

## 原 著

## 池田湖における全層循環について

尾 辻 裕 一                      坂 元 克 行                      貴 島                      宏  
永 井 里 央                      宮ノ原 陽 子<sup>1</sup>                      長 井 一 文

## 要 旨

2011年2月、池田湖において25年ぶりに全層循環が発生した。溶存酸素と栄養塩類の挙動に着目し、全層循環前後の水質の変化について調査するとともに、全層循環が発生した気象的要因について解析を行った。その結果、以下の事象が明らかになった。

- (1) DOについて、全層循環前の状況下では水深100mから110m以深で無酸素状態になっていた。
- (2) T-P及びPO<sub>4</sub>-Pについて、全層循環前の状況下では、りんが底泥より溶出していたことが示唆された。全層循環発生による、りんの挙動については、DOと鉄の挙動と併せて考えることで説明できた。
- (3) T-Fe及びT-Mnについて、全層循環前の状況下では、底泥から溶出していたことが示唆された。
- (4) T-N及び各態窒素について、全層循環前の状況下では水深110m以浅で硝化、水深110mで脱窒、水深110m以深でNH<sub>4</sub>-Nが底泥より溶出していることが示唆された。全層循環の発生に伴い、これらの反応は見られなくなった。
- (5) 全層循環成立時と不成立時の気温と風配図の比較を行うことで、1月の気温と風が全層循環の発生の要因になることが示唆された。2011年は1月の気温と湖水温の日平均温度差と北北西の日平均風速との積が閾値 (-163から-246°C・m/s) を下回る、気温及び風が発生していたため全層循環が発生した。

キーワード：池田湖，循環，混合，湖水，溶存酸素，りん，窒素，鉄，マンガン，気象条件

## 1 はじめに

池田湖は薩摩半島南部に位置する湖面積10.95km<sup>2</sup>、周囲15.1km、最大水深233mを誇る九州最大の湖である。この湖は年間を通じて表層の水温が4°C以下にならない、亜熱帯湖<sup>1)</sup>ないしは熱帯湖<sup>2)</sup>に属している。亜熱帯湖ないしは熱帯湖の特徴として、厳冬には湖水が全層にわたり混合するが、溶存酸素量は飽和に達さない「不完全全循環」、暖冬には一部の湖水のみが混合する「部分循環」が起こることが知られている。

本県では、1975年以降公共用水域の水質常時監視として継続的に池田湖の水質調査を実施するとともに、池田湖水質環境管理計画<sup>3)</sup>を策定し総合的な水質保全対策を講じている。

湖水の循環は、1986年2月に全層循環が確認された<sup>4), 5)</sup>のを最後に、2011年2月に至るまで部分循環しか発生し

なかった。そこで、全層循環が起こらないことにより、底層で何が起こっていたのか、また、全層循環が発生することで何が変化するのかを明らかにするため、池田湖の中層から底層部における溶存酸素と栄養塩類の挙動に着目し、全層循環前後の水質の変化について調査を行った。また、全層循環が発生した気象的要因についても解析を行ったので報告する。

## 2 全層循環前後の水質について

## 2.1 調査方法

## 2.1.1 調査地点及び採水層

調査地点は、図1に示す最大水深233mの湖心に設定された環境基準点2（以下「基準点2」という。）を対象とした。また、採水層は常時監視として継続した調査がなされてきた、水深0.5m, 15m, 30m, 100m, 200mの5層

鹿児島県環境保健センター

1 鹿児島県食の安全推進課

〒892-0835

〒890-8577

鹿児島市城南町18番地

鹿児島市鴨池新町10番1号

に加え、新たに調査研究追加層として水深110m, 120m, 150mの3層を設定した。

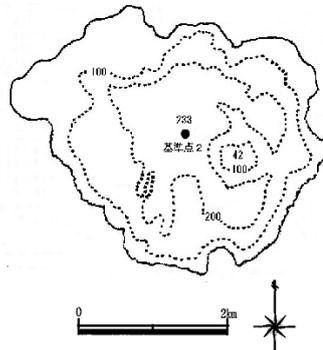


図1 調査地点

2. 1. 2 調査期間

2010年4月から2012年2月の期間、偶数月に調査を実施した。また、2011年2月の調査（2月2日実施）で湖水循環の兆候が見られたため、2011年2月22日に追加の調査を行った。

2. 1. 3 調査項目

調査項目として、水温、DO（溶存酸素量）、T-P（全りん）、PO<sub>4</sub>-P（りん酸態りん）、T-Fe（全鉄）、T-Mn（全マンガン）、T-N（全窒素）、NO<sub>3</sub>-N（硝酸態窒素）、NO<sub>2</sub>-N（亜硝酸態窒素）、NH<sub>4</sub>-N（アンモニア態窒素）を設定した。

水温についてはアレック電子社製の水温計を用い、表層から湖底までの値を現地で記録した。その他の項目についてはバンドーン採水器で採水し、実験室にてJIS K 0102又はJIS K 0170に準拠した方法で測定した。

2. 2 分析結果と考察

2. 2. 1 水温について

図2に2010年4月、6月、8月、10月、12月、2011年2月2日、2月22日の水温の鉛直分布をそれぞれ示す。また、比較のため、図3に2009年4月、6月、8月、10月、12月、2010年2月の水温の鉛直分布を示す。

