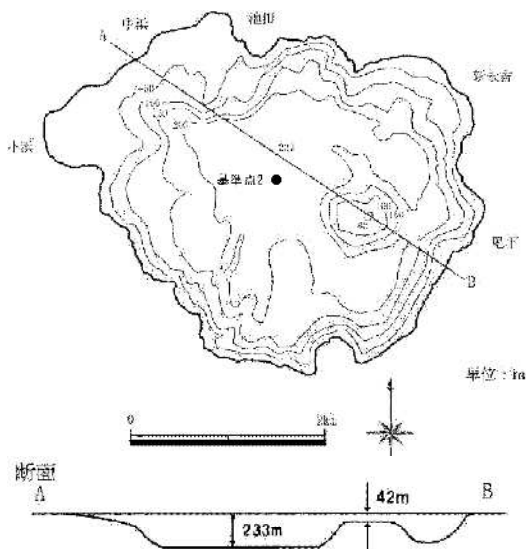
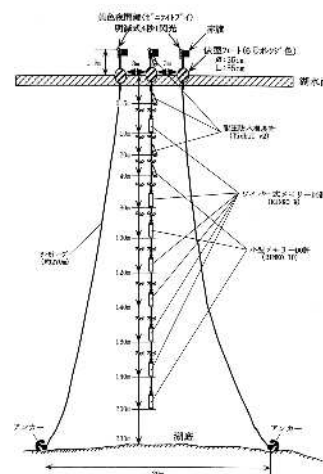


