

原 著

池田湖の水質変動に関する調査研究

— 透明度, COD及び水温の長期的変動 —

清 原 拓 二 實 成 隆 志 吉 留 雅 仁
末 吉 恵 子 寶 未 俊 一 宮 田 義 彦

要 旨

1975～2006年の池田湖の透明度, CODおよび水温に係るデータを解析して, 透明度とCODの長期的な水質変動並びに表層から水深200mの深層までの水温変動と湖水の循環について検討した結果, 以下のことが判明した。

- (1) 1976～1995年は透明度の低下 (平均6.3m) に伴うCODの増加傾向がみられるが, その後1996～2006年は透明度の増減 (平均7.4m) に対し, CODは比較的小さい変動を示した。
- (2) 表層から下層までの水温の長期的変化を調べた結果, 1990年以降, 中層 (100m) から下層 (200m) において漸次上昇傾向を示し, この間の水温上昇は約0.7℃であった。
- (3) 表層 (～50m) の水温の変化を調べた結果, 躍層は10～25mの範囲で出現し季節的な変化がみられた。
- (4) 冬季 (2月) における水温分布は, ①全層が一様である, ②表層から中層にかけて温度が低下し, その下層に等温層を形成する, ③中層において温度が低下し, その上下層に等温層を形成するという3つのパターンに分類された。全層循環が発生したとされる年の水温分布はいずれも①のパターンを示した。②と③のパターンは, 冬季においても弱い成層が残っているため不完全循環が生じていることが示唆された。

キーワード: 池田湖, 熱帯湖, 水温, 成層, 躍層, 全層循環, 透明度

1 はじめに

池田湖は薩摩半島南部に位置し, 湖底面がすり鉢状の単純形状のカルデラ湖で, 湖面積10.95km², 周囲15.1km, 最大水深233mの九州最大の湖である。流入, 流出河川は少なく, 湖水の滞留時間は30年程度と推計¹⁾されている。1929年当時の調査で透明度は国内有数の26.8mが観測されたが, その後の社会活動の活発化に伴い水質の汚濁が進み, 1970年代に透明度は6m前後まで低下した²⁾ため, これまで主に富栄養化対策の観点から各種水質調査が実施されてきた^{2～4)}。また, 池田湖は南薩畑地かんがい事業によるダム湖としての機能を有しており, 1982年以降周辺3河川からの導水が開始され,

農業用水管理水位を一定水準 (標高62～66m) に保持するという管理がなされている⁵⁾。

一方, 池田湖は水温が常に4℃以上のいわゆる熱帯湖であり, 鉛直混合, 水収支, 放射量等気象要素などの観点から多くの基礎研究がなされ^{1, 6～9)}, いわゆる「温暖な1回循環湖」に分類されているが^{10, 11)}, 1986年以降下層まで及ぶ全層循環は発生していないとされている。この不完全循環により, 下層における溶存酸素 (DO) 濃度の漸次減少が顕在化し, その傾向は1990年以降ほぼ継続している状況にある⁴⁾ (図1)。

池田湖のような「温暖な1回循環湖」の場合, 冬季における表層の冷却に伴う鉛直循環によって年間の最低水

温が生成され¹²⁾，通常冬季に水温分布は全層一様となる。また，その後の成層期（春季から夏季）においても中層から下層（水深50～200m）の水温（11℃程度）は保存され，ほぼ安定している。しかしながら，琵琶湖では近年の暖冬の影響で冬季においても弱い成層が残ることによる水循環への影響が指摘されており¹²⁾，これに伴う物質循環や生態系への影響が懸念されている。このため池田湖についても，表層から下層における水質の長期的な変動と湖水循環と深く関係する水温の変動を把握することは非常に重要である。

池田湖は水深が深く，流入，流出河川の影響が小さく，形状もすり鉢状で単純であるほか，いわゆる熱帯湖であることなどを考慮すると，近年の気温の上昇による湖水循環への影響とこれに伴う表層から下層における水質の長期的変動を観測するのに適した湖であるといえる。

本報告では，1975～2006年度に鹿児島県が調査した池田湖の透明度，CODおよび水温に係るデータを解析して，透明度とCOD（表層）の長期的な水質変動を考察するとともに，表層から下層（水深200m）までの水温変動と湖水循環について検討した。

