

ノート

## 池田湖の水質変動及び全層循環の発生要件について

### A Study of the Factors in the Change of Water Quality and All Layer Vertical Circulation in Lake Ikeda

牛垣 里奈                      宮元 誠<sup>1</sup>                      右田 裕二  
榎 憲弘                      山道 哲洋                      大庭 大輔

#### 要 旨

2018年2月、6年ぶりに池田湖の全層循環が確認されたため、池田湖における全層循環前後の水質変動について、溶存酸素量、全窒素、栄養塩類、全りん及び水温の調査結果を用いて解析を行った。溶存酸素量の結果から、底層（200 m）の調査が開始された1983年以降、全層循環が確認されたのは、1984年、1986年、2011年、2012年及び2018年の5回であった。また、気象データを用いて全層循環の発生要件を検討したところ、1月及び2月の平均気温が関係していると考えられた。

キーワード：全層循環、DO、水温、平均気温

#### 1 はじめに

池田湖は、鹿児島県薩摩半島の南端に位置する湖面積10.95 km<sup>2</sup>、最大水深233 mの九州最大の自然湖沼であり、約6400年前の火山活動に伴い形成されたカルデラ湖である。年間を通じて表層の水温が4℃以上であることから、熱帯湖に分類される<sup>1)</sup>。

池田湖の水質は、1955年頃から周辺地域における社会活動の活発化に伴い、淡水赤潮が発生するなど水質悪化が顕在化した。このため、鹿児島県は1983年3月、池田湖の水質環境を保全することを目的に、「池田湖水質環境管理計画<sup>2)</sup>」を策定し、総合的な水質保全対策を推進している。

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、経済協力開発機構（OECD）の栄養レベルに基づく調和型湖沼の分類では、中栄養から貧栄養に分類されるようになった。

池田湖においては、2012年以降、全層循環が確認されていなかったが、2018年2月に約6年ぶりに全層循環が確

認された。本報では、全層循環前後の水質変動及び全層循環が発生した気象的要因について検討したので報告する。

#### 2 調査

##### 2.1 調査地点及び採水層

図1に示す最大水深233 mの湖心に設定されている基準点2を対象とし、採水層は鉛直方向5層（0.5 m、15 m、30 m、100 m、200 m）とした。

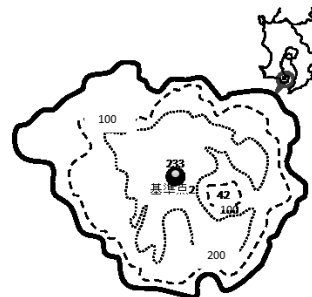


図1 調査地点

鹿児島県環境保健センター  
1 南薩地域振興局保健福祉環境部

〒892-0835 鹿児島市城南町18番地  
〒897-0001 南さつま市加世田村原二丁目1-1

2. 2 調査期間及び調査時期

1983年4月から2018年2月まで、年6回(偶数月)の調査を実施した。

2. 3 調査項目

溶存酸素量(DO)、全窒素(T-N)、栄養塩類(NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N)、全りん(T-P)及び水温とした。

2. 4 調査方法

水温以外の項目は、表層(0.5 m)のみバケツで直接採水し、その他の水深はバンドーン採水器により採水した。測定は試験室にてJIS K 0102又はJIS K 0170に基づき行った。

水温は、メモリー水深水温計(アレック電子株式会社(現:JFEアドバンテック株式会社)製 ABT-1)を用い、表層から底層までの水温を現地で記録した。

3 結果及び考察

3. 1 DOについて

図2に表層(0.5 m)、下層(100 m)及び底層(200 m)における1983年4月から2018年2月までのDOの推移を示す。

す。なお、報告下限値(0.5 mg/L)未満の場合は、0.5 mg/Lとして表示した。

底層のDOが表層と概ね一致したときを全層循環とした場合、1983年以降において全層循環が確認されたのは、1984年、1986年、2011年、2012年及び2018年の5回であった。

層別では、表層のDOは、概ね春季から夏季にかけて減少し、秋季から冬季にかけて増加するといった季節変動が確認された。しかしながら、全層循環が確認された年においては、底層との混合による影響と考えられる表層DOの低下が冬季に確認された。下層及び底層のDOは、鉛直循環時にDOが上昇し、その後低下するといった明瞭な変動が確認された。なお、2003年のように、底層までの循環が確認されなかったが、100 m層前後まで部分循環が確認された年もあった。