全層循環が発生した2010年度（図2）と部分循環が発生した2009年度（図3）のグラフを比較すると、両者とも年間を通し以下の変化をたどっていた。

- ①4月より徐々に水温躍層が形成される。
  - ②8月に最も顕著な水温躍層が形成される。
  - ③2月に向けて徐々に水温躍層が崩壊する。
- 水温躍層は、水深10～30mに形成されていることが

分かる。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。図2と図3で差が見られるのは2月の水温鉛直分布である。2010年2月における、表層から水深30m層（水温躍層が形成されていたと考えられる水深）までの平均水温と底層水温との差は0.9℃であるのに対し、2011年2月22日においては、0.2℃と水温差が小さかった。このことは、2011年2月22日に湖水の混合が起これり各層の水温が均一化されたことを意味しており、全層循環が発生したことを示唆している。

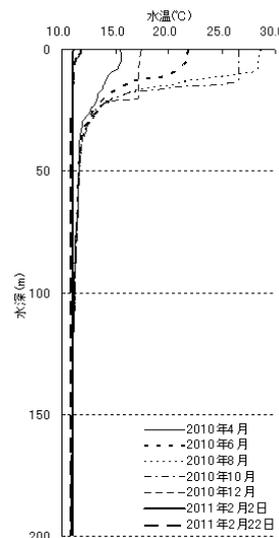


図2 2010年度の水温鉛直分布

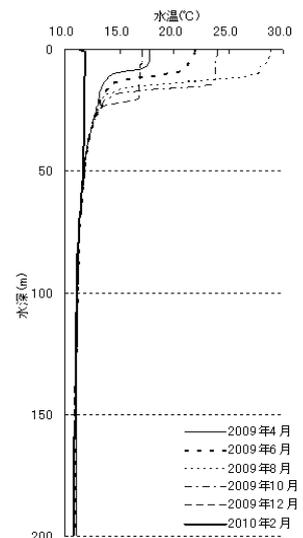


図3 2009年度の水温鉛直分布

2. 2. 2 DOについて

図4に、2010年度のDOの鉛直分布を示す。グラフには、水温躍層が顕著に形成される8月、水温躍層が完全に崩壊する前の状況である12月、水温躍層が完全に崩壊する2月（2月2日及び2月22日）の結果をそれぞれ示す。なお、DOの定量下限値は0.5mg/Lであり、グラフ中においては、定量下限値未満の測定値を0.5mg/Lとして表現している。

全層循環前の状況にあたる2010年8月、12月の結果を見ると、水深の浅い部分のDOの値は異なるものの、共に水深100mから110mを境にDOの値が小さくなり、水深110m以深で無酸素状態になっていることが分かる。表層付近のDOの値が異なる理由については、水温と酸素の溶解度で説明することができる。2010年8月の表層水温は28.7℃、12月の表層水温は17.4℃であった。それぞれの水温における酸素の溶解度からDOを算出すると、6.9mg/Lと8.8mg/Lであった。実測値は計算値と比較し

て、多少過飽和の傾向はあるものの、水温に起因する酸素溶解度差が、実測のDOの差に対応していることが分かる。なお、酸素の溶解度は、理科年表<sup>9)</sup>の気体の水に対する溶解度で示されている値をもとに算出した。

次に、循環途中に相当すると考えられる2011年2月2日の結果を見ると、表層から水深110m層までほぼ同じ水準のDOになっていることが分かる。このことは、表層から水深110m層までの湖水が混合したことを意味している。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DOになっていることが見て取れる。これらのことは、全層循環が突如発生するのではなく、湖水の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を示唆している。

2011年2月に発生した湖水の循環が水深200m以深まで及んでいたかを確認するために、2011年8月に環境システム社製の多項目水質計 (DS5x) を用い、DOの鉛直分布を測定した。その結果を図5に示す。

2011年2月から半年が経過していたため、底層部のDOは一部消費されていたが、水深200m以深においても無酸素状態を脱していることが見て取れる。このことは、2011年2月の湖水の循環が全層にわたり発生していることを裏付けている。また、図4の結果から、いずれの層のDOも飽和に達していなかったことから、今回発生した循環の形態は、不完全全循環であったことが分かった。

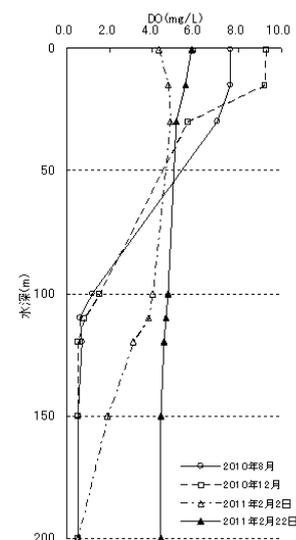


図4 2010年度のDO鉛直分布

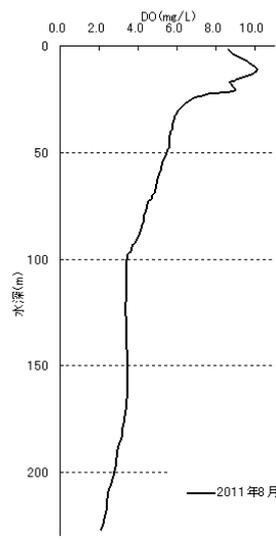


図5 2011年8月におけるDOの鉛直分布

の鉛直分布を示す。なお、T-Pの定量下限値は0.003mg/Lであり、グラフ中においては、定量下限値未満を0.003mg/Lとして表現している。

全層循環前 (2010年8月, 12月) の結果に着目すると、いずれも水深100m層までT-P濃度は同じ水準であり、その後深度が増すにつれてT-P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2011年2月2日の結果を見ると、表層から水深110m層までのT-P濃度は同じ水準であるが、その値は循環前のT-P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T-P濃度が上昇していた。