図1 池田湖概況及び調査点（基準点2）



(注) 上記図は、概念図であり2010～2011年の測定時のメモリー水温計の設置位置、機種等は異なる。

図2 メモリー水温計の設置の概念図

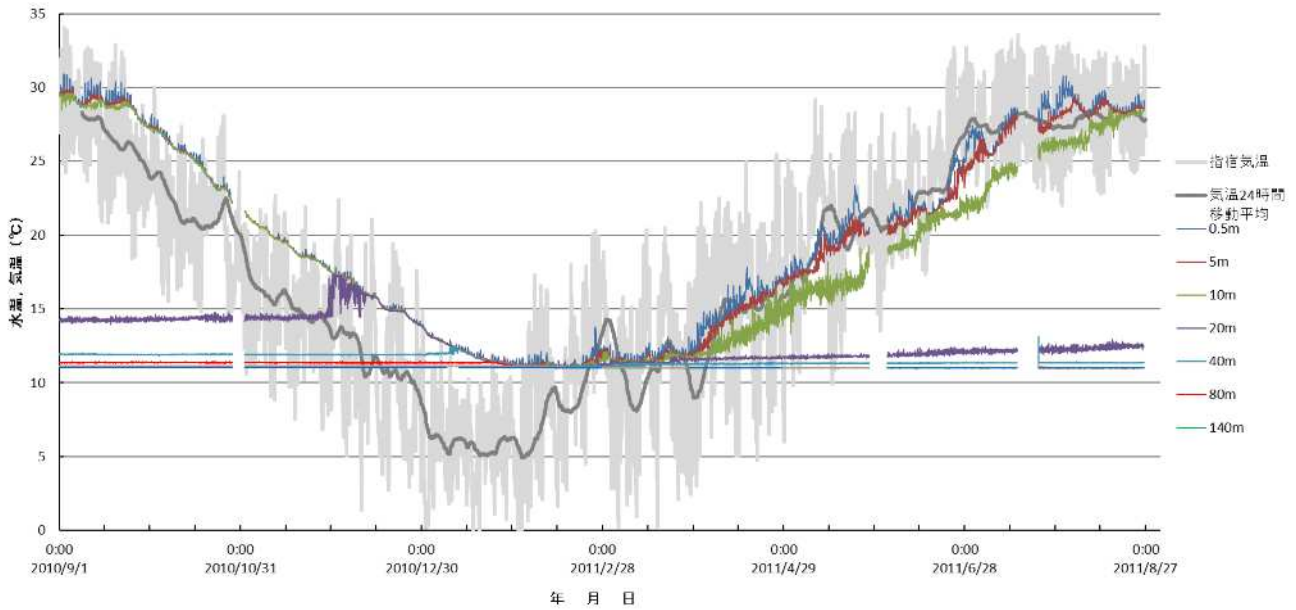


図3 各層（水深毎）水温連続測定結果及び指宿気象観測所の気温（1時間値）

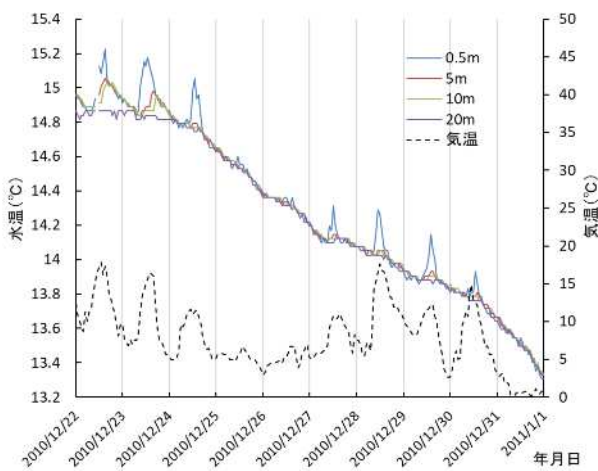


図4 各層（水深毎）水温連続測定結果拡大図

水温計を9個設置し1時間毎に水温を測定した。調査期間は、2010年8月31日から2011年8月26日までの約1年間測定したデータを用いた。なお、年間連続水温測定は、一般財団法人鹿児島県環境技術協会が実施したものである。メモリー水温計の設置の概念図を図2に示す。

2. 1. 3 気象データ

気温と風速は指宿気象観測所の観測値を用いた。また、全天日射量は、指宿気象観測所では観測していないため、鹿児島地方気象台の観測値を用いた。

2. 1. 4 気象要因と鉛直循環推計水深の重回帰分析

湖水が冷却される気象要因として、気温の低下、風速、

日射が考えられる。それらの影響度を把握するため、鉛直循環推計水深を目的変数とし、12項目の説明変数（11月、12月、1月、2月それぞれについての月平均気温、月平均風速、月平均日射量）で重回帰分析を行った。重回帰分析は、エクセルのデータ分析を用いてp値を0.05未満として減少法で行った。

3 結果と考察

3. 1 各層（水深毎）水温連続測定結果

図3に2010年9月から2011年8月までの各層（水深毎）水温連続測定結果及び気温（1時間値）を示す。これは、2011年2月に全層循環が確認されたとされる^{2),3)}前後の各層水温及び気温の推移である。また、図4に各層（水深毎）水温連続測定結果の拡大図（10日間分）を示す。

図3及び図4より、9月から0.5m、5m及び10m層（以下「表層等」という。）の水温は上昇、下降の変動を繰り返しながら徐々に低下している。また、20m層以深の層は当該層の水温と表層等の水温が同じになった時点から低下し始めている。これは、気温が、9月頃から低下し、表層等の水温を下回ることにより表層等が冷却され、湖水の鉛直循環により20m層以深の層も水温が低下していくものと考えられる。

一方、3月以降、気温が上昇に転じると表層等の水温は、気温の上昇と同様に上昇していくことが分かる。なお、20m層の水温は、気温の上昇とともに若干上昇していくものの40m層以深の層は、水温がほぼ一定のままでほとんど上昇は見られない。20m層以深の水温は熱伝導

