池田湖の底質環境の経年変化

日高 正康¹・西 隆一郎²・前田 広人³・内山 正樹⁴・福田 隆二⁵

¹正会員 鹿児島大学講師 水産学部漁業工学分野 (〒890-0056 鹿児島市下荒田四丁目 50-20)
E-mail:hidaka@fish.kagoshima-u.ac.jp

²鹿児島大学教授 水産学部水産生物・海洋学分野 (同上)
E-mail:nishi24@fish.kagoshima-u.ac.jp

³鹿児島大学教授 水産学部食品・資源利用学分野 (同上)
E-mail:maeda@fish.kagoshima-u.ac.jp

⁴鹿児島大学准教授 水産学部附属練習船南星丸 (同上)
E-mail:uchiyama@fish.kagoshima-u.ac.jp

⁵鹿児島大学助教 水産学部附属練習船南星丸 (同上)
E-mail:fukuda@fish.kagoshima-u.ac.jp

鹿児島県では深水層における低酸素化、無酸素化の拡大は湖底表層堆積物中の窒素やリンの溶出を助長し、さらなる富栄養化につながるという懸念から、定期的に池田湖の水質調査を実施している。しかしながら底質とくに湖底堆積物の化学分析についての報告は少ない。そこで本研究では年間(15か月)を通じて採取した底泥試料を用いて、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量を基に、池田湖の底質の季節変化を水温躍層の形成過程の観点から明らかにすることにした。その結果、硫化物濃度は成層期の終わりに極大となり、逆に循環期には低下することがわかった。また、近年の温暖化の進行により湖水の上下混合の程度が弱まることによって、湖底の硫化物濃度の上昇を起こす可能性を示唆した。

Key words : lake ikeda, bottom sediment, sulfides, stratification

1. 緒言

図-1 池田湖および観測点位置

池田湖において湖沼の水質指標である透明度は、1925年5月に26.8mが観測されたが、1985年から1990年にかけては6mであったのが2006年には9mまで回復し

たものの現在は再び減少傾向にある¹⁾。また溶存酸素量については、1930年代の調査では、成層期にも湖底まで溶存酸素が観測され、その値も60%を下回ることにはなかったが、1986年ごろから完全循環がほとんど起こらない状況が続いていると考えられる。

このような透明度や溶存酸素量が低下した原因として、池田湖への有機物の過剰な流入がその主たる要因ではないかとされている。

一般に外来性と自生性の有機物負荷の増大に伴って、湖底に沈降する有機物量も増加する。沈降の過程で有機物は分解されその際に酸素が消費される。分解を免れた有機物は湖底に堆積し、堆積後もさらに分解が進みこの際も酸素が消費されることになる。そのため有機物負荷の増大は酸素消費の増大を意味する。池田湖の場合、湖底に酸素が供給されるのは湖水の循環期に限られるので、循環期の供給量と上記の消費量によって湖底の酸素濃度は決定する。

湖底に酸素が供給されなくなると堆積物中では有機物の嫌氣的な分解過程が進行する。硫化物は嫌氣的分解過程の進行状態を示す重要な指標の一つである。一般に硫

化物の生成には二つの過程がある。含硫アミノ酸などの分解に由来するものと、硫酸還元由来する過程である。池田湖においても、琵琶湖などと同様に湖底の低酸素化に伴う底泥における硫化物生成について調べることは上記の懸念に対してきわめて重要であると考えられる（前田ほか）^{2) 3) 4)}。また深水層での低酸素化、無酸素化の拡大に伴う堆積物表層における硫化物濃度の上昇は湖底表からの窒素やリンの溶出を助長し、さらなる富栄養化につながるという懸念から、鹿児島県では定期的に水質調査を実施している。しかしながら、池田湖の湖底堆積物の底質についての報告は少ない。

そこで本研究では年間を通じて採取した底泥試料を用いて、底質汚濁の化学的指標の一つである硫化物含量を基に、池田湖の底質の季節変化を水温躍層の形成過程の観点から明らかにした。