全層循環後の状況である2011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T-P濃度が同じ水準になっていた。

T-Pとして測定されたりんが、どのような形態のりんとして存在しているのかを調べるために、 $PO_4\text{-P}$ について分析を行った。図7に2010年12月の、図8に2011年2月2日の、図9に2011年2月22日の $PO_4\text{-P}$ の鉛直分布をそれぞれ示す。また、グラフにはT-Pの結果も併せて載せている。なお、 $PO_4\text{-P}$ の定量下限値は0.003mg/Lであり、グラフ中においては、定量下限値未満を0.003mg/Lとして表現している。

図7より、水深110m以深において上昇しているT-Pのほとんどが $PO_4\text{-P}$ の形態で存在していることが分かった。底層と比較し、表層の $PO_4\text{-P}$ 及びT-P濃度は高くないことや、水深110m層は、DOがなくなり無酸素状態になる境界であることから、全層循環の前の状況においては底層からりんが $PO_4\text{-P}$ の状態 で溶出していたと考えることができる。

図8より、全層循環前と大きく変化のなかったT-P濃度であるが、水深150m層以深において、組成に変化が起こったことが分かった。全層循環前の状況においては、T-Pの大半が $PO_4\text{-P}$ の形態で存在していたが、2011年2月2日には、T-Pに占める $PO_4\text{-P}$ の割合が少なくなっていた。

図9より、全層循環後の状況においては、T-Pとして測定されるりんのうち、 $PO_4\text{-P}$ として存在するりんは、ほとんどなくなっていた。

全層循環に伴う、りんの挙動については、DOと鉄の挙動と結びつけることで説明できる。全層循環前の状況において、底層は無酸素状態にある。このとき、鉄は2価の鉄イオンとして水中に存在している。この2価の鉄イオンとりん酸は相互作用することなく、それぞれの状態で水中に存在していた。全層循環の発生に伴い、底層にまで酸素が供給されたため、2価の鉄イオンは酸化さ

