

ノート

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

坂本 洋 西中須 暁子 切通 淳一郎¹
瀬戸 加奈子² 鳥原 誠 泊 宣和
大淵脇 久治 宮田 義彦

要 旨

池田湖は最大水深233mを有する深い湖であるが、近年、湖底の溶存酸素が消失してほぼ無酸素状態が続いたため、底泥からの栄養塩類の溶出が顕在化し、全層循環が生じた場合の水質の悪化が懸念されていた。

2006年冬季、100m層以深に及ぶ鉛直循環が生じ、底層における栄養塩類の濃度は無酸素状態が生じる以前の濃度レベル以下に急激に減少した。このとき、底層の鉄、リン濃度は共に定量限界に近い値にまで減少しており、これは湖水循環により底層への溶存酸素の供給が行われ鉄の酸化・沈殿が生じ、これにリンが吸着し共沈したことによると考えられた。一方、無酸素状態時に底層に蓄積されたリン及び窒素は許容汚濁負荷量¹⁾のそれぞれ17%、13%に達したと推計された。

キーワード：溶存酸素、無酸素状態、底泥からの溶出、鉛直循環、共沈、鉄、リン

1 はじめに

池田湖は、湖面積10.95km²、周囲15.1km、最大水深233mの約5000年前にできたカルデラ湖である。

池田湖の透明度は昭和初期の記録では26.8mであったが、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¹⁾。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てきており、現在、第3期管理計画¹⁾が策定、実施されている。

近年、池田湖の水質はCOD（化学的酸素要求量）について水質環境保全目標を維持達成している。一方、湖水底層特に200m層では1990年以降ほぼ無酸素の状態が継続したため、CODや栄養塩類の濃度上昇が顕在化していた。しかしながら、2006年初めにこれに大きな変化が生じた。

本報では、これまでの水質常時監視結果をもとに、池田湖底層における栄養塩類の挙動及び2006年に生じた水

質変動について考察した結果を報告する。

2 調査方法

2.1 調査地点及び調査時期

調査地点を図1に示す。環境基準点（3地点）、その他監視点（3地点）の計6地点において継続的な調査を実施している。

湖心に位置する基準点2では鉛直方向5層（0.5m、1.5m、30m、100m、200m）において採水を実施した。

調査は、年6回偶数月に実施した。

2.2 調査項目

pH、DO（溶存酸素濃度）、COD、SS（浮遊物質量）、大腸菌群数、T-N（全窒素）、T-P（全リン）、NH₄-N（アンモニア態窒素）、NO₂-N（亜硝酸態窒素）、NO₃-N（硝酸態窒素）、PO₄-P（リン酸態リン）、クロロフィル、Fe（鉄）、Mn（マンガン）