2. 調査水域と地形

図-1および図-2に示すように、本研究で扱う池田湖は、薩摩半島南端部、鹿児島湾口を構成する阿多カルデラの西端に位置するカルデラ湖で、湖面積は10.9 km²、湖周は15 km、また水面標高は66 m。そして最大水深は233 mに達し、これは鹿児島湾中央部および湾奥部の最大水深とほぼ同程度の深さである。

図-2 池田湖近景

図-3に平成25年2月に、本研究で鹿児島大学水産学部の子艇を使用して実施した水深測量の結果を示す。湖心付近には水深230 mを呈する平坦面が広がっている。北西部で幾分なだらかに水深が深くなる以外は、陸岸を離れると、一気に水深が深くなり、北岸では100 m、西岸では150 mそして南南岸及び東岸では200 mの深さに達しカルデラ湖特有の地形となっている。湖心の東側にはもっとも浅いところで50 mのお椀を伏せたような形状の浅水域が存在していることがわかる。

図-3 池田湖の水深図

湖水の利用は1872年の新川開削に始まり、現在でも灌漑用水や水道水源として重要な位置を占め、鯉の養殖や小鮎漁などが行われている。湖内に流入する大きな河川は存在していないが、集水域外の3河川から導水が行われることにより水位が保たれている。

3. 分析方法

(1) 底質試料採取と水質測定

図-4 試料採取（エクマンバージ採泥器）

2005年10月から2006年12月まで、図-1に示す鹿児島県の水質測定計画に基づいた統一地点番号501-51（31°14.5'N, 130°33.5'E, 水深78 m）の地点で調査を行った。なお2005年10月から2006年3月までは2か月に1回、そして2006年4月から12月までは毎月1回、湖底表層堆積物を、図-4に示すエクマンバージ採泥器を用いて採取した。

底質試料は採泥器内で、表層部分（0～2 cm）を薄く剥ぎ取るようにして採取した。採取した底泥試料を用いて、

硫化物分析, 有機物分析および粒度分析を行った。

水質測定については, 底泥試料採取時に多項目水質計 (Hydrolab DS5 Multiprobe) を用いて, 水温の鉛直分布を表層から水温変化が生じない水深まで測定した。

採取した試料は研究室に持ち帰り, 硫化物含量については水蒸気蒸留法により, 有機物含量についてはIL(強熱減量)により測定した。また2005年10月に採取した底泥試料を用いて粒度分析を行った。粒度分析には鹿児島大学総合研究博物館所有のレーザー回析式粒度分析装置 (SALD-3100: 島津製作所製) を用いた。

(2) 硫化物分析

硫化物分析用の試料は採取した硫化物を固定するために, 採取後ただちに船上で酢酸亜鉛を加え, 良くかき混ぜたのち, 密封して研究室に持ち帰った。持ち帰った試料は, 水蒸気蒸留法により硫化物を抽出分離した。取り出した硫化物を染色したのち, 吸光光度計により測定を行った。得られた値と含水率より乾燥試料1g当たりの硫化物含量 (mg/g) を算出した。分析は同一試料で2回実施し, その平均値を硫化物含量とした。

(3) 有機物分析(強熱減量)

有機物含量は50g程度をアルミ容器に取り, 常温で乾燥させて焼却前の重量を測定したのち, マッフル炉を用いて550℃で3時間燃焼させた。燃焼後, すぐにデシケーターに試料を移し, 十分冷却した後に, 焼却後の重量を測定した。焼却前後の重量差を有機物含量とした。また含水率を試料の湿重量と乾重量との差より求めた。有機物についても同一試料で2回分析を行い, その平均値を有機物含量とした。