図3に表層、下層及び底層のDO飽和率の推移を示す。表層のDO飽和率は概ね夏季に高く冬季に低くなるといった季節変動を繰り返しており、その範囲は概ね80~120%で推移しているが、全層循環が確認された年はDO飽和率が60%前後になることもあった。

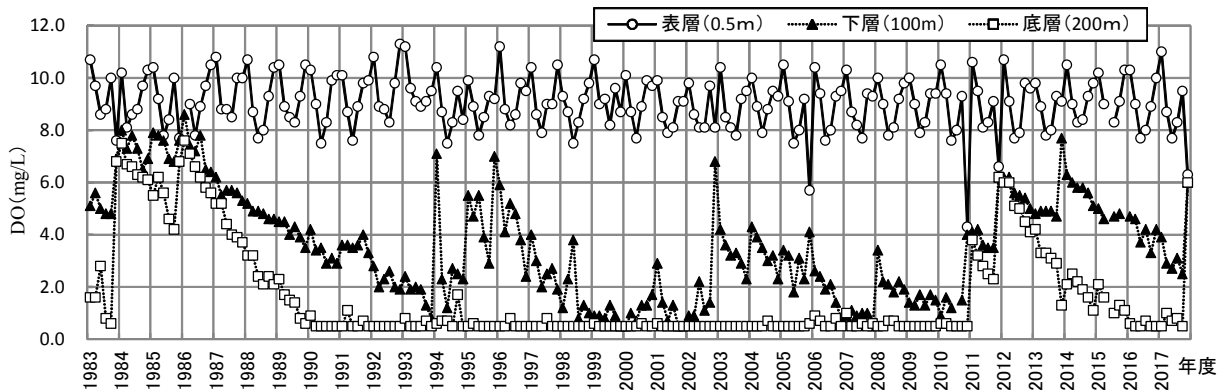


図2 DOの推移(基準点2)

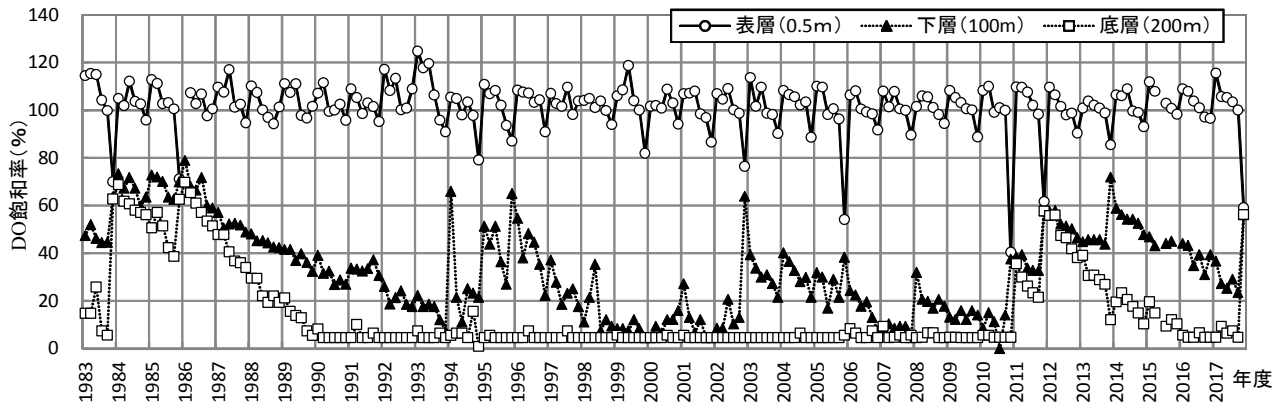


図3 DO飽和率の推移(基準点2)

下層及び底層のDO飽和率は、鉛直循環時に上昇し、その後低下するといったDOと同様の変動が確認された。

また、全層循環時には表層から底層までDO飽和率がほぼ一致していたが、全層的にDOが飽和に達していなかった。これは、厳冬には湖水が全層にわたり混合するが、溶存酸素は飽和に達さない「不完全全循環」であることを示しており、熱帯湖の特徴が顕著にあらわれた結果となっている。