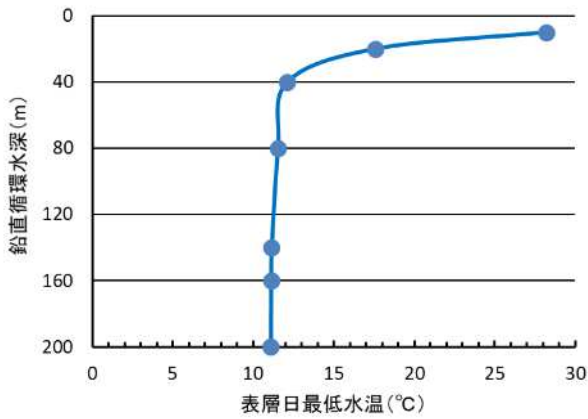


図5 2011年度の表層日最低水温と鉛直循環水深

で若干水温が上昇するものの、深度が深くなるにつれて熱伝導が少なくなるため深度が深くなるほど水温の上昇が小さいと考えられる。

図4より、表層等の水温は、日中の気温上昇や日射により上昇し、夜間は下降している。夜間、湖面が冷却されることにより徐々に表層等の水温が低下し、これに伴い鉛直循環の水深が深くなり深層も水温が低下していく様子が分かる。

これらのことより、水温が表層等から一定となっている水深までは、鉛直循環の影響が及んでいることとなる。

図5に2011年度の表層の日最低水温と鉛直循環水深の関係を示す。表層日最低水温が12°Cくらいから急激に鉛直循環水深が深くなっている。水深40m以深は成層時の温度勾配が小さいため、表層日最低気温の低下に伴い

鉛直循環の水深が急激に深くなるものと考えられる。

3. 2 鉛直方向水温連続測定結果と鉛直循環水深の推計

水温が表層等から一定となっている水深を推計するため、1984年から2022年の2月に測定した各層の水温について30m層とその他の層の水温を比較し、水温の高低を図6に示す。表層に近い浅い層では、図4で示したとおり、日中の気温や日射の状況により水温の上昇、下降が見られるため、昼間の気温上昇や日射の影響の少ない30m層の水温との比較とした。

30m層の水温と同じ水温の層（30m層より深い層で水温が30m層より0.1°C高い場合（1984年と2018年）も含めた。）までを鉛直循環が起こった水深として、鉛直循環水深を推計した。推計結果を図6の最上部に示す。

200m以深まで鉛直循環が起こっていたと推計された年は、1984年、1986年、2006年、2011年、2012年及び2018年の6回であった。2012年以前では、2006年を除くと尾辻らが全層循環が起こったとしている年²⁾と合致している。尾辻らは、2006年は底層（200m層）において溶存酸素（以下「DO」という。）の回復が見られないため全層循環が起こったとしていない²⁾。しかし、坂本らは、2006年冬季の鉛直循環により、200m層までDOが供給されNH₄-Nの酸化によりNO₃-Nが生じたとしており⁴⁾、2006年も全層循環が起こり、酸素が底層に供給されたが、酸化により消費され、上層からのDOの供給が継続しなかったために、溶存酸素の回復は見られなかったものと考えられる。