### 2. 2. 3 T-P及び $PO_4\text{-P}$ について

図6に、2010年8月, 12月, 2011年2月2日, 2月22日のT-P

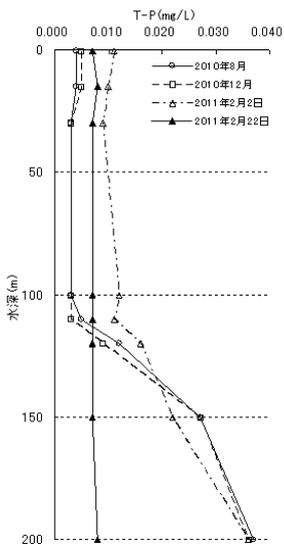


図6 2010年度のT-Pの鉛直分布

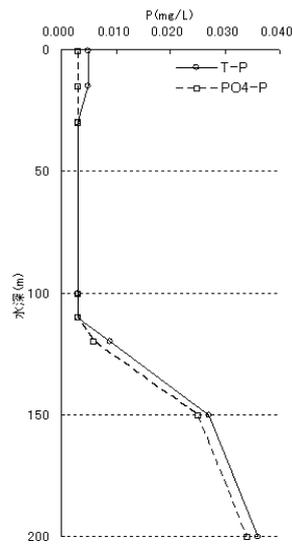


図7 2010年12月におけるPO<sub>4</sub>-P及びT-Pの鉛直分布

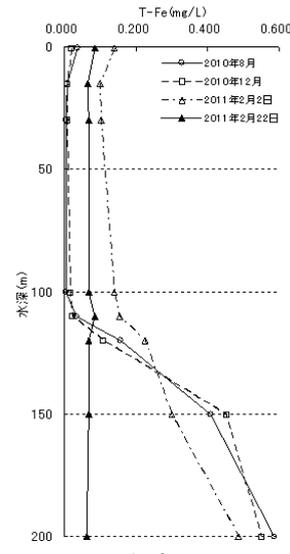


図10 2010年度のT-Feの鉛直分布

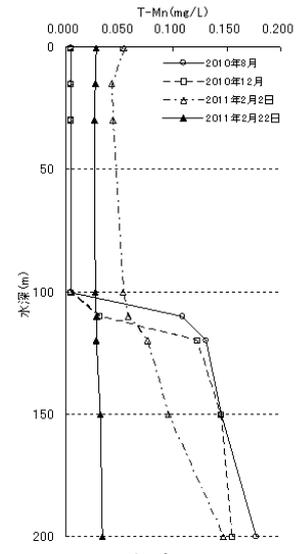


図11 2010年度のT-Mnの鉛直分布

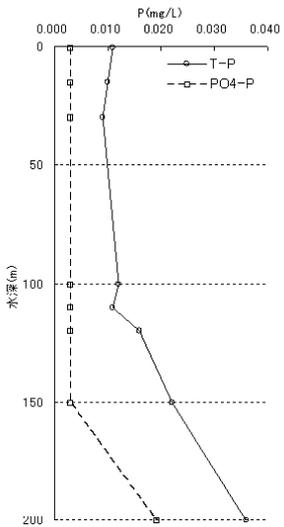


図8 2011年2月2日におけるPO<sub>4</sub>-P及びT-Pの鉛直分布

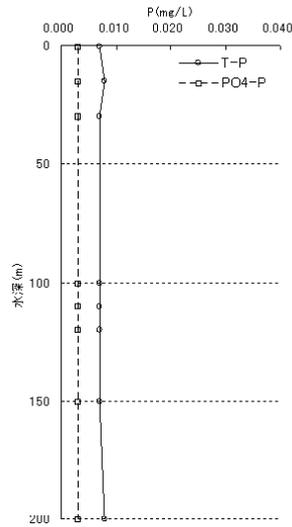


図9 2011年2月22日におけるPO<sub>4</sub>-P及びT-Pの鉛直分布

れ、3価の鉄イオンへと変化したと考えられる。3価の鉄イオンは、豊富に存在する水と反応し、水酸化鉄のコロイドが生成される。この水酸化鉄はりん酸イオンを取り込み凝集する。その結果、りんは鉄と共に湖底へと沈み、水中のT-P濃度は減少したと考えることができる。

#### 2. 2. 4 T-Fe及びT-Mnについて

2010年8月、12月、2011年2月2日、2月22日のT-Feの鉛直分布を図10に、T-Mnの鉛直分布を図11にそれぞれ示す。なお、T-Fe、T-Mnの定量下限値はそれぞれ0.005mg/Lであり、グラフ中においては、定量下限値未満を0.005mg/Lとして表現している。

T-Feの鉛直分布（図10）を見ると、T-Pの鉛直分布（図6）と同じ挙動を示していることが分かる。全層循環前（2010年8月、12月）の結果に着目すると、りと同様、無酸素状態において、底泥から鉄が溶出していると考えられる。このとき、鉄は2価の鉄イオンとして溶出すると考えられる。全層循環の発生後、底層にまで酸素が供給されたことにより、2価の鉄イオンから3価の鉄イオンに酸化されたと考えられる。3価の鉄イオンは水酸化鉄として湖底に沈殿し、水中で観測されるT-Fe濃度は減少したと考えられる。

T-Mnの鉛直分布（図11）を見ると、T-Feの鉛直分布（図10）とほぼ同じ挙動を示していることが分かる。ただ、全層循環前（2010年8月、12月）のそれぞれの物質の濃度が上昇し始める深度が異なることが分かる。このことは、酸化還元電位の差を反映していると考えられる。マンガン及び鉄の標準酸化還元電位は下式のとおりである<sup>7)</sup>。



マンガンは鉄に比べ、標準酸化還元電位が大きいので、DOが低下し、湖水が還元状態に移行する中で、より酸化状態に近い領域でも存在できると考えられる。その結果、マンガンは水深100m付近から存在できたといえる。

#### 2. 2. 5 T-N及び各態窒素について

図12に、2010年8月、12月、2011年2月2日、2月22日のT-Nの鉛直分布を示す。

全層循環前（2010年8月，12月）の結果に着目すると，水深30m付近にT-Nのピークがあることが見て取れる。その後深度が増すにつれて，T-N濃度は減少し，水深110m付近に大きなくぼみが見られる。更に深度が増すと今度はT-N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2011年2月2日の結果を見ると，水深30m付近のT-Nのピークは確認できるものの，水深110m付近のくぼみ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2011年2月22日の結果を見ると，水深30m付近のT-Nのピークも，水深110m付近のくぼみも消失し，表層から底層に至るまで全層にわたりT-N濃度が同じ水準になっていた。

T-Nとして測定された窒素がどのような形態の窒素として存在しているのかを調べるために， $\text{NO}_3\text{-N}$ ， $\text{NO}_2\text{-N}$ ， $\text{NH}_4\text{-N}$ についてそれぞれ分析した。図13に2010年12月の，図14に2011年2月2日の，図15に2011年2月22日の各態窒素の鉛直分布をそれぞれ示す。また，グラフにはT-Nの結果も併せて載せている。なお， $\text{NO}_2\text{-N}$ の定量下限値は $0.002\text{mg/L}$ であり，グラフ中においては，定量下限値未満を $0.002\text{mg/L}$ として表現している。

図13より，表層から水深110mまでは $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が多く，水深110m以深では， $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が多くなっていることが分かる。水深110m以浅では，降雨等による $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給や，生物由来の窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ や $\text{NH}_4\text{-N}$ ）が硝化細菌の働きにより酸化され $\text{NO}_3\text{-N}$ になるため， $\text{NO}_3\text{-N}$ がより多く存在すると考えられる。一方で，水深110m以深では無酸素状態であるため，底泥から $\text{NH}_4\text{-N}$ が溶出したと考えられる。