鹿児島県環境保健センター 〒892-0835 鹿児島市城南町18番地

1 鹿児島県林務水産部水産振興課 〒890-8577 鹿児島市鴨池新町10番1号

2 鹿児島県熊毛支庁屋久島事務所 〒891-4311 熊毛郡屋久町安房650

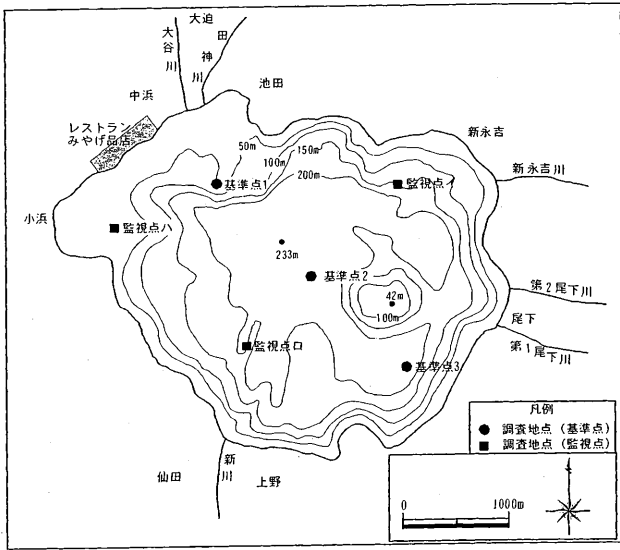


図1 調査地点

3 結果及び考察

3.1 水質の長期的変動

3.1.1 DO及び水温の推移

基準点2におけるDOの推移を図2に示した。

30m層では春から秋にかけて減少し冬季に回復するという季節変動が明瞭である。

また、100m層では季節変動は見られず、不規則な濃度の増減を繰り返している。DOが上昇した1996年及び2003年2月における100m層と30m層の水温の差は、それぞれ0.1℃、0℃とほぼなくなっており、上層との混合が推測される(図3)。

200m層では1986年初めにDOが上昇した後は減少が続き、1990年以降はほぼ無酸素状態が続いている。

これらのことから、冬季の表層の温度低下による鉛直方向の循環は、100m以深の深層部までは及びにくいいため、1990年以降200m層で無酸素状態が継続したと考えられる。

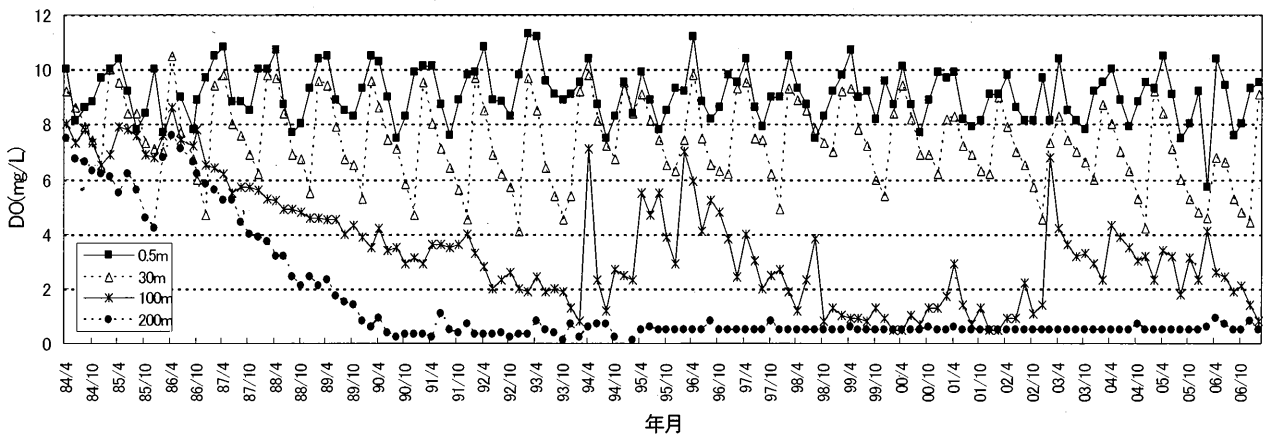


図2 DOの推移(基準点2)