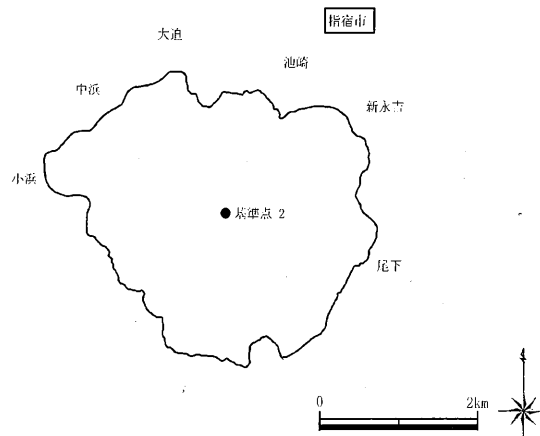


図2 調査地点

3 結果および考察

3.1 透明度の推移

1976～2006年度の透明度の推移と1年移動平均を図3に示す。透明度は2～14mの範囲で変動し，冬季に高くなり，夏季に低くなるという年間変動がみられた。1994年以降はそれ以前に比べ年間の変動幅が大きくなっており，また冬季における透明度はほぼ継続して10mを超えている。移動平均でみると1983年頃までは6m前後で推移しているが，1994年以降は漸増し近年では8m程度となっており，透明度は回復傾向にあることが確認された。

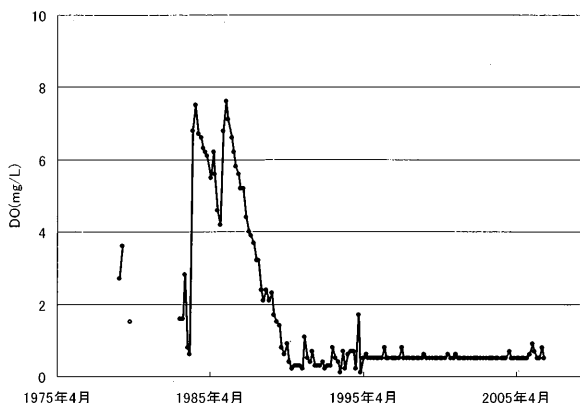


図1 DO（水深200m）の推移

2 調査方法

2.1 調査地点

解析対象とした調査地点は，池田湖のほぼ中央に位置し，環境基準A類型に指定されている基準点2である。調査地点を図2に示す。

2.2 解析データ

透明度およびCODについては1976年度から2006年度の「公共用水域及び地下水の水質測定結果」のデータを使用した。水温については1975年度から2006年度の環境基準常時監視調査時に測定したデータを使用した。

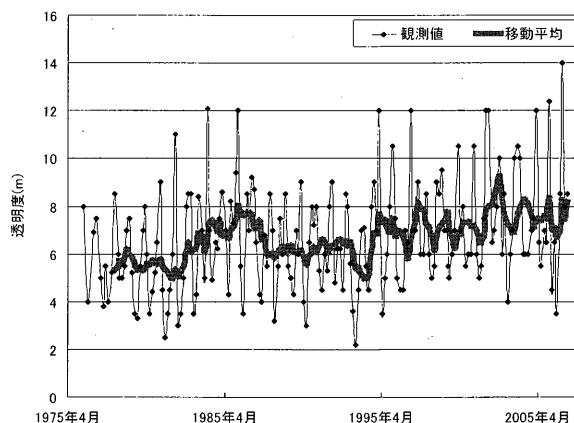


図3 透明度の推移

3.2 CODの推移

1976～2006年度の表層（0.5m）におけるCODの推移と1年移動平均を図4に示す。CODはほぼ1～4 mg/Lの範囲で変動し，淡水赤潮発生時期¹³⁾（1981年，1982年，1993年）に一時的に4 mg/Lを超える濃度まで上昇している。また，季節的な変動については春季から夏季に高くなり，冬季に低くなる傾向を示した。1年移動平