また，T-Nのくぼみがある水深110m付近においては， $\text{NO}_3\text{-N}$ ， $\text{NO}_2\text{-N}$ ， $\text{NH}_4\text{-N}$ のそれぞれの濃度が低くなっていることが分かった。この現象は，脱窒細菌の働きにより， $\text{NO}_3\text{-N}$ から分子状窒素が生成する脱窒，あるいはアナモックス細菌により， $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ から分子状窒素が生成するアナモックス反応<sup>9)</sup>であると考えられる。水中の窒素が分子状窒素となり，気相中へ揮散することによりT-N濃度の顕著な減少が見られたと考えられる。ただし，水深110mで起こっている反応が，通常の脱窒であるかアナモックス反応であるかを判断するためには，脱窒細菌やアナモックス細菌の存在を確認する必要がある。

図14より，水深30m付近にあるT-Nのピークは，循環前の状況（図13）と比べ，その組成が大きく変化したことが分かる。水深110m以浅において， $\text{NO}_3\text{-N}$ の一部が $\text{NH}_4\text{-N}$ に置き換わっていることが見て取れる。また，

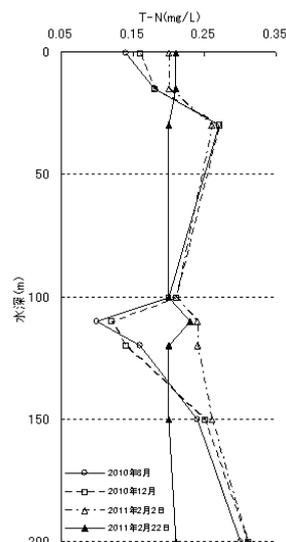


図12 2010年度のT-Nの鉛直分布

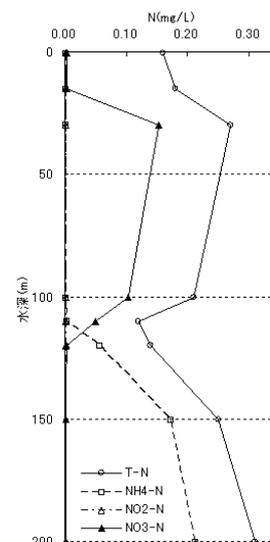


図13 2010年12月における各態窒素及びT-Nの鉛直分布

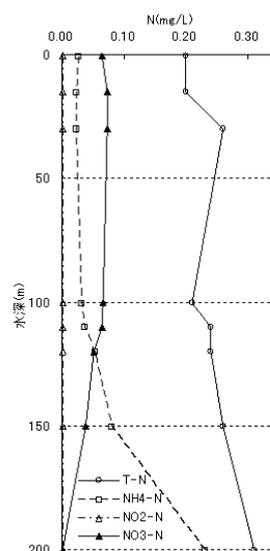


図14 2011年2月2日における各態窒素及びT-Nの鉛直分布

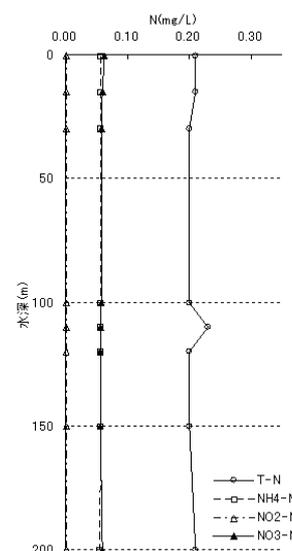


図15 2011年2月22日における各態窒素及びT-Nの鉛直分布

$\text{NO}_3\text{-N}$ が水深150m付近まで存在していることも見て取れる。

図15より，表層から底層にわたり，各態窒素濃度はそれぞれ同じ水準になっていることが分かった。

### 3 全層循環が発生した気象的要因について

#### 3.1 解析方法

気象庁のホームページ<sup>9)</sup>で公開されている気象データを用いて，全層循環が発生する気象的要因について解析を行った。

解析対象地点は鹿児島県指宿市にあるアメダス指宿観測所とした。解析対象項目としては，気温，最多風向，

平均風速を設定した。また、解析対象期間は1978年1月から2012年3月とした。

### 3. 2 解析結果と考察

#### 3. 2. 1 全層循環成立時と不成立時の気温と風配図の比較

全層循環と関連のある気象的要因を抽出するために、2010年11月から2011年2月（全層循環成立時）と2009年11月から2010年2月（全層循環不成立時）の日平均気温と風配図の比較を行った。日平均気温の結果については図16に、風配図の結果については図17に示す。なお、日平均気温について、2009年12月22日から29日については欠測であった。また、風配図には頻度だけではなく、風の強さも取り入れるため、日平均風速（m/s）を日最大風向で積算した値を用いた。