### 3. 2 窒素について

#### 3. 2. 1 T-Nについて

図4に表層、下層、底層のT-N及び注水量の推移を示す。

表層は1987年、1998年、1999年に高濃度を示した。池田湖は、畑地かんがい用水を確保するために、池田湖の直接集水域を流れる3河川（以下「導水河川」という。）から余剰水を池田湖へ注水一時貯留している<sup>2)</sup>が、前述の3年は池田湖への注水が多かった年であり、また、図5より導水河川のT-Nが池田湖の数十倍と高濃度であることから、表層のT-N濃度が上昇した要因については、主に導水河川による影響が大きいと考えられる。

下層においては、概ね0.1~0.3 mg/Lの範囲で推移し

ており、全層循環後には漸増傾向を示していたが、1986年の全層循環後は、1990年まで漸増傾向で推移した後、漸減傾向に転じている。このような水質変動を示す要因としては依然として不明な点が多い。

底層については、底泥からの溶出と考えられる濃度上昇が1992年頃から確認されたが、2006年2月に大幅に減少している。これは、同月前後に発生した100 m以深に及ぶ鉛直循環の影響を受け、T-Nが減少したもの<sup>3)</sup>と考えられる。また、2012年の全層循環後は、漸増傾向を示したのち、2015年頃をピークに漸減傾向を示している。この要因についても不明な点が多く、表層から底層までの池田湖の水質変動を解析する上でさらなる検討が必要である。