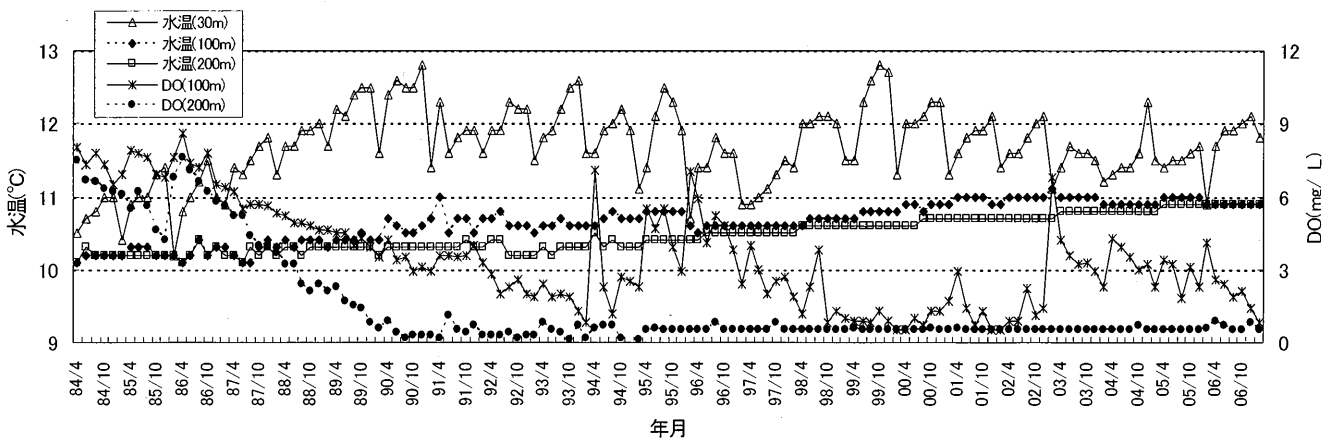


図3 DOと水温の推移(基準点2)

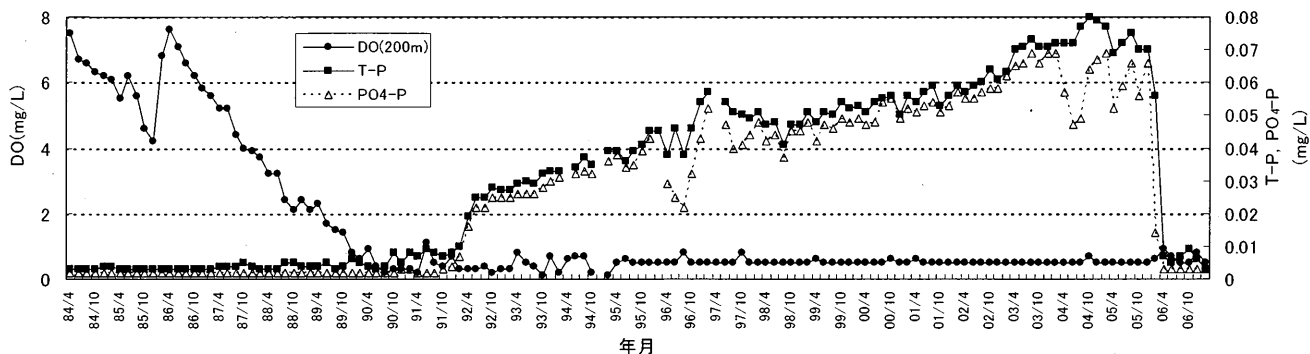


図4 200m層におけるDO, T-P及びPO₄-Pの推移 (基準点2)

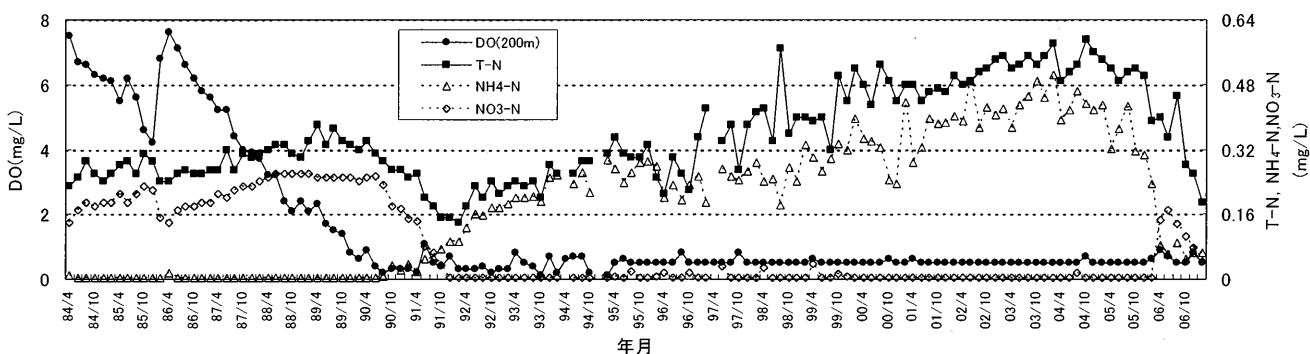


図5 200m層におけるDO, T-N, NH₄-N及びNO₃-Nの推移 (基準点2)