均でみると、一時的に上昇はみられるが、ほぼ横ばい(2.5mg/L前後)で推移している。

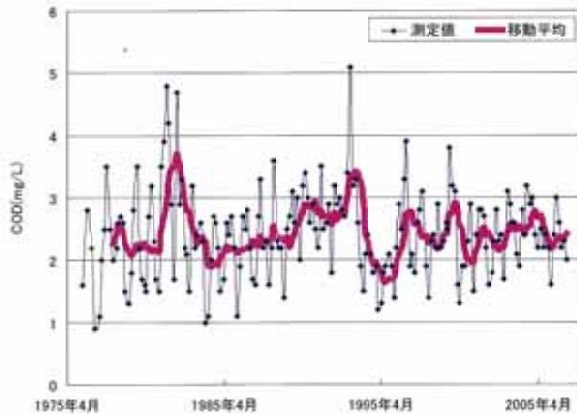


図4 COD(表層)の推移

1996年以降は透明度、CODともに大きな変動がみられず、これらの相関を1996年を境に2グループに分けて調べた(図5)。1976~1995年は透明度の低下(12m→2m, 平均6.3m)に伴うCODの増加(1mg/L→5mg/L)、1996年以降は透明度の増減(3m→14m, 平均7.4m)に対し、CODは比較的小さな変動(1.5mg/L→4mg/L)を示した。1986年以降の全層循環が起こらない状況下では、下層においてDO濃度の低下とリン濃度等の上昇^{3,4)}が著しいのに対し、表層における透明度、CODは特に1996年以降比較的安定しているといえる。

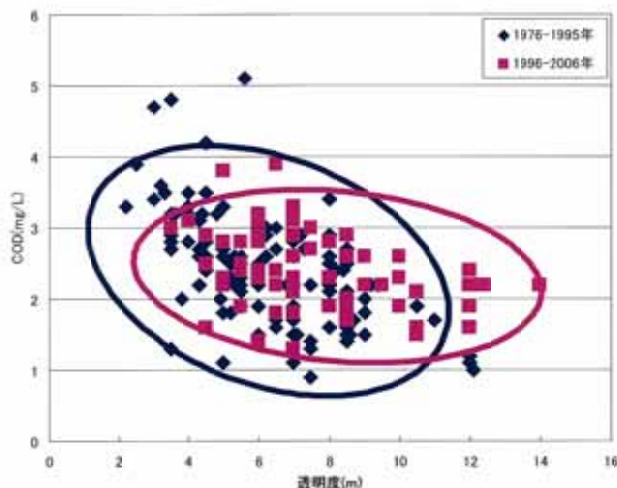


図5 透明度とCOD(表層)の関係

3.3 水温

3.3.1 水温の推移

表層~下層(200m)における各層の水温の経年変化を図6に示す。表層~30mまでは季節的な変動を示しているが、50~200mでは規則的な変動はみられなかった。

中層(100m)~下層(200m)の水温変動をみると、1990年以降明瞭な上昇が確認され、その上昇幅は約0.7℃であった。

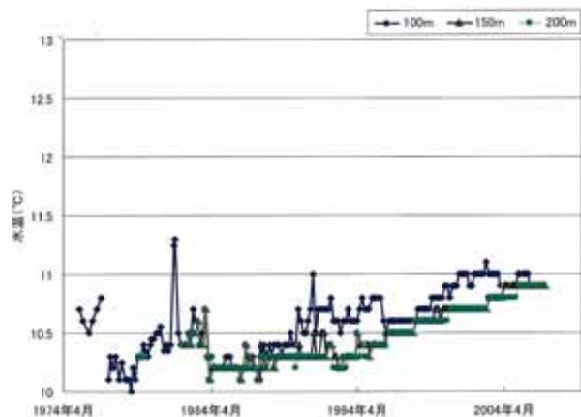
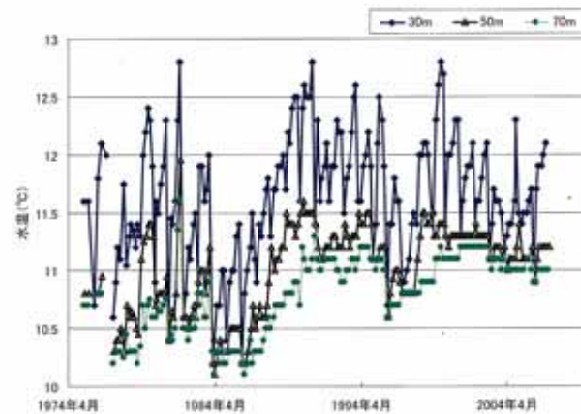
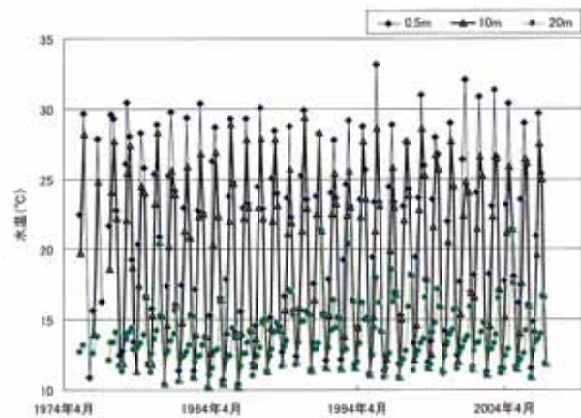