#### 3. 2. 2 栄養塩類について

図6に底層における栄養塩類の推移を示す。なお、報告下限値（それぞれ0.002 mg/L）未満の場合は、0.002 mg/Lとして表示した。

NH<sub>4</sub>-Nは、1990年頃から上昇し、2004年2月には0.503 mg/Lまで上昇したが、2006年2月から4月にかけて

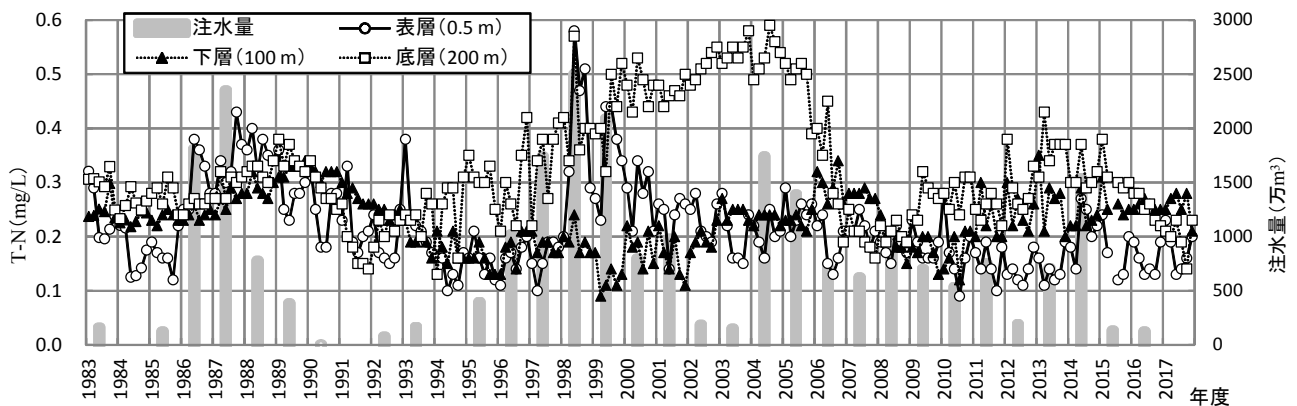


図4 T-N及び注水量の推移（基準点2）

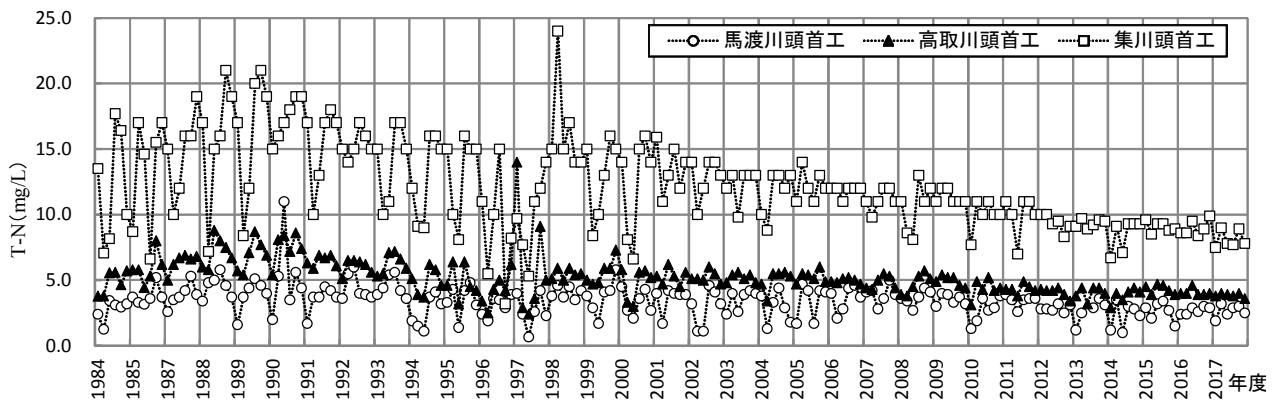


図5 導水河川のT-Nの推移

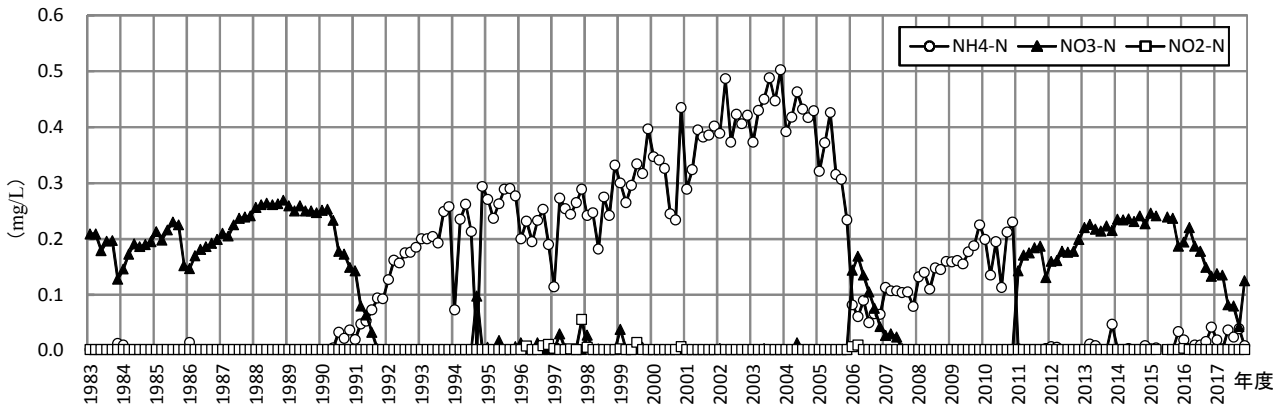


図6 底層における栄養塩類の推移 (基準点2)

て急激に低下した。その後、再び上昇傾向を示したが、2011年の全層循環により0.002 mg/L未満となった。また、2016年頃から上昇傾向を示し始めたが、2018年の全層循環により0.009 mg/Lまで低下した。

NO<sub>3</sub>-Nは、1990年頃から低下し、1992年2月には0.002 mg/L未満となった後は、概ね報告下限値未満で推移していたが、2006年4月に0.144 mg/Lと大幅に上昇した。その後は減少傾向を示し、2007年12月には再び報告下限値未満となった後は概ね報告下限値未満で推移していたが、2011年4月に0.143 mg/Lと再度大幅な上昇を示した。その後、概ね0.2 mg/L前後で推移したのち、2016年頃から減少傾向を示していたが、2018年2月に再び増加に転じた。

NO<sub>2</sub>-Nは、ほとんど報告下限値未満で推移していた。郡山ら<sup>4)</sup>は、鰻池において、窒素の底泥からの溶出の大部分がNH<sub>4</sub>-Nであったと報告している。池田湖においても同様の現象が起こっていたものと考えられ、底層においては無酸素状態ではNH<sub>4</sub>-Nが大部分を占め、全層循環発生時などの酸素存在下では硝化によりNH<sub>4</sub>-NがNO<sub>2</sub>-Nを経てNO<sub>3</sub>-Nになると考えられる。このような反