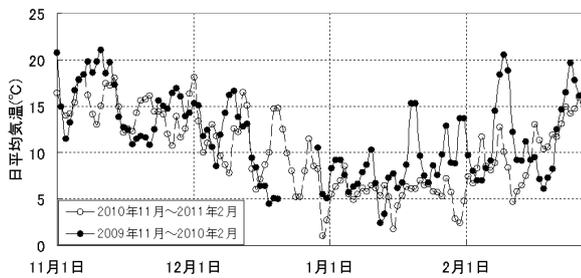


図16 全層循環成立時と全層循環不成立時の日平均気温の推移

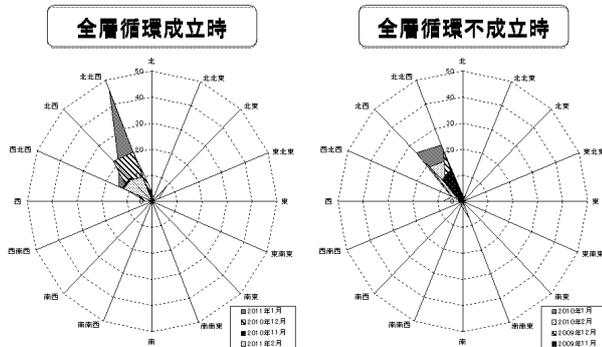


図17 全層循環成立時と全層循環不成立時の風配図

図16より、全層循環成立時は全層循環不成立時と比べ、1月の日平均気温がより低い傾向にあった。このことから、全層循環の発生に1月の気温が影響していることが示唆された。これは、12月から2月の平均気温と湖水循環の間に一定の関係が見られるという清原の考察<sup>10)</sup>と一部符合している。

図17より、全層循環成立時は全層循環不成立時と比べ、より北北西の方角に偏った風が吹いていたことが分かった。また、その傾向は1月に顕著に表れていた。このことは、1月に、ある方向に偏った風が吹くことが、全層

循環の発生要因となることを示唆している。

#### 3. 2. 2 循環と気温の関係について

図18に1978年1月から2012年3月までの基準点2、水深100m層及び200m層のDOの推移を示す。なお、DOの定量下限値は0.5mg/Lであり、グラフ中においては、定量下限値未満の測定値を0.5mg/Lとして表現している。

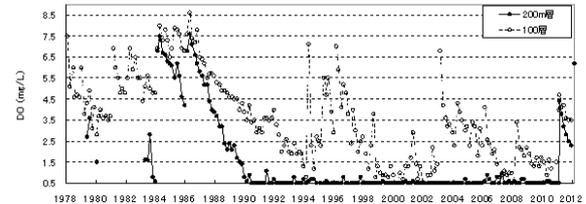


図18 基準点2における水深100m層と200m層のDOの推移

水深100m層と200m層のDOが共に回復した場合を全層循環と仮定すると、1984年、1986年、2011年、2012年に全層循環が発生していることが分かる。

全層循環の発生と気温の関係を調べるために、各年1月の日平均気温から水深100m層と200m層の湖水温度を差し引いた指標である、日平均温度差（下式）を導入した。

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

なお、水深100m層と200m層の湖水温度については、年間を通じて変化が小さいことから、12月と2月の平均値を1月の湖水温度とした。また、日平均温度差は、湖面の冷却を推し量ることを想定しており、水深100m層あるいは200m層まで到達できるポテンシャルを有する表層水塊の生成具合を反映していると考えている。

日平均温度差の計算結果を図19に示す。

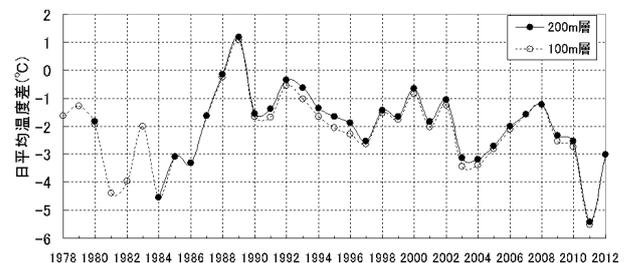


図19 1月における日平均温度差の推移

図19において、全層循環が発生した1984年、1986年、2011年、2012年に着目すると、1984年と2011年で日平均温度差が-4℃以下と顕著に低くなっていることが分かる。これらの年は、底層が無酸素状態になった後の最初の全層循環が起こった年である。一方で、1986年と2012

年は-3℃程度で全層循環が発生している。これは、前者が長年かけて塩類の溶出等により化学的に成層し、密度勾配の大きな湖水を循環させるのに対し、後者は化学的な成層がない、あるいは弱く密度勾配が小さく、循環しやすい状況にあったためだと推察できる。

日平均温度差が-4℃を下回る年を確認すると、1981年もまた、全層循環したと推察される。しかし、Satoh<sup>11)</sup>によると、1981年の循環は水深140mまでしか到達しない部分循環であったという。このことから、日平均温度差だけでは、全層循環の発生を説明できなかった。

### 3. 2. 3 循環と風向の関係について

全層循環の発生と風向の関係を調べるために、北、北北西、北西、西北西、西の5方位について、各年1月の日平均風速の和を求めDOの変化と比較した。それぞれの結果を図20に示す。

図20より、北北西の日平均風速和の変化とDOの変化が対応していることが見て取れる。全層循環が発生したと考えられる1984年と2011年の日平均風速和は、他の年と比べ40m/s以上と、特に大きいことが分かる。一方で、1995年など日平均風速和が大きくても循環が発生しない場合も多々ある。このことは、全層循環と風向の間に関連はあるものの、風向は全層循環の支配的な要因ではないことを示唆している。