3. 1. 2 リン及び窒素濃度の推移

200m層では、ほぼ無酸素状態になった1990年以降から2005年にかけてT-N及びT-P濃度は著しく上昇した(図4, 図5)。

リンについては、200m層にDOが存在する1990年以前は定量下限値(0.003mg/L)に近い濃度であったが、無酸素状態になってからはT-P濃度は著しい上昇傾向を示した。T-PのほとんどがPO₄-Pとして存在している。

窒素については、200m層にDOが存在する間はNO₃-NのT-Nに占める割合が最も高かったが、DOの減少とともにNO₃-Nは減少しほぼ消失している。これに対しNH₄-N濃度は上昇傾向を示し、T-Nに占める割合が最も高くなっている。

200m層におけるリン及び窒素の濃度推移から、DOが消費され嫌気状態になった1990年以降、底泥からリン、窒素の溶出が継続していたことがわかる。

3. 2 2006年に生じた水質の変化

3. 2. 1 DO及び水温の変化

2006年2月の水温は表層が11.6℃、その他の層はいずれも10.9℃であった。30, 100, 200m層の水温が一緒になったのは1986年2月以来のことである(図6)。

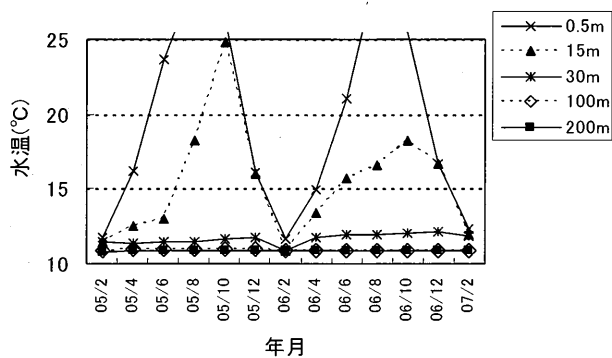


図6 水温の経月変化 (基準点2)

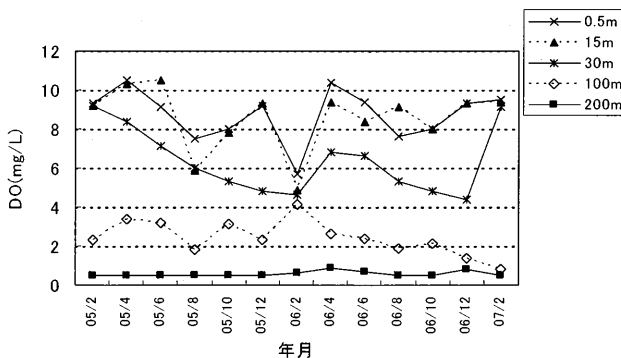


図7 DOの経月変化 (基準点2)

このときのDOは200m層を除きほぼ同じレベルを示しており、100m層以深に及ぶ鉛直循環が生じたと推測される。また、DOは200m層においても2月から4月にかけて若干濃度が上昇した(図7)。

3. 2. 2 リン濃度の変化

図8に200m層におけるT-P及びPO₄-P濃度の経月変化を示す。

PO₄-P濃度は2006年2月に以前の約5分の1に相当するレベルまで大きく減少し、その後4月には定量限界0.003mg/L未達となった。約16年間に及ぶ無酸素状態で底層に蓄積されたPO₄-Pはわずか4ヶ月で定量下限値未達まで減少した。

T-P濃度は2006年4月に以前の約10分の1のレベルまで著しく減少した。これは全層循環が生じたとされる1986年以前の濃度レベルと同じである。

なお、PO₄-P濃度が2月に大きく減少したのに対し、T-P濃度は4月に大きく減少し、時間差が生じている。このプロセスには3. 2. 4で詳述する鉄の存在が関係していると考えられる。つまり、このとき鉄が酸化されPO₄-Pはこれに取り込まれて共沈する過程で2月時点ではT-Pとして測定されたが、4月時点では大部分が沈降したため、T-P、PO₄-Pとも低濃度となったというプロセスである。