(4) 水質計測

底泥試料を採取した地点において, 船上より多項目水質計を降下させながら, 水深および水温の測定を行い, 野帳に記録した。

4. 分析結果

(1) 深度別水温変化

図-5に2005年10月から2006年3月までは2か月ごとに, 2006年4月から2006年12月までは1か月に1回測定した水温と水深の関係を示す。

表層水温は11.1℃(1月)から29.6℃(8月)の範囲で変化している。2006年の1月から2月にかけての水温は表面から水深50mまで, ほぼ11℃で一定の値を示すため, この時期に表層水と底層水の鉛直的混合が起こっていることがわかる。3月には12.3℃まで上昇するが, こ

の傾向は水深20m付近まで見られる。そして4月になると表面水温は約16℃まで上昇し, このころから水深20m付近において水深の変化に伴う水温変化の大きい層(水温躍層)が現れ始める。その後も表面水温は上昇し続け, 8月に29.6℃の最高値を測定したあと, 温度は減少するが, 水温躍層は翌年の鉛直混合が起こるまで形成される。

図-5 深度別水温変化

(2005年10月～2006年12月)

池田湖において, 夏季に水温躍層は水深14mから20m付近に形成され, 水深30mで水温は12℃となり, 50mでは年間を通じて11.1℃である。また冬季の1月から3月にかけて発生する鉛直混合によって, 水温は表層から下層(水深50m)まで11.1℃でほぼ一定となる。

(2) 硫化物含量

2005年10月から2006年3月までは2か月に1回, 2006年4月から2006年12月までは1か月に1回採取した試料から得られた硫化物含量および有機物含量を図-6および表-1に示す。

1月から3月に発生する鉛直混合により, 底泥付近まで酸素量が豊富な水塊が供給されるとすぐに湖底表層堆積物の硫化物含量は激減し, 8月に水産用水基準の0.2mg/gを上回る値(0.29mg/g)を示すまでは硫化物含量の低い状態が継続することから, 少なくとも観測地点(水深78m)の水域では, 冬季に鉛直混合が起こったあと, 低酸素ではない状態が半年間程度継続することがわかる。また有機物含量の変化も, 硫化物含量ほど明確ではないが季節的には, 成層期に低く, 循環期に上昇する傾向が見られる。

2006年2月から7月の硫化物含量は0.01mg/gから0.05mg/gという極めて低い濃度で推移するが, 8月になると急激に水産用水基準(0.2mg/g)を超える値(0.29mg/g)を示す。その後, 9月になると, いったん減少(0.16mg/g)しているが, 10月(0.36mg/g), 11月(0.96mg/g)と10月以降は急激に増加している。また2005年12月(0.50mg/g)は10月(0.21mg/g)より高い値を示すのに対して,

2006年12月(0.06 mg/g)は11月(0.96 mg/g)より、非常に低い値を示している。

図-6 硫化物含量および有機物含量 (mg/g)
(2005年10月～2006年12月)

表-1 硫化物含量と有機物含量の月別含有量 (mg/g)

	硫化物含量 (mg/g)	有機物含量 (mg/g)
2005年10月	0.21	0.069
12月	0.50	0.021
2006年2月	0.03	0.072
4月	0.03	0.040
5月	0.01	0.036
6月	0.03	0.023
7月	0.04	0.019
8月	0.29	0.065
9月	0.16	0.037
10月	0.36	0.064
11月	0.96	0.054
12月	0.06	0.030

これら3層において気温が1℃上昇することに伴う水温変化量は、表層(0.5 m)で0.6℃、100 mおよび200 mでは0.2℃となった。

それぞれわずかではあるが、3層とも正の相関を示した。平均気温の上昇に伴う水温の上昇は、表層のみならず、100 mおよび200 mという深層部でも認められることが分かる。

このように硫化物含量は、2005年、2006年ともに10月から12月にかけて増加し、量的な差はあるが、それぞれ季節的な変化があることがわかる。

2006年8月に1回、図-1に示す池田湖最深部、湖心付近233 mにおいて底質試料採取を行い、硫化物含量の測定を行ったところ、3.43 mg/gという水産用水基準の約17