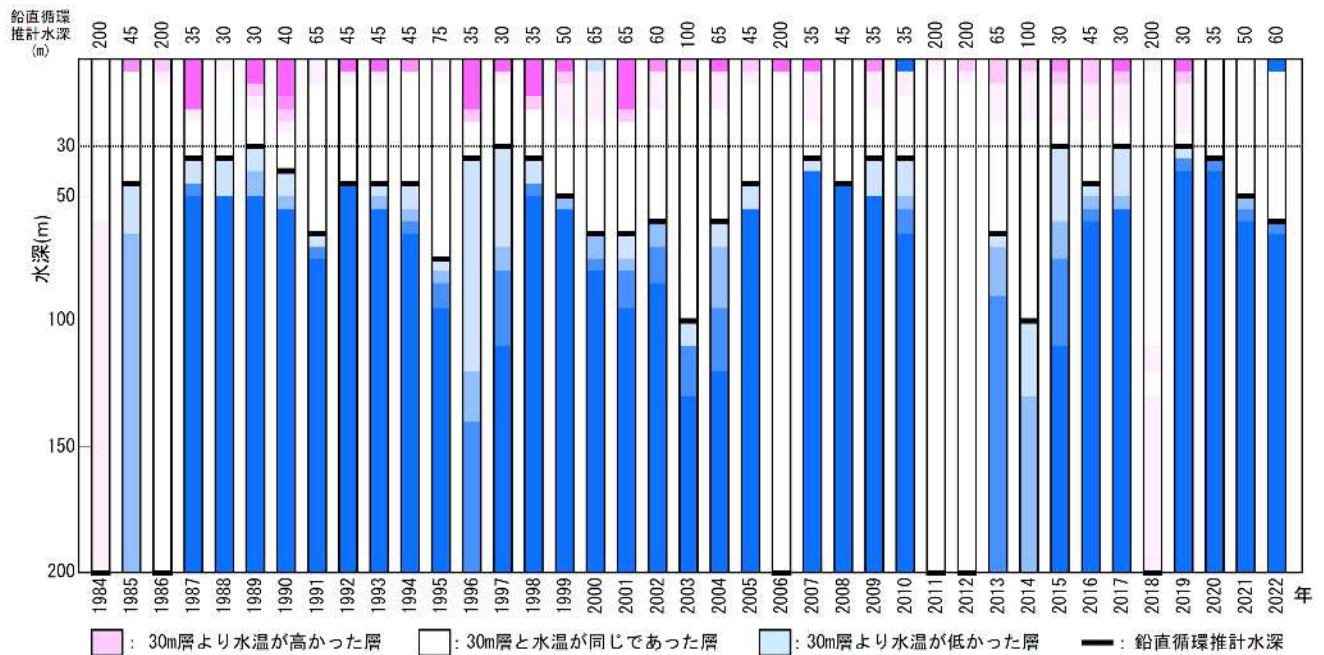


図6 鉛直方向水温連続測定結果（2月）からの鉛直循環推計水深（30m層水温－各層水温）

表1 重回帰分析の減少法における各回説明変数毎のp値

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 11回目 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 気温11月 | 0.55782 | 0.55303 | 0.52726 | 0.46886 | 0.50666 | 0.56781 | | | | | |
| 気温12月 | 0.00697 | 0.00549 | 0.00386 | 0.00245 | 0.00230 | 0.00107 | 0.00054 | 0.00094 | 0.00053 | 0.00077 | 0.00194 |
| 気温 1月 | 0.01109 | 0.00522 | 0.00417 | 0.00161 | 0.00018 | 0.00012 | 0.00009 | 0.00005 | 0.00004 | 0.00005 | 0.00017 |
| 気温 2月 | 0.88933 | | | | | | | | | | |
| 日射11月 | 0.27845 | 0.23504 | 0.15691 | 0.15720 | 0.13712 | 0.15005 | 0.17651 | 0.17792 | 0.26299 | | |
| 日射12月 | 0.27785 | 0.26940 | 0.23153 | 0.18977 | 0.20221 | 0.18493 | 0.21761 | | | | |
| 日射 1月 | 0.23770 | 0.21197 | 0.21685 | 0.17085 | 0.15331 | 0.08985 | 0.09853 | 0.06298 | 0.08066 | 0.09974 | |
| 日射 2月 | 0.80671 | 0.75882 | | | | | | | | | |
| 風速11月 | 0.68189 | 0.67930 | 0.67961 | | | | | | | | |
| 風速12月 | 0.71479 | 0.71526 | 0.62935 | 0.55443 | 0.64886 | | | | | | |
| 風速 1月 | 0.54166 | 0.54467 | 0.56919 | 0.65593 | | | | | | | |
| 風速 2月 | 0.39758 | 0.32354 | 0.23173 | 0.24839 | 0.20130 | 0.17617 | 0.15722 | 0.18921 | | | |



図7 指宿地域の日平均気温の日付毎39年間平均値推移

3. 3 全層循環時の気象の状況

3. 3. 1 鉛直循環推計水深と気象要因の重回帰分析

表1に重回帰分析の減少法における各回説明変数毎のp値を示す。

12項目の説明変数の中で12月と1月の月平均気温のp値が他の説明変数と比べて小さく、有意性が高かった。

図7に1983年から2022年までの指宿気象観測所の10月から3月までの各日平均気温の日付毎39年間平均値の推移を示す。

10月初めから低下してきた気温は2月から上昇しており、池田湖のある指宿地域では通常2月から気温上昇に転じることが分かる。図3の2010年から2011年の気温についても2月から上昇に転じており、2月からは各層の水温の低下も見られない。池田湖周辺では、通常は2月からの気温上昇により表層等が冷却されず、鉛直循環水深も深くないため各層の水温の低下も進まないものと考えられる。なお、気温の上昇に伴い表層等及び20m層の水温は上昇しているものの40m層以深の水温は、ほとんど変化していない。これらのことから、2月が1月より