### 3. 2. 4 全層循環が発生した気象条件について

前節までの解析により、底層が無酸素状態になった後の最初の全層循環の発生には、共に1月の日平均温度差と北北西の日平均風速和が関連していることが分かった。日平均温度差では1984年と2011年に発生した全層循環について説明できたものの、1981年に全層循環が発生しなかった理由を説明することができなかった。一方、北北西の日平均風速和では、日平均温度差と同様、2回の全層循環が発生したことは説明できたものの、1995年に全層循環が発生しなかった理由を説明できなかった。

そこで、新たな指標として、日平均温度差と北北西の日平均風速和の積（以下「日平均温度差風速和積」という。）を導入する。これは、底層まで到達できるポテンシャルを有する表層水塊の生成具合（日平均温度差）と循環の駆動力（北北西の日平均風速和）の二項の要因が重なった場合にのみ、全層循環が発生するという考えに起因する。日平均温度差風速和積の計算結果を図21に示す。

図21において、1984年と2011年に着目すると、どちらの年も日平均温度差風速和積が-246℃・m/s以下であった。一方で、1981年と1995年に着目すると、どちらの年も日平均温度差風速和積が-246℃・m/sには及んでおらず、全層循環の成立と不成立を明確に区別することができている。このように、日平均温度差風速和積は、全層循環発生の成立、不成立を判断し得る指標であると考えられる。

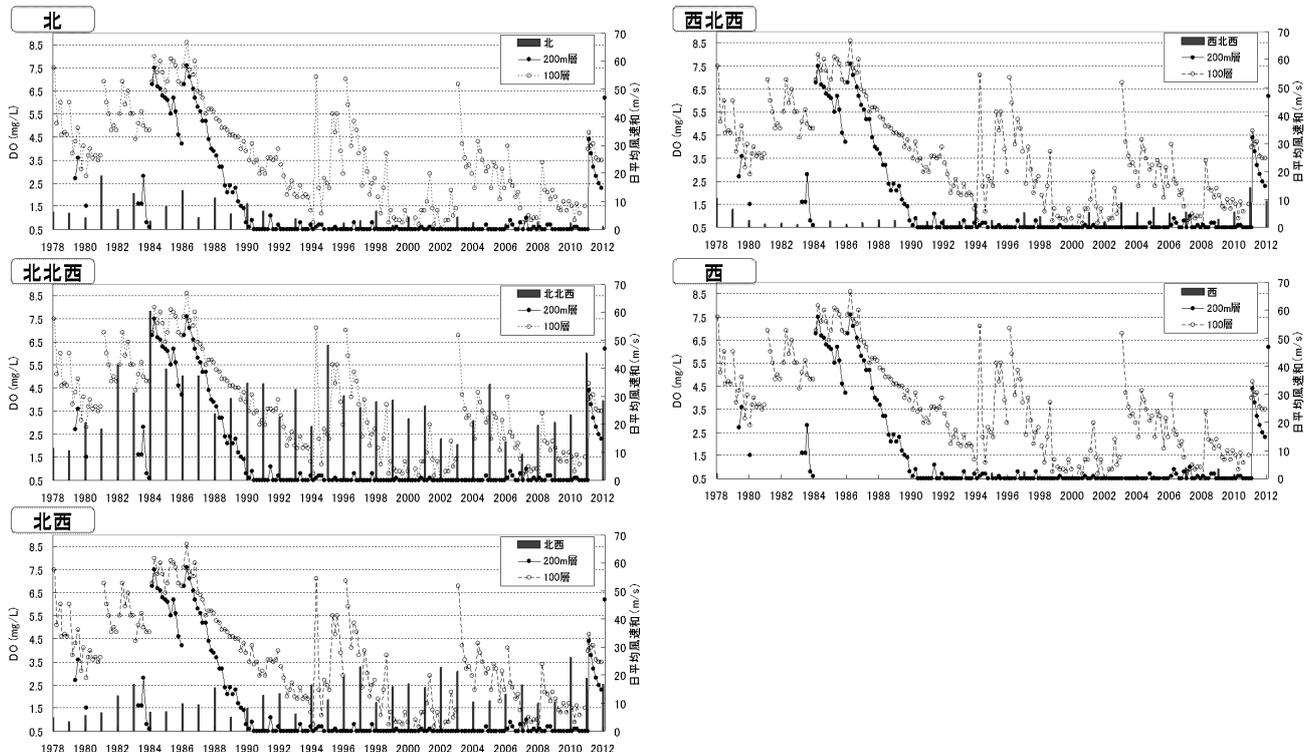


図20 各方位におけるDOと日平均風速和の推移

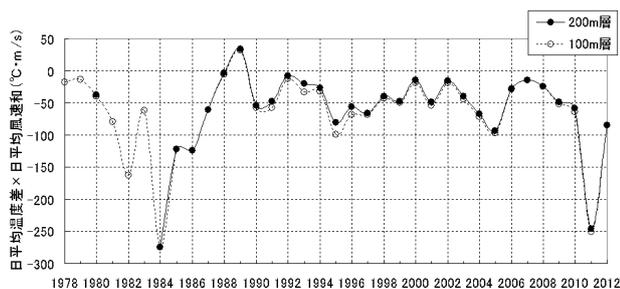


図21 1月における日平均温度差×  
北北西の日平均風速和の推移

また、水深200m層のDOのデータはないものの、水深100m層の日平均温度差風速和積が $-163^{\circ}\text{C}\cdot\text{m/s}$ と小さい1982年は、全層循環が発生していない<sup>12)</sup>と考えられる。このことを併せると、日平均温度差風速和積が $-163$ から $-246^{\circ}\text{C}\cdot\text{m/s}$ の間に閾値が存在すると考えられる。