倍という非常に高濃度の値を計測したが、原因は不明である。

(3) 有機物含量(強熱減量)

図-6に乾泥1 g当たりの有機物含量(mg/g)の値を示す。有機物含量は0.02 mg/gから0.07 mg/gの範囲である。2005年10月から2006年2月にかけては、2005年12月に含量が低い値を示す以外は0.07 mg/gという観測期間でもっとも高い値を示す。そして2006年4月以降、有機物含量が徐々に減少し始め、2006年6月および7月に0.2 mg/gという最低値を示す。2006年8月になると、2006年10月まで増加する傾向が見られ、2006年10月には0.06 mg/gとなる。これより有機物含量は、冬季(10月から2月)の間で増加し、春から夏にかけては減少することがわかる。このように有機物含量と硫化物含量は、ともに冬から春にかけて減少し、夏から秋にかけて増加する傾向が見られた。

(4) 粒度分析

2005年10月に観測点501-51において採取した試料の粒度分析を行い、中央粒径(mm)、含泥率(%)を算出した。中央粒径は0.054 mm(粗粒シルト)であり、含泥率は78%となった。

(5) 気温および水温の経年変化

図-7 気温と水温の相関 (気象庁 気象統計情報、池田湖湖心水温：鹿児島県環境保健センター) (1978～2005)

図-7に1978年から2005年までの気象庁の気象統計情報から得られた気温⁵⁾と、鹿児島県環境保健センターで測定した湖心付近の表層(0.5 m)、水深100 mおよび200 mの水温⁶⁾との相関関係を示す。図-8に指宿市における日平均気温(1976～2012)および日平均最低気温(1976～2005)⁵⁾を、図-9に4層(0.5 m, 15 m, 30 m, 100 m, 200 m)における水温の年変化⁶⁾を示す。

これらの変化を平均すると、図中に示すとおり、1976年以降、約35年間で指宿市の日平均気温は年0.025℃、日平均最低気温は年0.016℃上昇しているのに対して、図

-9 に示すように池田湖の水温は、表層 (0.5 m) では年 0.04°C 、200m では年 0.05°C の上昇で、水温の上昇速度が気温の上昇速度よりも大きいことがわかる。

図-8 指宿市における日平均気温と日平均最低気温
(気象庁 気象統計情報) (1978~2005)

図-9 水深別年平均水温の推移 (1976~2005)
(池田湖湖心水温：鹿児島県環境保健センター)

5. 結論

2005年10月から2006年12月の観測期間において底質分析した結果から、硫化物量は2006年2月から7月にかけて最も低い値を示した。これは1月から3月にかけて表面水温が気温の低下とともに表層の冷却された水塊が下降することによって鉛直混合が始まり、水深100mまでは酸素が供給されたことによるものと考えられる。また4月に水温躍層が形成され始めたことにより水塊の鉛直混合が途絶え、酸素が供給されない状況にあるにも関わらず、硫化物量は7月までは増加する傾向が見られない。このことは水深100m付近においては、水温躍層形成後も約3か月間は有機物を分解するのに必要な酸素が水中に存在したことによるものと考えられる。

一方、7月から8月にかけて、硫化物量の顕著な増加が始まり、9月に一度減少しているものの、10月から11月にかけて硫化物の増加量は極大となっている。このこと

は、水温躍層の形成に伴う水深100m付近における溶存酸素量の不足によって嫌氣的分解過程、すなわち硫化物の生成活性が増加したことを示している。その後、12月に硫化物量が極端に減少する(0.06 mg/g)が水温変化からこの時点で鉛直混合により酸素の供給が起こって硫化物の酸化がおこったことによるものと考えられる。

水温の鉛直分布から、年間を通じて池田湖では50m以深の水温は 11.1°C を示したことより、表面水が気温の上昇に伴って、 11.1°C よりも低い温度に冷やされ続ける期間が少なくなると、鉛直混合が発生する期間は短くなり、規模は小さくなると考えられるため、地球温暖化により上下混合が阻害されやすくなると、ますます底質は悪化する可能性が高くなる。