表2 12月～1月の平均気温の低い方から上位15年度とその他要因等の順位

| 12月～1月平均気温 | | 30m層と200m層の水温差(10月) | | 2月上旬平均気温 | | |
|------------|-------------|---------------------|----|----------|----|-------|
| 順位 | 年度 | (°C) | 順位 | (°C) | 順位 | (°C) |
| 1 | 1983 | 7.48 | 16 | 1.3 | 1 | 3.69 |
| 2 | 1985 | 7.94 | 11 | 1.1 | 4 | 5.99 |
| 3 | 2010 | 8.01 | 22 | 1.6 | 19 | 8.72 |
| 4 | 2017 | 8.29 | 14 | 1.2 | 3 | 5.71 |
| 5 | 2005 | 8.34 | 2 | 0.7 | 15 | 7.90 |
| 6 | 1995 | 8.67 | 30 | 1.9 | 2 | 5.13 |
| 7 | 1996 | 8.86 | 11 | 1.1 | 22 | 8.81 |
| 8 | 2012 | 8.92 | 16 | 1.3 | 34 | 10.87 |
| 8 | 2003 | 8.92 | 5 | 0.8 | 7 | 7.00 |
| 10 | 2013 | 8.95 | 8 | 0.9 | 35 | 10.97 |
| 11 | 2011 | 8.98 | 1 | 0.6 | 6 | 6.75 |
| 12 | 1984 | 9.04 | 5 | 0.8 | 37 | 11.13 |
| 13 | 2014 | 9.18 | 10 | 1.0 | 5 | 6.60 |
| 14 | 2008 | 9.34 | 30 | 1.9 | 33 | 10.82 |
| 15 | 2021 | 9.36 | 28 | 1.7 | 11 | 7.50 |

(注) 年度の太字ゴシック体は全層循環が起こったとされる年度。

も厳冬であった場合を除けば、通常2月の平均気温が鉛直循環に及ぼす影響はないものと考えられる。

3. 3. 2 12月～1月の2ヶ月間の平均気温と鉛直循環推計水深

表2に12月～1月の2ヶ月間平均気温の低い方から上位15年度を示す。

本報で全層循環が起こったとしている6回のうち2011年度を除き5回が12月～1月の2ヶ月間平均気温が低かったことから、12月及び1月の気温が全層循環に寄与していると推測される(表1)。なお、2011年度の12月～1月

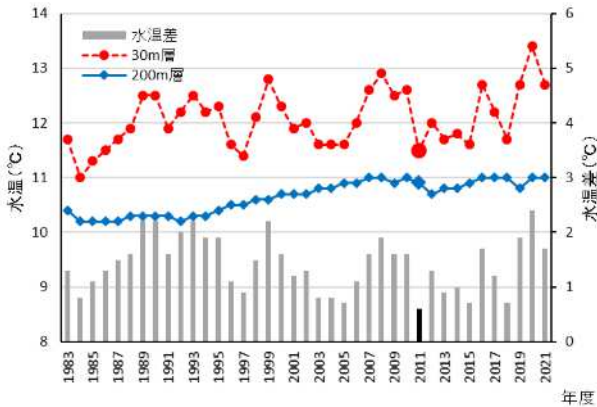


図8 10月の30m層と200m層の水温及び水温差の推移

の2ヶ月間平均気温は低い方から11番目であり、他の要因も含めて全層循環が起こったものと考えられたことからその要因を検討した。

鉛直循環が底層（200m層）まで達するには、表層等の湖水が底層の水温と同じ水温まで低下する必要がある。表層に近い層と底層の水温差に着目して全層循環の要因の検証を行った。表層等の水温は、測定時の気象状況により変化するため、気象状況に水温が左右されない30m層と底層（200m層）の水温差（以下「水温差」という。）について検討した。

