

湖山池における溶存酸素濃度の変動特性

Time Variation of Concentration of Dissolved Oxygen in Koyama Lake

道上正規*・檜谷 治**・山本真一***

The eluving rate of nutrients from bottom mud in a lake are influenced by dissolved oxygen. Especially the eluving rate of phosphorus under the anaerobic condition is much bigger than that under the aerobic condition. Therefore, it is very important to investigate the characteristics of concentration of dissolved oxygen in a lake, especially period and area of anaerobic condition at the bottom of the lake. Therefore, in Koyama lake, the long time continuous observations of dissolved oxygen were carried out during summer season. From the observed data, it is found that the anaerobic condition will be able to occur after 2 or 3 days under weak wind condition.

Keyword: dissolved oxygen, shallow lake, anaerobic condition

1. はじめに

日本最大級の池“湖山池”は鳥取市北西部に位置し、表面積6.81km²、平均水深2.8m、最大水深6.5m、貯水量1.9×10⁷m³の規模を有している。現在の湖山池の水質に関しては、CODが4~8mg/lと環境基準である3ppmを上回っており、この原因に関しては、下水道不備による流入河川からの栄養塩流入と底泥からの栄養塩溶出が主な原因とされている¹⁾。水質悪化の原因の1つである底泥からの栄養塩の溶出量に関しては、特に無機リンの溶出速度が湖水のDO（溶存酸素量）に大きく影響され、貧酸素状態になると溶出量が急増し、その溶出速度は好気状態に比べて1から2オーダー大きくなることが現地実験等^{2, 3)}で明らかにされている。

この嫌気状態下での底泥からの栄養塩溶出の影響を推定するためには、嫌気状態での栄養塩溶出速度を推定することはもちろんであるが、嫌気状態が発生する期間および発生範囲を把握する必要がある。しかしながら、湖山池のような浅い湖の場合、風による吹送流の影響によって湖水が容易に混合するため、一般的に嫌気状態の発生頻度は非常に少ない。しかし、もし嫌気状態下での栄養塩溶出速度が好気状態での溶出速度の100倍程度あれば、嫌気状態が1日発生すれば好気状態の100日分に相当する栄養塩がわずかに1日で

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科（〒680 鳥取市湖山町南4-101）
** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科
*** 学生員 工修 鳥取大学大学院生 工学部土木工学専攻

溶出することになり、水質悪化の原因になる可能性がある。

そこで、著者らは、まず湖山池の溶存酸素濃度の空間的特性を把握する目的で多点観測を行ない、場地的特性に関してはほぼ一様と見なすことができることを明らかにした⁴⁾。本研究は、それに続いて実施した、固定点での長期連続観測の結果について報告するものであり、溶存酸素の時間的変化あるいは日変化の特性を明らかにするとともに、底層での嫌気状態の発生の可能性について検討する。特に、湖山池と同様な浅水湖である霞ヶ浦に関しては、溶存酸素濃度に対して温度成層および吹送流による鉛直混合の影響が大きいことが指摘されており⁵⁾、この点に注目して検討する。

2. 溶存酸素量に関する調査の概要

2. 1 調査方法

溶存酸素量の鉛直分布調査は、1995年に実施した。調査時期は水質が悪化する6月～9月の4ヶ月間で、期間は各月で以下に示す1週間である。

表-1 調査期間

Case1	6月12日 6:00 ～ 6月19日 4:00	Case2	7月17日 6:00 ～ 7月24日 4:00
Case3	8月25日 6:00 ～ 9月 1日 4:00	Case4	9月29日 6:00 ～ 10月 6日 4:00

調査は各ケースそれぞれ2時間ごとに連続して行い、同時に水温および濁度を測定した。調査地点は、図-1に示す湖山池南部で、水深は約2.5mで、測定位置は、水面から50、100、150、200、250cmの5点である。

3. 観測結果および考察

湖水中の溶存酸素量は、水中および湖底に生物環境が存在しない場合、空気からの酸素の供給によって、ある水温に対する飽和溶存酸素量を保つと考えられるが、生物環境の存在と湖内の流れによる鉛直混合のために大きく変動する。すなわち、溶存酸素量が上昇する要因としては、植物プランクトン等による光合成、濃度が飽和溶存酸素量以下の場合、空気からの供給等が挙げられる。一方、下降する要因としては、水中の植物プランクトン等の呼吸および水中および湖底微生物の有機物分解等が考えられる。さらに、湖水中の流れ