1976年から2005年の30年間で気温が約 1.5°C 上昇したことにより池田湖の各層ごとの水温も、わずかながらあるが、上昇傾向にある。特に水深15m付近での水温の上昇が他の層よりも顕著である。気温の上昇は日平均気温が $0.016^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、日平均最低気温が $0.025^{\circ}\text{C}/\text{年}$ であるのに対して、水温の上昇は表層(0.5m)で $0.04^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、水深200mでも $0.05^{\circ}\text{C}/\text{年}$ となったことから、湖内水温は気温上昇の2倍の速さで上昇しているということになり、この速度のままで単純に上昇すると100年後に湖内水温は現在よりも $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 上昇することになる。

表層(0.5m)と下層(200m)の水温差が徐々に縮まることから、冬季における鉛直混合が起きやすい状況となるように思われるが、気温の上昇に伴って、鉛直混合が発生するために必要とする表層の水温が一定の閾値に達する期間が短くなることにより、発生する鉛直混合の規模が縮小することが考えられる。

このことにより深層に供給される酸素量が減少するとともに、鉛直混合が湖底まで及ばなくなる期間が増加し、その結果、湖底の硫化物含量が水産用水基準(0.2 mg/g)を上回る期間が長く続く可能性がある。すなわち、温暖化の進行により湖水の上下混合の程度が弱まることによって、湖底の硫化物濃度の上昇を起こす可能性を示唆する。今後、池田湖の湖底環境の悪化が懸念されるので、さらなるモニタリングが必要である。

謝辞

本研究の試料採取および水質測定、硫化物分析を行うに際して、鹿児島県環境衛生センターの四反田昭二氏、實成隆志氏、鹿児島大学水産学部資源利用学講座の学生諸氏および本研究を卒業研究として取りまとめた逆瀬川智美氏に対して、多大なるご協力をいただいたことに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 池田湖における水温と水質の状況について：鹿児島県環境

- 保健センター所報, 第12号, pp.85-91, 2011
- 2) Maeda H., Kumagai M., Oonishi Y., Kitada H. and Kawai A. : Change in the qualities of water and bottom sediment with the development of anoxic layer in a stratified lake. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53, pp. 1281-1288, 1987
 - 3) Maeda H. and Kawai A. Microflora and bacterial organic acid production in the bottom sediment of Lake Biwa. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 54, pp.1375-1383, 1988
 - 4) Maeda H. and Kawai A. Hydrogen sulfide production in bottom sediments in the northern and southern Lake Biwa. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 54, pp.1623-1633, 1988
 - 5) 気象庁 (1976年～2005年) : 気象統計情報
 - 6) 鹿児島県 (1976年～1983年, 1985年～1990年, 1995年～2000年, 2003年～2005年) : 公共用水域の水質測定結果, 池田湖基準点2 (501-02)

AGING PROCESS OF THE DEPOSIT ENVIRONMENT OF LAKE IKEDA

Masayasu HIDAKA, Ryuichiro NISHI, Hiroto MAEDA, Masaki UCHIYAMA and Ryuji FUKUDA

To monitor the depletion of dissolved oxygen in the hypolimnion of the lake and the inherent increase of nitrogen and phosphorus from the bottom sediment, the Kagoshima Prefectural Institute for Environmental Research and Public Health periodically conducts research to check the further progress of eutrophication in the lake. However, there are few reports about the chemical analysis of the bottom sediment. For this reason, the authors of this study have intended to clarify the seasonal changes in the sulfide concentration of the sediment, accompanied with the depletion of dissolved oxygen, which is one of the chemical indicators of sediment condition. Sulfide concentration had a maximum at the end of the stratification period, while it decreased during the circulation period. These results suggested the possibility of an increase in the sulfide concentration of the sediment, followed by poor vertical mixing of the water, which is a consequence of the advance of global warming in recent years.