よって、2011年は日平均温度差風速和積の閾値を下回る、気温及び風が発生していたため全層循環が発生したといえる。

#### 4 まとめ

2011年2月、池田湖において25年ぶりに全層循環が発生した。本報では、溶存酸素と栄養塩類の挙動に着目し、全層循環前後の水質の変化について調査するとともに、全層循環が発生した気象的要因について解析を行った。

DOについて、全層循環前の状況下では水深100mから110mを境に無酸素状態になっていた。また、循環は浅い層から徐々に深い層に到達し、全層循環が起こったことが示唆された。

T-P及び $\text{PO}_4\text{-P}$ について、全層循環前の状況下では、りんが底泥より溶出していたことが示唆された。全層循環発生による、りんの挙動については、DOと鉄の挙動と併せて考えることで説明できた。

T-Fe及びT-Mnについて、両者の挙動はりんの挙動と同じであった。

T-N及び各態窒素について、全層循環前の状況下では水深110m以浅で硝化、水深110mで脱窒、水深110m以深で $\text{NH}_4\text{-N}$ が底泥より溶出していることが示唆された。全層循環の発生に伴い、これらの反応は見られなくなった。

全層循環成立時と不成立時の気温と風配図の比較を行うことで、1月の気温と風が全層循環の発生の要因になることが示唆された。

2011年は、1月の気温と湖水温の日平均温度差と北北西の日平均風速和の積が閾値 ( $-163$ から $-246^{\circ}\text{C}\cdot\text{m/s}$ の間に存在する。)を下回る、気温及び風が発生していた

ため全層循環が発生した。

#### 参考文献

- 1) 吉村信吉；南九州火山湖の冬季に於ける循環状態、海と空、17, 237～254 (1937)
- 2) 吉村信吉；湖沼学 (増補版), 192, 生産技術センター (1976)
- 3) 鹿児島県；第4期池田湖水質環境管理計画 (2011)
- 4) 稲本信隆, 奥江碩, 他；池田湖の富栄養化に関する調査研究—深層水質と湖水循環について—, 鹿児島県環境センター所報, 2, 141～157 (1986)
- 5) 平江多績, 坂元克行, 他；池田湖の周辺環境と水質, 鹿児島県環境センター所報, 13, 55～64 (1997)
- 6) 国立天文台；理科年表 (平成23年机上版), 509, 丸善 (2010)
- 7) R. A. Day, Jr. A. L. Underwood；定量分析化学 (改訂版), 490, 倍風館 (1982)
- 8) Mulder, A., Graff. A. A., 他；Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor, FEMS Microbiol. Ecology, 16, 177～184 (1995)
- 9) 気象庁；<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 10) 清原拓二, 實成隆志, 他；池田湖の水質変動に関する調査研究, 本誌, 8, 41～47 (2007)
- 11) Yoshinori Satoh；A Study on Thermal Regime of Lake Ikeda, Science Reports of the Institute of Geoscience University of Tsukuba, A7, 55～93 (1986)
- 12) 佐藤芳徳；湖水の循環と混合, 日本水文化学会誌, 4, 201～208 (2007)

## Studies on the Physical Mixing of Surface and Deep Waters in Lake Ikeda

Yuichi OTSUJI, Katsuyuki SAKAMOTO, Hiroshi KIJIMA, Rio NAGAI

Yoko MIYANOHARA, Kazufumi NAGAI

( Kagoshima Prefectural Institute for Environmental Research and Public Health  
18, Jonan-cho, Kagoshima-shi, 892-0835, JAPAN )

### Abstract

In February 2011, the physical mixing of surface and deep waters occurred in Lake Ikeda for the first time in 25 years. We measured water quality changes before and after circulation and the mixing of lake water. And, we analyzed about the meteorological condition that mixture produced. The summary of results is shown below.

- (1) Under the condition of before circulation and mixing of lake water, there was anoxic water in depths of over 110m.
- (2) Under the condition of before circulation and mixing of lake water, it was suggested that the phosphorus elute from bottom of a lake. The behavior of phosphorus is explainable in terms of the behavior of dissolved oxygen and iron.
- (3) Under the condition of before circulation and mixing of lake water, it was suggested that the iron and manganese leak out of bottom of a lake.
- (4) Under the condition of before circulation and mixing of lake water, it was suggested that the nitrification reaction was happening with a water depth lower than 110m. And, the denitrification reaction was happening with a water depth at 110m. In addition it was suggested that the nitrogen leak out of bottom of a lake.
- (5) We compared temperature and wind rose in the fiscal year 2009 versus the fiscal year 2010. These results suggested that the temperature and wind for January exert a decisive influence on circulation and mixing of lake water. The physical mixing of surface and deep waters occurred in 2011. Because the product of the daily mean difference in temperatures between air and water temperature, and the sum of daily mean wind speed which came from north-northwest was lower than threshold which is at least -246 but no more than -163 deg C · m/s.

**Key Words** : Lake Ikeda, circulation, mixing, lake water, dissolved oxygen, phosphorus, nitrogen, iron, manganese, meteorological condition