図6 水温の推移(表層~200m)

3.3.2 水温変化速度

図6において、30m以深で水温が一樣に上昇している1986~1990年および1996~1999年の2期間における水温変化の速度を図7に示す。その結果、両期間の各層の水温変化の速度に明確な差は見られず、深さが増すにつれて速度は減少する傾向にあった。変化速度は水深30mから80mまでは0.1~0.4℃/年と大きく、100m以深ではほ

0.05℃/年と一定となり、熱輸送の深さ方向の変化の傾向が判明した。これは、上下混合の深さ方向変化の指標ともみなせる。

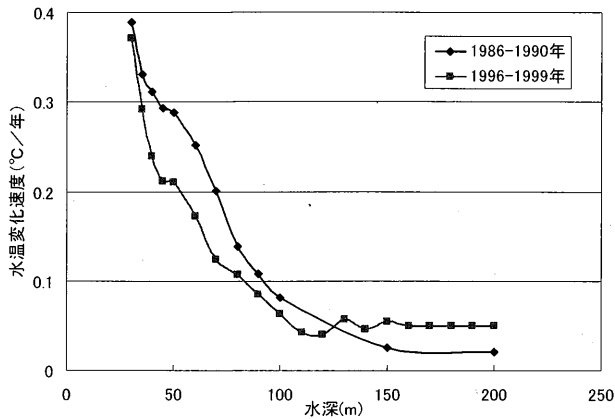


図7 水深30~200mにおける水温変化速度

3. 3. 3 躍層の変化

表層から50mまでの水温変化において1m当りの水温変化量が最も大きい水深を躍層の位置とし、年間のうち4月~12月の間に形成された各月の躍層の水深を年別に図8に示す。躍層は水深10~25mの範囲で、6月に10~15m、12月に20~25m付近に出現し季節的な変化がみられた。なお、2月には明瞭な躍層は出現しなかった。

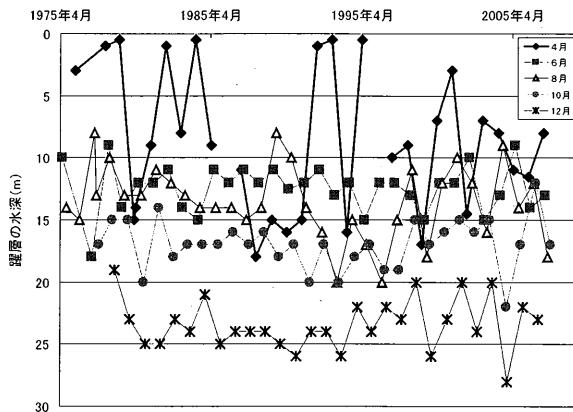


図8 各月の躍層の変化

3. 3. 4 冬季の水温鉛直分布

冬季(1~3月)の水温鉛直分布の例を図9に示す。図9の鉛直分布の形状は大まかに、①表層から下層まで水温分布が一樣、②表層から50mないし100mまで緩やかに温度が低下し、その下層に等温層が形成される、③50~150mの間に緩やかに温度が低下する層が形成され、その上層および下層に等温層が形成される、の3パター

ンに分類することができる。各年の冬季の水温鉛直分布をこの3パターンに分類した結果を表1に示す。全層循環が発生したとされる²⁾1981年、1984年および1986年のほか、2006年の冬季の水温鉛直分布はすべて分類①のパターンを示した。一方、この分類①以外の分類②および③の水温分布のパターンは年度によって多少異なるが、表層または中層において水温が0.5~2℃程度変化する層を形成していることが判明した。したがって、これらの年は冬季においても弱い成層が残っているため、不完全循環が生じていることを示していると考えられる。