応により、全層循環時にNH<sub>4</sub>-Nが減少し、NO<sub>3</sub>-Nが増加する現象がみられたと考えられる。

### 3. 3 りんについて

図7及び図8に表層、下層、底層のT-P及び注水量の推移を示す。なお、報告下限値 (0.003 mg/L) 未満の場合は、0.003 mg/Lとして表示した。

表層については、T-Nが高くなった1987年、1998年、1999年においてもT-Pは高くならなかった。図9より、導水河川のT-Pは池田湖の数倍程度で推移しており、T-Nほど導水河川の影響は大きくないと考えられる。

下層については、2000年、2006年、2011年に顕著な上昇がみられた。その後、2012年の全層循環以降では、0.003 mg/L以下で推移していた。

底層については1992年から2005年にかけて増加傾向にあったが、2006年2月から4月にかけて大幅に低下している。その後、2007年頃から増加傾向を示したが、2011年の全層循環で再び低下した。さらに、2017年2月及び同年8月に0.010 mg/Lを示すなど漸増傾向を示したが、2018年2月の全層循環により0.003 mg/Lに低下した。

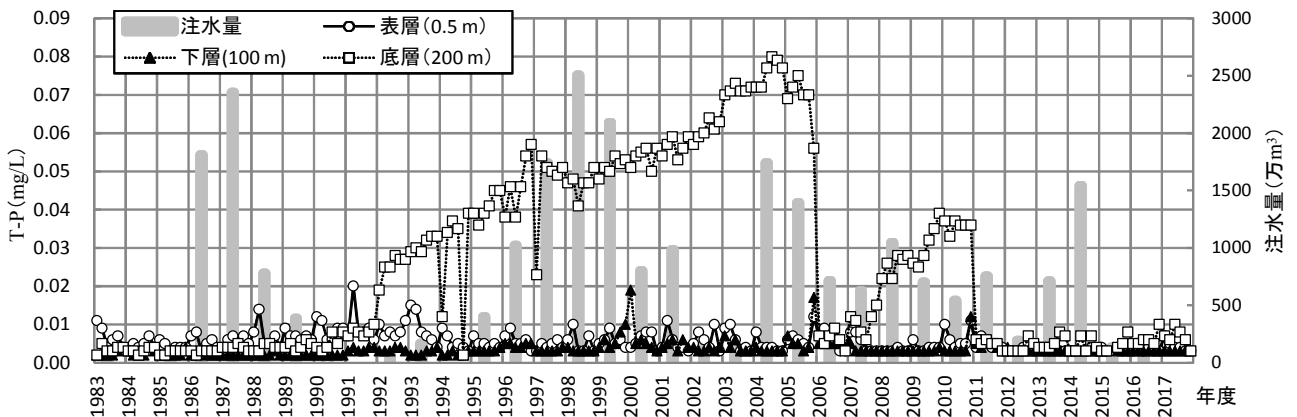


図7 T-P及び注水量の推移 (基準点2)

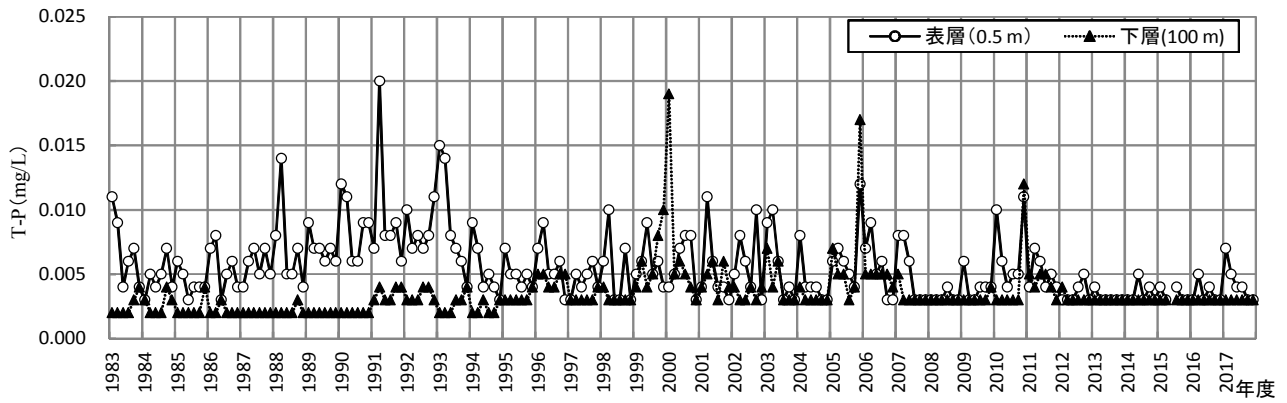


図8 T-Pの推移 (基準点2)