表2に12月～1月の2ヶ月間平均気温の順位に対する10月における水温差の順位と2月上旬平均気温の順位を示す。また、図8に10月の30m層の水温と200m層の水温及び水温差の推移を示す。なお、水温差の把握には表層等の水温が低下し始める9月上旬の状況が望ましいが、9月上旬は水温の鉛直分布を測定していないため10月とした。200m層の水温は全層循環の起こった1985年度から上昇し、次に全層循環が起こった2010年度までに0.8°C上昇している（約0.03°C/年）。これは鉛直循環による水温上昇ではなく、わずかな熱伝導による水温上昇と考えられる。表層等は、春季から夏季に高い気温や日射により温められ、水温の上昇度合いは気象状況により異なると考えられる。30m層は、表層等の水温の影響を受け水温上昇するが、池田湖では、水深20m前後に水温躍層が見られるため、30m層の水温上昇は表層等からの熱伝導によるものと考えられる。

秋季から冬季にかけて湖水全体が均一な水温に低下するには、表層等の水温に関する気象条件及び底層（200m層）のわずかな熱伝導による水温上昇が相まって、水温差が小さくなることに関係しているものと考えられる。2011年度は水温差が0.6°Cと39年間では最も小さくなっており、12月～1月の2ヶ月間平均気温がそれほど低くな

いにもかかわらず全層循環した一つの要因ではないかと考えられる。

また、通常2月になると気温が上昇に転じるが、2011年度は、2月上旬の平均気温が6.75°C（6位）と1月の平均気温7.5°Cより低く上昇に転じなかったことも全層循環した要因の一つではないかと考えられる。

以上のことにより、12月～1月の2ヶ月間平均気温が低温の時に全層循環が起こるものの、ある程度の低い気温と水温差が小さく、2月上旬が1月よりも冷え込み湖水の水温を低下させる状況の継続等、いくつかの湖水の水温を低下させる要因が重なれば全層循環が起こるものと考えられる。裏を返せば、厳冬の年、全層循環が起こり底層の湖水の水温低下が大きければ、その後は、表層に近い層と底層の水温差が大きくなり、全層循環が1986年度に起こった後、2010年度まで起こらなかったように、長期に渡り全層循環が起こりにくい状態になるものと考えられる。

4 まとめ

- 1) 池田湖の表層から底層（200m層）までの9層の水温を年間連続測定結果から、表層の湖水が冷却され鉛直循環により湖水水温が下層まで低下していくことが確認された。
- 2) 水温の鉛直方向への分布から、鉛直循環水深を推計することにより、全層循環は1984年、1986年、2006年、2011年、2012年及び2018年の6回起きていると考えられた。
- 3) 推計鉛直循環水深を目的変数とし、12項目の説明変数（11月、12月、1月、2月それぞれについての月平均気温、月平均風速、月平均日射量）で重回帰分析した結果、12月と1月の平均気温の影響度が大きいことが分かった。
- 4) 2011年度を除き、全層循環した6回のうち5回の12月～1月の2ヶ月間平均気温が低かった。
- 5) 2011年度は12月～1月の2ヶ月間平均気温がそれほど低くなかったが、10月時点において30m層と底層（200m層）の水温差が小さく、2月上旬の低い平均気温と相まって全層循環が起こったと推察された。

謝辞

池田湖において1年間に渡り、多層の水温の連続測定を実施し、そのデータを御提供いただいた一般財団法人鹿児島県環境技術協会の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鹿児島県；第4期池田湖水質環境管理計画（2011）
- 2) 尾辻裕一，長井一文，他；池田湖における全層循環について，本誌，**13**，41～48（2012）
- 3) 牛垣里奈，大庭大輔，他；池田湖の水質変動及び全層循環の発生要件について，本誌，**19**，40～46（2018）
- 4) 坂本洋，大淵脇久治，他；池田湖の底層における栄養塩類の挙動及び湖水循環時における水質変動について，本誌，**8**，76～82（2007）