各層におけるT-P濃度の変化をみると2006年2月に200m層を除く全層で大きく濃度が上昇している。また、その濃度は下層ほど高いことから大規模鉛直循環による下層から上層への供給が示唆される(図9)。

3. 2. 3 窒素濃度の変化

図10に200m層におけるT-N、NH₄-N、NO₂-N及びNO₃-N濃度の経月変化を示す。

NO₃-Nは92年以降ほとんど検出されることはなかったが、2006年4月に0.144mg/L、6月に0.169mg/Lと濃度が大きく上昇した。これとは逆にそれまで約0.4mg/L程度あったNH₄-Nは0.082mg/L、0.061mg/Lと大きく減少した。NO₂-Nはこれまでほぼ定量下限値未達で推移していたが、4月に0.007mg/L、6月に0.010mg/Lと増加しその後減少した。

2006年2月の大規模鉛直循環によりT-Nは0.51mg/Lから0.40mg/Lと78%に希釈されたが、これに従ってNH₄-Nも同様に希釈されたとすると0.27mg/Lになる。しかし、同年4～8月の平均濃度は0.078mg/Lで、NH₄-Nの循環以外で生じた正味の減少量は0.19mg/Lと見積もられる。これに対してNO₃-Nの濃度は実際0.15mg/L増加した。こ

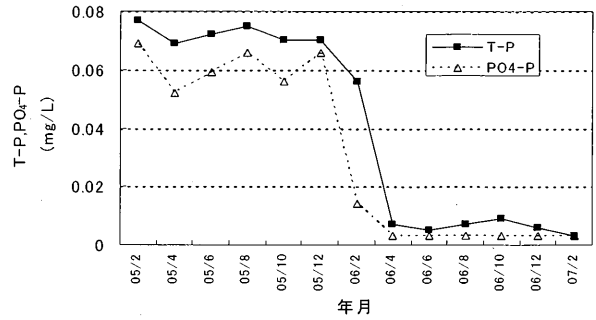


図8 200m層におけるT-P及びPO₄-Pの経月変化 (基準点2)

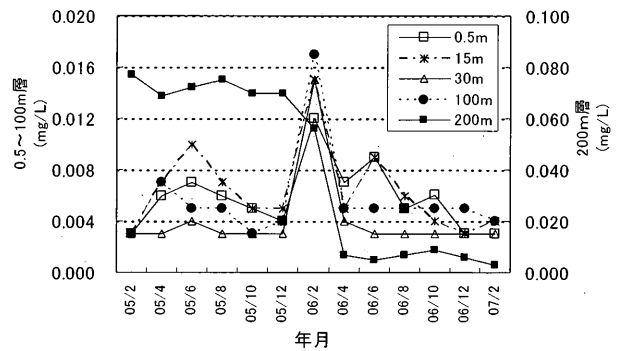


図9 各層におけるT-Pの経月変化 (基準点2) (200m層の濃度は右軸のスケールで示す。)

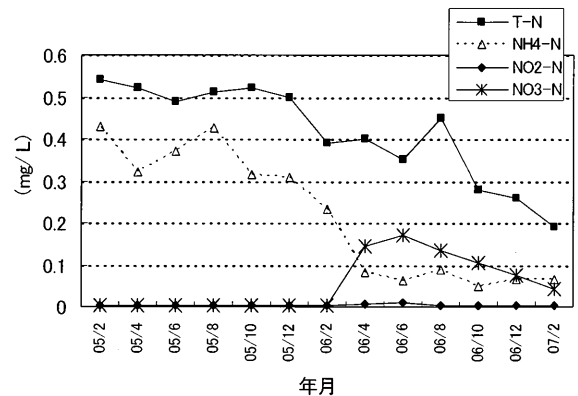


図10 200m層における窒素濃度の経月変化 (基準点2)