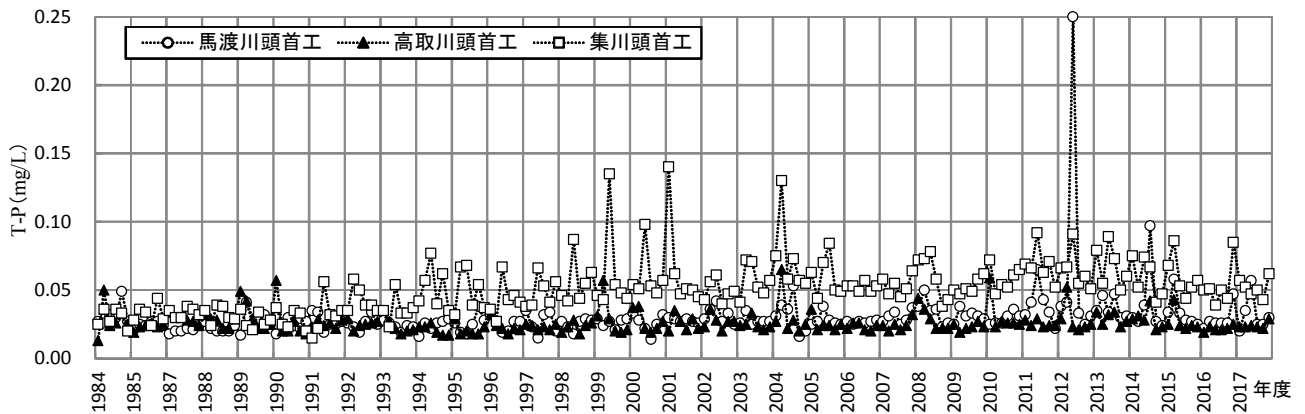


図9 導水河川のT-Pの推移

2006年及び2011年の鉛直循環前には、底層のT-Pが下層と比較して高かったことから、鉛直循環後に底層の高濃度T-Pが下層と混合され、一時的に下層のT-Pが高くなったものと考えられる。

### 3. 4 水温について

図10に表層及び底層の水温の推移を示す。表層の水温は、春季から夏季にかけて上昇し、秋季から冬季にかけ

て低下するといった季節変動を繰り返していた。

一方、底層の水温については、1984年4月が10.1℃と最も低かったが、その後上昇傾向を示し、2018年2月は11.0℃と最も高かった。また、底層水温の上昇率は約0.027℃/年であった。これは、鹿児島における1931～2016年の気温変化率<sup>5)</sup>(2.8℃/100年=0.028℃/年)と概ね一致していた。

鉛直循環が起こる時期と考えられる2月における表層

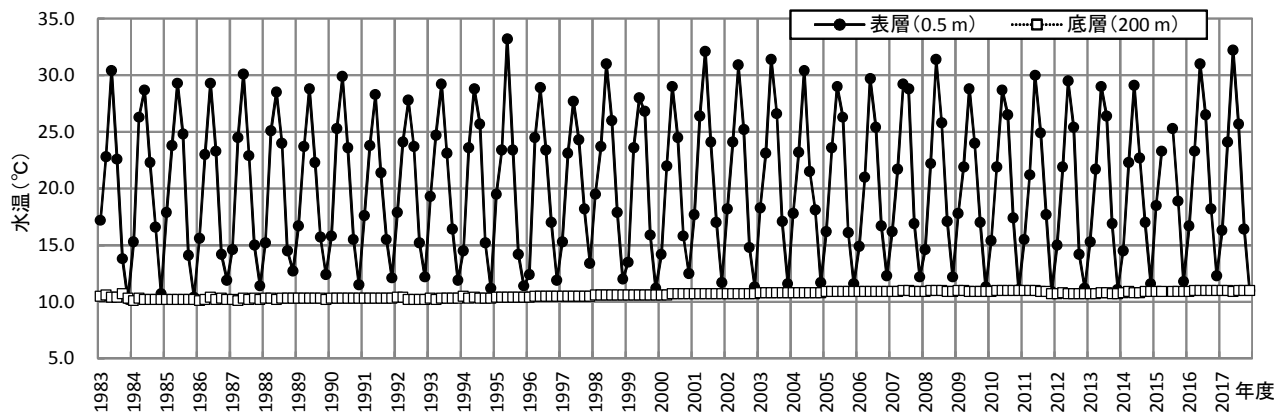


図10 水温の推移 (基準点2)