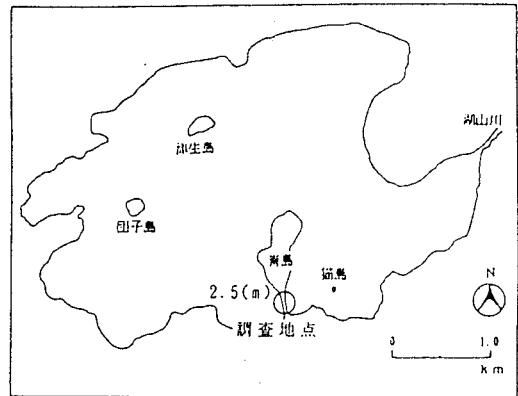


図-1 調査地点および水深

れ（湖山池では風による吹送流が支配的）による鉛直混合によって鉛直方向の濃度差を一様化する。

このように溶存酸素量は多くの要因に影響を及ぼされて変動するため、変動特性を考える場合、これらの要因と関連づけて検討する必要がある。そこで、観測項目以外に気温・降水量・日照時間・風況を加えて示し考察する。なお、気温、降水量、日照時間および風速については鳥取気象台のデータである。

3. 1 観測結果

それぞれのCaseにおける水温、溶存酸素濃度（DO）、気温、降水量、風速、日照時間を図-2(a)～図-2(d)および表-2(a)～表-2(d)に示している。なお、水温、DOについては上層50cm、中層150cm、下層250cmのみ示し、さらに、測定した下層水温における飽和溶存酸素濃度を付記している。

(a) 月別変化特性

各ケースの平均的な濃度と飽和溶存酸素濃度を比較すると、6月～8月はほぼ飽和溶存酸素濃度と一致しているが、9月では平均12mg/l程度で、飽和溶存酸素量より4mg/l程度高くなっており、過飽和状態であることが分かる。このことは、植物プランクトンの活動が9月に活発に行われたことを意味していると考えられる。

(b) DOの日変化特性

全体的な日変化特性について見ると、朝方から昼にかけて上昇し、ピークを迎えた後下降し、朝方からまた上昇する傾向が見られる。通常DOの値は、日中に湖水中の植物プランクトンが光合成して酸素を供給するために高くなり、夕方から夜にかけて植物プランクトンの呼吸やデトリタスの分解による酸素の消費で低下すると予想されるが、湖山池においてはこの傾向が顕著に見られる。

つぎに、上層と下層の変化を比較してみると、水温が上層と下層で温度差が見られるいわゆる温度成層が見られる期間で、下層の濃度が低下し、上層との濃度差が出現している。このことは、溶存酸素濃度に鉛直分布が生じていることを意味している。通常下層では酸素供給より酸素消費の方が支配的であり、低下傾向を示すと考えられるが、流れによる鉛直混合等で濃度は回復する。しかしながら、温度成層が出現することは、湖水中の水の循環が少ないことを示しており、流れによる鉛直混合の影響が少ないため、溶存酸素量が低下しているものと推測される。一方、風がある程度吹き続け、湖水中の流れが生じると濃度分布は一様化に向かい、下層と上層の濃度が一樣になることがわかる。

すなわち、夏期の湖山池の溶存酸素の鉛直分布に対しては、風による鉛直混合の影響が非常に大きく、底泥からの栄養塩溶出に悪影響を及ぼす貧酸素現象の出現に対しては、この風況との関係を把握することが重要であると考えられる。そこで、溶存酸素濃度と風速の関係について次に検討する。

3. 2 溶存酸素量と風速に関する考察

まず、各Caseごとに上層と下層のDOの差と風速の関係を図-3(a)～図-3(d)に示す。図中DOは上層が高い場合に正となるように示している。また、上層と下層のDO差が急激に少なくなる（一様化）と考えられる所を矢印で示してある。この図を見ると、ばらつきはあるものの、1時間の平均風速約3.0m/s以上が2時間程度継続すると濃度が一様化されている傾向が見られる。

また、図中には上層と下層の水温差も同時に示しているが、温度差で1℃未満の弱い成層が生じている。この形成期間とDOの上下層の濃度差の出現期間は比較的良好に一致しており、底層での嫌気状態の発生に対して、水温観測によってもある程度予測することが可能であると考えられる。