のことから、200m層までDOが供給されたことにより、NH₄-Nは酸化されNO₂-Nを経てNO₃-Nが生じたと考えられる。しかしながら、上層からのDOの供給は継続しなかったため、NO₃-Nは2006年6月をピークとしその後減少した。

2007年2月時点で、200m層のDOは1990年以前と比較して十分に回復したとは言えないため、NH₄-Nは一定レ

ベルの濃度を保持しており、NO₃-Nは低い濃度レベルにある。

また、200m層のT-NはT-Pほど急激ではないが減少し、2007年2月時点では1986年以前の濃度レベル以下となっている。

各層におけるT-Nの濃度変化をみると2006年2月に200m層を除く全層で0.25~0.26mg/Lとほぼ同じ濃度になっており、少なくとも100m層以深に及ぶ鉛直循環が生じたと考えられる(図11)。

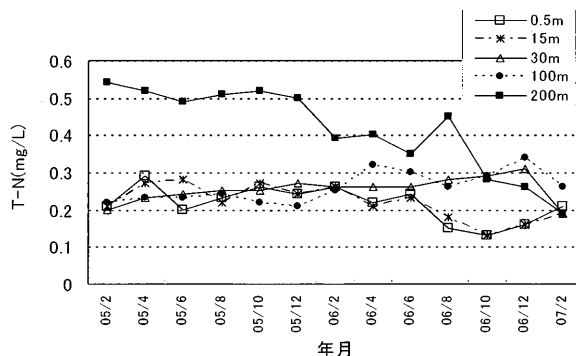


図11 各層における全窒素濃度の経月変化(基準点2)

3. 2. 4 鉄及びマンガン濃度の変化

100, 200m層における鉄及びマンガン濃度の経月変化を図12に示す。

100m層における鉄及びマンガンの濃度は2006年6月以降測定しているが、これらは200m層と比較しいずれも定量下限値に近い低濃度で推移している。200m層における鉄濃度は2006年2月の大規模鉛直循環に伴って一旦1.0mg/Lと高い濃度に上昇したが、6月には0.052mg/Lと急激に減少し、その後0.16mg/Lまで増大したが2006年12月~2007年2月にはピーク時の約20分の1に減少し安定している。これは還元的な環境下でFe²⁺として存在していたものがDO存在下で酸化されFe(OH)₃として沈殿したと考えられる。一方、マンガン濃度は2006年2月以降もやや上昇傾向を示しているが、これはマンガンの鉄の酸化還元電位の差から生じた現象と考えられる。鉄は酸化され沈殿となり沈降したが、マンガンは鉄と比較し酸化還元電位が高いため、Mn²⁺として溶存していると考えられる。

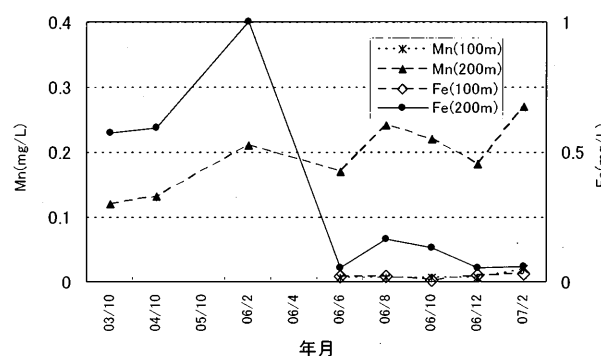


図12 鉄及びマンガン濃度の経月変化(基準点2)

次に、200m層における鉄、リン及びDO濃度の経月変化を図13に示す。湖底などの酸素のない還元的な環境では鉄はFe²⁺として、リンはPO₄³⁻として底泥から溶出するが、酸素が存在する酸化的環境ではFe²⁺は酸化されFe(OH)₃の沈殿となり、これにリンが吸着され沈降することが報告されている^{2,3)}。2006年2月のリン濃度は急減し、その後T-Pで見積もって10分の1の濃度になっている。この急激な変化も同じプロセスから説明できる。つまり、2005~2006年の冬季の気温の低下で湖水表面の温度が下がり、湖水の大規模鉛直循環は少なくとも100m層以深まで及んだ。その際、上層から200m層にもDOが供給され酸化的な環境となったため、Fe²⁺はFe(OH)₃の沈殿となり、これにPO₄³⁻が吸着され沈降したということであり、図13に示すリンと鉄濃度の挙動からもこのことが示唆される。