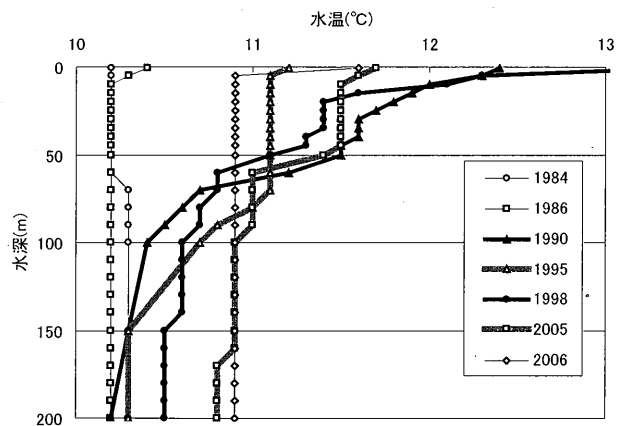


図9 冬季の水温鉛直分布

表1 冬季の水温鉛直分布の形状の分類結果

分類	年
①	1981, 1984, 1986, 2006
②	1978, 1979, 1982, 1987, 1989, 1990, 1996, 1998, 1999, 2001
③	1980, 1983, 1985, 1988, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1997, 2000, 2002, 2003, 2004, 2005, 2007

3. 3. 5 循環の有無と冬季気温の影響

1977年以降の湖水の全層循環(不完全循環)の発生と冬季の気温の影響を調べた。冬季の気温は12月から2月の3か月間の平均値とし、その推移を図10-1に示した。また、各年の2月の湖水の表層から下層における水温変化を図10-2に示した。図10-2の中で水温が表層から下層まで等温を示した年のうち、1981年、1984年、1986年は全層循環が生じたとされる²⁾年であり、冬季の気温は通年より低い8℃以下まで下降している。その後、冬季の気温は1987年以降2℃前後上昇しており、1996年を除き冬季の気温は9℃以上で推移している。一方、2006年の冬季に水温は下層まで一様を示し、坂本ら¹⁴⁾はこの年に200m層においてDO濃度の上昇と全リン濃度

の減少が生じたことを報告しており、全層循環が生じたと考えられるが、冬季の平均気温は9.2℃と明瞭な低下はみられなかった。下層での水温上昇「0.7℃」に伴って、図10-2で2004～2006年には下層温度が10.8～10.9℃に達している。このため、上下混合の盛んな混合層（温度躍層上部の湖水層）の最も発達する冬季には、混合層の水温と下層の水温との差は0.5℃程度になっており（図6中・下段）、したがって混合層下端の温度躍層も弱くなっている。混合層は冬季に最も厚くなり、通常、冬季混合層厚さ、あるいは躍層の深さは20～25mであるが（図8）、低い気温や強風速が続けば混合層温度は低下し、混合層厚さが増大して容易に全層循環が発生する状況にある。

一方、全層循環の生じた1981年、1984年、1986年の冬季の平均気温はそれぞれ7.7℃、7.3℃、7.7℃であったが（図10-1）、この直前の下層の水温は10.5℃であった（図6）。この程度の温度差で全層循環が起こるとすれば、下層での水温上昇「0.7℃」に伴って冬季の平均気温が8.4℃程度で全層循環が起こる可能性がある。実際には、この水温上昇「0.7℃」に伴って温度躍層が弱まっており、1996年には冬季平均気温が8.4℃で全層循環に近い深い循環が起こっており、2006年には冬季の平均気温が9.1℃で全層循環が起こっている。この下層での温度上昇が続けば、全層循環の発生確率は増大すると予想される。

しかし、逆に、下層での温度上昇は全層循環の発生頻度が低下したことによってもたらされているとも考えられる。これは1981～1986年の冬季の気温に比べて2℃前後高い気温が1987年以降続いていることに起因している。したがって、1987年以降続いている冬季の高い気温が今後どのように推移するか、それに伴って湖水の混合、循環がどのように推移するか、注目していく必要がある。