及び底層の水温について図11に示す。全層循環が確認された年は、表層と底層の水温差が0.2℃以下のときであった。

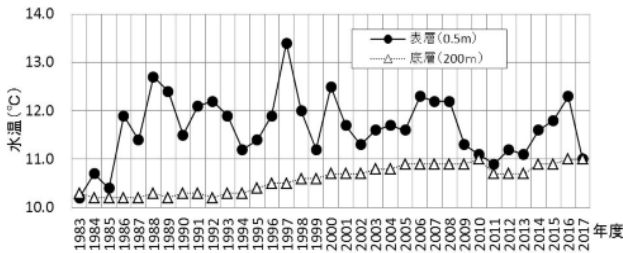


図11 2月における表層及び底層の水温の経年変化 (基準点2)

3. 5 全層循環が発生した気象的要因について

全層循環の発生には、主に次に示す2つの物理過程が考えられる<sup>6)</sup>。

- ① 気温の低下と冷たい季節風の吹き出しによって冷却された湖面水が、強制対流によって下方にもぐりこむ。重くなった表面の水が徐々に沈み、下方の水と混合しながら下降する。
- ② 湖岸の水が冷やされて、密度流となって湖底に流れ込む。

池田湖においては、流入河川は延長2 km未満の小規模な河川のみであることから、河川からの冷たい水により湖岸の水が冷やされることは考えにくい。よって、池田湖における全層循環は、前述①のとおり、気温と風速が関係していると考えられる。

尾辻ら<sup>7)</sup>は、1月の気温と風が全層循環の発生要因であるとし、1月の日平均気温から底層水温を差し引いた指標である「日平均温度差」と、「日平均風速和」の積（以下「日平均温度差風速和積」という。）を用い評価を行っている。今回は、2018年の全層循環についても、この評価方法について検討を行った。なお、「日平均温度差」と「日平均風速和」の式は次のとおりである。また、気象データについては、指宿観測所の観測データ<sup>8)</sup>を用いた。

$$\Delta T_{\text{日平均温度差}} = \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} (T_{1\text{月}i\text{日の日平均気温}} - T_{\text{湖水温}}) \dots \textcircled{1}$$

$$\Delta W_{\text{日平均風速和}} = \sum_{i=1}^{31} (W_{1\text{月}i\text{日の日平均風速}}) \dots \textcircled{2}$$

日平均温度差風速和積 = 日平均温度差 (①) × 日平均風速和 (②)

図12に、1月における日平均温度差風速和積の経年変

化を示す。尾辻らは、底層が無酸素状態となった後の最初の全層循環は、風向が北北西の要件における日平均温度差風速和積が閾値 (-163~-246℃・m/s) を下回った場合に発生するとしているが、2018年2月の全層循環時における日平均温度差風速和積は-75.1℃・m/sであり、上記要件には該当しなかった。また、風向が全方位の要件における日平均温度差風速和積も求めたが、全層循環と日平均温度差風速和積との関係は見出せなかった。よって、気温と風速が全層循環に与える要件については、さらなるデータの蓄積を行い解析を行う必要があると考える。

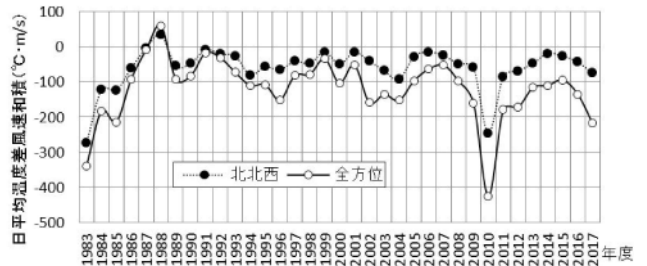


図12 1月における日平均温度差風速和積の経年変化

そこで、今回は、気温と水温の関係により、池田湖における全層循環の発生要件について検討を行った。

指宿観測所における12月から2月までの平均気温の推移を図13に示す。1月の平均気温が7℃を下回る場合、又は1月の平均気温が8℃以下でかつ2月の平均気温が9.3℃を下回る場合のいずれかの要件で、全層循環が確認された。