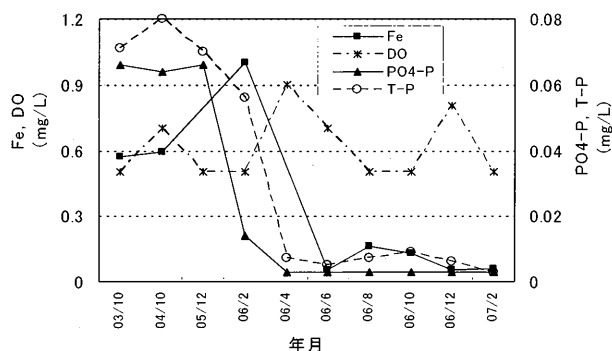


図13 200m層における鉄、リン、DOの経月変化(基準点2)

いてその存在比は1:0.23程度であり、リンに対し鉄は十分量存在するため、DOが十分であればリンは全量沈降することが予想される。実際、T-P濃度は2007年2月には定量下限値まで低下した。

3. 3 底層におけるリン及び窒素の蓄積量

1990年以降2006年2月にかけて約16年間に底層に蓄積された栄養塩類の量を試算した。

3価の鉄へのリンの吸着量について小林ら⁴⁾はそのモル比は0.41~0.46モルとしているが、200m層以深にお

200m層におけるT-P濃度はDOが存在した1990年以前は定量下限値未満で推移し蓄積されることはなかったが、それ以降においては無酸素状態が継続したため、底層に蓄積されるようになった。

過去の調査¹⁾において水深100m以浅のT-P濃度はそれ以深の濃度と比較し低濃度であり、100m以深から底層までほぼ直線的に濃度が上昇することがわかっている。底層に蓄積されたリンの量(以下「蓄積量」という。)を同調査で用いた方法(「各層濃度×各層容積」の和)に準じて推計すると約18.7tであった。これを無酸素状態だった日数(5700日)と嫌気状態だったと考えられる200m以深の湖底面積¹⁾で除して求めたT-Pの濃度上昇速度は1.1 mg/d・m²となった。この速度は1981年に池田湖底泥を用いて実験室で求めた溶出速度3.3 mg/d・m²⁵⁾とオーダーとしては一致した。

同様の手法で窒素についても推計を行った。底泥からの窒素の溶出について細見ら⁶⁾はほとんどがNH₄-Nの状態で溶出すると報告しており、また、図5からもこのことがうかがえる。底層に蓄積されたNH₄-Nの量をリンと同じ方法で推計すると約100tであり、その濃度上昇速度は5.8 mg/d・m²となった。先述の調査⁵⁾では6.7 mg/d・m²であり、ほぼ一致した値を示した。

第3期池田湖水質環境管理計画では水質環境保全目標を維持するための全リン及び全窒素の許容汚濁負荷量をそれぞれ18.8kg/d及び135kg/dと算出している。嫌気状態だった底層に蓄積された全リン及び全窒素の量を推計(蓄積量÷無酸素状態だった日数)するとそれぞれ3.29 kg/d, 17.6kg/dとなり、これは許容汚濁負荷量のそれぞれ17%, 13%に相当する。したがって、湖水循環が起こらない状態が続くと無酸素状態に近くなり、底泥からの溶出により窒素、リンについての汚濁負荷が増大し、さらに、この負荷量が許容汚濁負荷量の10%以上に達すると結論することができる。