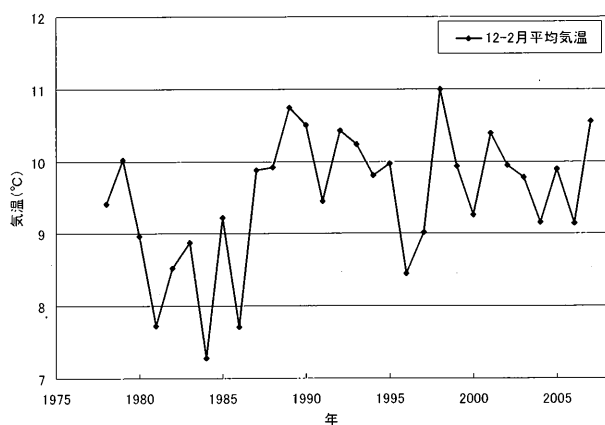


図10-1 冬季の平均気温

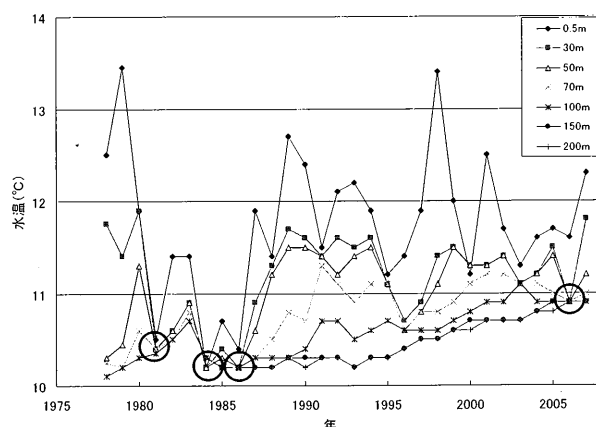


図10-2 冬季（2月）の各層の水温

4 まとめ

1975～2006年に鹿児島県が調査した池田湖の透明度、CODおよび水温に係るデータを解析して、透明度とCODの長期的な水質変動を考察するとともに、表層から下層（水深200m）までの水温変動と湖水の循環について検討した結果、以下のことが判明した。

- (1) 透明度は冬季に高く夏季に低下するという季節変動を繰り返しながら、長期的には1983年頃までは6m前後で推移し、1994年以降明らかに漸増し近年はほぼ8mのレベルで推移しており回復傾向にある。
- (2) CODは春季から夏季に高く、冬季に低くなるという季節的变化を繰り返しながら、1976～1995年に数次淡水赤潮が発生した際は4mg/Lを超過したが、1996年以降は大きな変動はみられず2.5mg/L前後で推移している。
- (3) 透明度とCODの相関関係を調べた結果、1976～1995年は透明度の低下に伴うCODの増加傾向がみられるが、その後1996年～2006年は透明度の増減に対し、CODは比較的小さい変動を示した。
- (4) 表層から下層までの水温の長期的変化を調べた結果、1990年以降、中層（100m）から下層（200m）において漸次上昇傾向を示し、この間の水温上昇は約0.7℃であった。
- (5) 水深30mから200mにおける水温変化の速度を調べた結果、水深30mから75mまで速度が大きく、100m以下ではほぼ一定となり、熱輸送の深さ方向の変化の傾向が判明した。
- (6) 各年の表層（～50m）の水温の変化を調べた結果、躍層は10～25mの範囲で6月頃に10～15m、12月に20～25m付近に出現し季節的な変化がみられた。
- (7) 表層～200mの水温の変化は、全層循環が発生した1981年、1984年、1986年のほか2006年の冬季において

水温分布が一様となったほかは、表層または表層～中層において水温が降下する層が形成されており、冬季においても弱い成層が残っていることを示していると考えられる。

- (8) 冬季における湖水循環と冬季の気温の低下には必ずしも明瞭な関係はみられないが、湖水の全層循環は冬季の気温の低下のほか、温度躍層上部の湖水層の温度変化や1990年以降の下層での水温上昇等が相互に関係しており、近年の冬季の高い気温が今後どのように推移するか、それに伴って湖水の混合、循環がどのように推移するか、水質汚濁物質の表層から下層における長期的変動を含めた精緻な調査研究が必要である。

5 おわりに

1986年以降下層まで及ぶ全層循環が発生していないとされる池田湖の透明度は、近年回復傾向にあり、またCODは2.5mg/L前後で推移しており、表層(躍層を含む)における水質は安定している。しかしながら、全層循環が発生した場合、底層の貧酸素状況下で底質からの溶出が顕著に認められるリンなどの、湖水全体の水質への影響が懸念されている。