よって、池田湖における全層循環の要件として、1月及び2月の平均気温が関係しており、1月の平均気温の影響がより大きくなると考えられた。

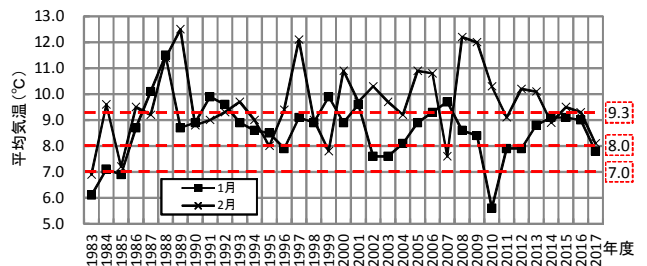


図13 指宿観測所における平均気温の推移

また、尾辻ら<sup>7)</sup>は、1月の日平均温度差を用いた解析を行っているが、今回の結果から、2月の平均気温も全層循環の発生に影響を及ぼしていると示唆されている。そこで、1月及び2月における日平均温度差を用いて検討を

行った。

図14に、1月及び2月における日平均温度差の推移を示す。全層循環が確認された年は、1月と2月の日平均温度差の合計が $-4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下となっていた。

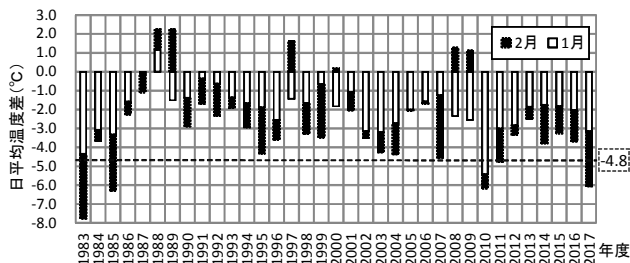


図14 1月及び2月における日平均温度差の推移

#### 4 まとめ

全層循環前後における池田湖の水質変動及び全層循環の発生要件について、DO, T-N, 栄養塩類, T-P及び水温の結果並びに気象データを用いて解析を行ったところ、以下のことが明らかになった。

- 1) 1983年以降において全層循環が確認されたのは、1984年、1986年、2011年、2012年、2018年の5回であった。
- 2) 全層循環により、DOやりん等に大きな変動がみられた。
- 3) 底層の水温は上昇傾向を示し、上昇率は約 $0.027\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ であった。これは、鹿児島における1931～2016年の気温変化率( $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{年} = 0.028\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ )と概ね一致していた。
- 4) 1983年以降において全層循環が確認されたのは、2月における表層と底層の水温差が $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下のときであった。
- 5) 池田湖における全層循環の要件として、1月及び2月の平均気温が関係しており、1月の平均気温の影響がより大きくなると考えられた。また、日平均温度差による解析結果から、全層循環が確認された年は、1月と2月の日平均温度差の合計が $-4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下であった。

#### 5 おわりに

今回の解析において、池田湖における全層循環が確認された時の気象要件について整理を行ったところであるが、1月と2月の平均気温の寄与率など、全層循環の発生要件については依然不明な点が多い。このことから、さらなるデータの蓄積を行い、池田湖の全層循環の発生要件を明らかにする必要がある。

#### 参考文献

- 1) 環境庁自然保護局；第4回自然環境保全基礎調査湖沼調査報告書（1993）
- 2) 鹿児島県；第4期池田湖水質環境管理計画（2011）
- 3) 坂本洋，西中須暁子，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）
- 4) 郡山立身，稲本信隆，他；鰻池の富栄養化に関する基礎的研究－溶出・脱窒・沈降現象について－，鹿児島県環境センター所報，2，158～170（1986）
- 5) 気象庁；ヒートアイランド監視報告2016（2017）
- 6) 永田俊，熊谷道夫，吉山浩平編；温暖化の湖沼学，17～45，京都大学学術出版会（2012）
- 7) 尾辻裕一，坂元克行，他；池田湖における全層循環について，本誌，13，41～48（2012）
- 8) 気象庁過去の気象データ検索（鹿児島県指宿）；  
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec\\_no=88&block\\_no=0893](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=88&block_no=0893)  
※上記アドレスについては、原稿作成時のものであり、現在は変更されている場合があります。