3. 3 湖山池における無風状態での溶存酸素変動特性と貧酸素現象の出現の可能性

上述したように、夏期における湖山池の溶存酸素の変動特性は吹送流に大きく影響されることから、風速約3.0m/s以下の状態をピックアップして検討すれば、特に吹送流による鉛直混合の影響を除いた湖山池での溶存酸素の挙動について検討することが可能だと思われる。

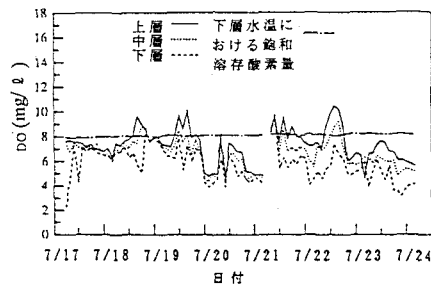
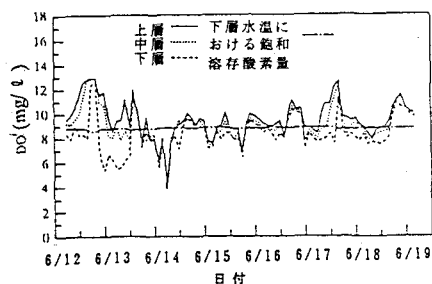
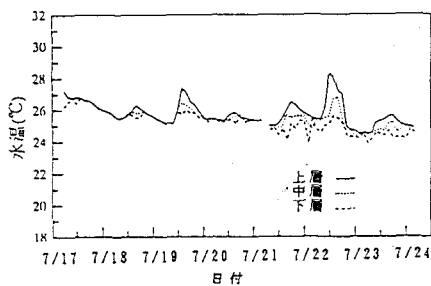
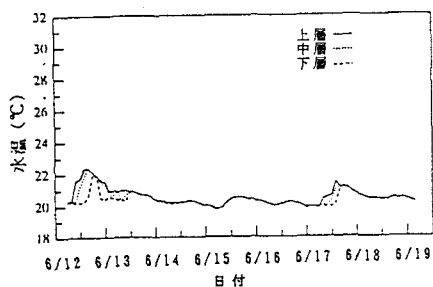
そこで、風速3.0m/s以下（以下無風状態と呼ぶ）の時間帯で2時間毎の濃度変化率を調査したものが表-3および表-4である。なお、表中の昼と夜は（昼：6:00～18:00、夜：18:00～6:00）として区別した。

(a) 上層における変動率

表-3に上層における無風状態での変動率の平均値を示しているが、昼は平均的に0.1～0.2mg/l/時間の濃度上昇、夜は0.1～0.2mg/lの濃度低下が生じていることが分かる。このことは、夏期における湖山池の植物プランクトンの活動によるものと考えられ、この値は2～4mg/lの日変動を示すことを意味している。

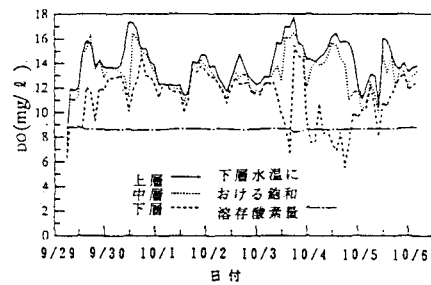
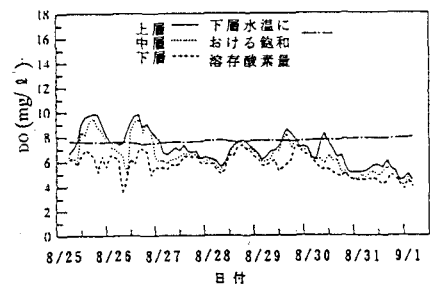
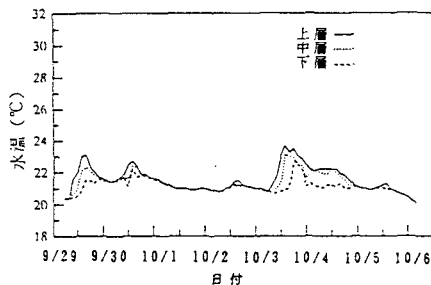
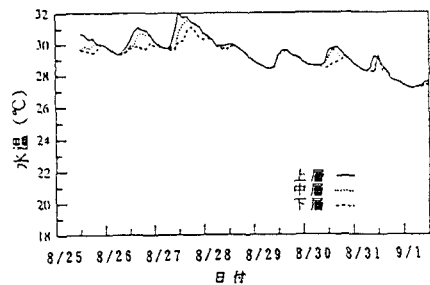
(b) 下層における変動率