このため、今後長期的な水質保全対策を講じる上で、全層循環が発生する科学的な諸条件を明らかにすることがますます重要になってくると考えられる。その際は1990年以降中層から下層において水温はほぼ継続して上昇傾向を示していること、1986年以前に比較して冬季においても弱い成層が生じていること、河川水導入による湖水位の管理(標高62～66m)が行われていること、さらに1987年以降、冬季における気温がそれ以前に比べ高めに推移していること、などを総合的に考慮する必要がある。

謝 辞

本調査研究報告をまとめるにあたり、(財)日本環境衛生センター酸性雨研究センター所長植田洋匡博士に、特に水温、気温の変化と湖水循環との関係について種々御教示、ご助言を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Yoshinori SATOH ; A Study on Thermal Regime of Lake Ikeda, Sci. Rept., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, Sect. A, 7, 55-93 (1986)
- 2) 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)
- 3) 奥江碩, 稲本信隆, 他 ; 池田湖の水質の推移, 鹿児島県環境センター所報, 7, 113～126 (1991)
- 4) 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)
- 5) 大場和彦, 鈴木義則, 他 ; 温暖地地かんがい用水量に関するデータ集 (IV) - 南薩畑地かんがい事業地区の水需要 -, 九州沖縄農業研究センター研究資料, 89, 1～19 (2001)
- 6) 佐藤芳徳, 森和紀, 他 ; トリチウム濃度でみた池田湖の鉛直混合の検討, 地理学評論, 57, 122～129 (1984)
- 7) 初井和朗, 長勝史, 伊藤祐二 ; 池田湖の放射量の推定, 鹿児島大学農学部学術報告, 52, 1～8 (2002)
- 8) 下菌清香, 上村忠司, 他 ; 池田湖の推移変動と水収支の推定, 鹿児島県環境センター所報, 10, 55～59 (1994)
- 9) 福島武彦, 上西弘晃, 他 ; 浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響, 水環境学会誌, 21, 180～187 (1998)
- 10) 新井正 ; 地球温暖化と陸水水温, 陸水学雑誌, 61, 25～34 (2000)
- 11) 西條八東, 三田村緒佐武 ; 新編 湖沼調査法, 57～58, 講談社 (1995)
- 12) 遠藤修一, 山下修平, 他 ; びわ湖における近年の水温上昇について, 陸水学雑誌, 60, 223～228 (1999)
- 13) 鹿児島県 ; 第3期池田湖水質環境管理計画 (2001)
- 14) 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)

Studies on the Water Quality Variations of Lake Ikeda

- Long-term changes of Transparency, COD and Water Temperature -

Takuji KIYOHARA, Takashi MINARI, Masahito YOSHIDOME

Keiko SUEYOSHI, Shun-ichi HORAI, Yoshihiko MIYATA

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

Abstract

As a result of examining long-term changes of transparency, COD of surface course, water temperature from surface course to deep layer of 200m water depth and circulation of lake water by the analysis of the data which concerns transparency, COD and water temperature of Lake Ikeda from 1975 to 2006, the following fact became clear.

- (1) There was the increase tendency of COD with the lowering (average 6.3m) of the transparency for the 1976 to 1995 year, and the variation in which COD was comparatively small for increase and decrease (average 7.4m) of the transparency in 1996 - 2006 afterwards was shown.
- (2) Water temperature at the depth of 100 - 200m increased 0.7°C from 1990 to 2006.
- (3) Thermocline appeared at the depth of 10 - 25m, and the depth seasonally changed .
- (4) The water temperature distribution in the winter was classified into three patterns ; ① All layers are uniform, ② The temperature drops at the depth of 0 - 50m or 100m, and isothermal layer is formed in the lower layer, ③ The temperature drops at the depth of 50 - 150m, and isothermal layers are formed in the upper and lower layer. The water temperature distributions in the year that all layer circulation was generated were the pattern of ①. It was indicated that the imperfect circulation had been generated, since the weak stratification had remained in the winter in the pattern of ② and ③.

Key Words : Lake Ikeda, tropical lake, water temperature, stratification, thermocline, circulation, transparency