4 まとめ

- 1) 底層では無酸素状態が約16年間続いたため、還元性の環境下でPO₄-P, NH₄-N濃度が大きく上昇した。
- 2) 200m層における全リン濃度は2006年冬季の鉛直循環により急激に減少し、全循環が生じたとされる1986年以前の濃度レベルにまで低減した。また、全窒素濃度は全リンほど急激に減少しなかったものの2007年2月には1986年以前の濃度レベルより低くなった。
- 3) 2006年2月以前の200m層での鉄及びマンガン濃度はそれ以浅の水深と比較し高濃度で存在しており、還

元状態の底泥からの溶出が考えられた。

- 4) 2006年冬季の鉛直循環により、鉄濃度は著しく減少した。これは、鉄イオンが酸化され沈殿となりリンと共沈したと考えられた。一方マンガン濃度はやや上昇傾向を示した。鉛直循環前の200m層以深での鉄とリンのモル比は約1 : 0.23であり、DOが十分あればリンは鉄と共沈し低い濃度レベルになると考えられる。
- 5) 嫌気状態での底層におけるリン及び窒素の蓄積量は推計で3.29kg/d, 17.6kg/dであり池田湖水質環境管理計画での許容汚濁負荷量のそれぞれ17%, 13%に相当した。

5 おわりに

池田湖底層において2006年冬季における鉛直循環でこれまで蓄積された窒素及びリンは大きく低減し、蓄積が始まる以前の濃度レベル又はそれ以下となった。

しかしながら、底層では溶存酸素が少ない状態が依然として続いているため、再び底泥からの溶出が起こる可能性は高い。

池田湖におけるプランクトン増殖の制限因子はリンであるため⁷⁾、無酸素状態で底泥から溶出し底層に蓄積したリンが、全循環の発生に伴い表層へ多量に供給されることによる水質悪化が懸念される。

このため、今後とも底層の栄養塩類等の挙動に着目した調査を継続することが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 鹿児島県；第3期池田湖水質環境管理計画(平成13年)
- 2) 細見正明, 須藤隆一；湖沼底泥からのリン溶出に関する研究, 水質汚濁研究, 2, 157~162 (1979)
- 3) 小林節子；湖沼底泥からのリンの溶出機構, 資料55号, 千葉県水質保全研究所 (1991)
- 4) 小林節子, 西村肇；底質からのリンの溶出におけるFe(II)とリン酸イオンの挙動, 水質汚濁研究, 11, 755~764 (1988)
- 5) 鹿児島県；湖沼水質管理指針策定調査(昭和57年)
- 6) 細見正明, 岡田光正, 他；陸水域の富栄養化防止に関する総合研究, 国立公害研究所研究報告, 第56号 (1984)
- 7) 高村典子；湖沼環境の変遷と保全に向けた展望, 国立環境研究所研究報告, 第153号 (2000)

Behavior of Nutrient Salts in Bottom Layer and Changes in Water Quality Accompanied with Circulation in Lake Ikeda

Hiroshi SAKAMOTO, Akiko NISHINAKASU, Jun-ichiro KIRIZUSHI

Kanako SETO, Makoto TORIHARA, Yoshikazu TOMARI

Hisaharu OOHUTIWAKI, Yoshihiko MIYATA

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

Abstract

Lake Ikeda is a deep lake that has 233m in maximum depth. Recently, the disappearance of the dissolved oxygen in the bottom the lake continued, and the concentration of the nutrient salts reached high concentration because of the dissolution of it from the lake sediments. It was concerned that the water quality deteriorated by the total circulation. However, the concentration has decreased rapidly because of the circulation in winter of 2006 and it reached the concentration level before 1990.

At the same time, the concentration of iron decreases considerably, too. It is thought that the precipitation of iron was caused because the dissolved oxygen had been supplied by the circulation, and phosphorus coprecipitated with it. It is estimated that the amount of accumulated phosphorus and nitrogen in the bottom of the lake in anoxic condition reached 17% , 13% of the allowable pollution load.

Key Words : dissolved oxygen, anoxic condition, dissolution, circulation, coprecipitation, iron, phosphorus