表-4は下層における無風状態での変動率の平均値を示したものであるが、9月（Case4）を除いて昼夜とも低下傾向を示している。昼に下降するということは、アオコ等の発生によって下層での光度が低下し、その結果光合成による酸素の供給量よりも消費量が多くなっていることを意味している。また、この現象は、無風状態が長時間続くと底層の溶存酸素量が次第に低下していくことを表しており、例えば8月（case3）の場合、1日で3.6mg/lの濃度低下が生じることになる。この値は、霞ヶ浦で観測された値⁵⁾とほぼ一致しており、



(a)Case1

(b)Case2



(c)Case3

(d)Case4

図-2 水温およびD Oの観測結果

表-2 各Caseにおける気象条件

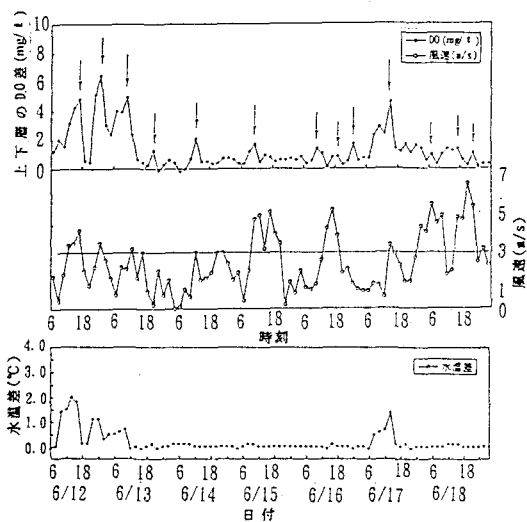
(a)Case1				
	平均気温 (°C)	平均風速 (m/s)	降雨量 (mm)	日照時間 (h)
6月12日	20.3	1.9	-	1.3
13日	17.9	2.0	7.0	-
14日	17.9	1.8	5.5	-
15日	18.5	2.9	1.5	1.9
16日	17.5	2.3	2.5	-
17日	18.9	1.7	-	2.6
18日	20.8	4.3	3.5	0.4
19日	22.1	2.7	11.5	3.5

(b)Case2				
	平均気温 (°C)	平均風速 (m/s)	降雨量 (mm)	日照時間 (h)
7月17日	22.8	2.7	49.5	-
18日	20.7	1.4	4.5	0.4
19日	23.8	3.0	-	2.9
20日	26.4	3.9	39.0	0.4
21日	25.6	2.5	75.0	2.2
22日	26.9	3.2	1.0	3.2
23日	29.2	4.2	-	4.1
24日	30.7	4.3	-	5.0

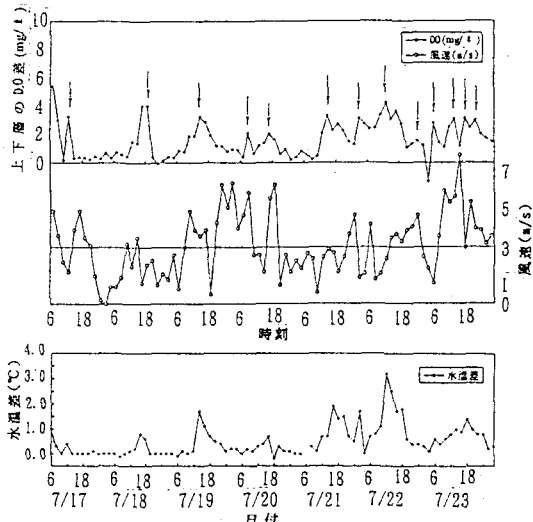
表-2 各Caseにおける気象条件

(c)Case3				
	平均気温 (°C)	平均風速 (m/s)	降水量 (mm)	日照時間 (h)
8月25日	30.5	3.1	-	9.7
26日	29.8	2.4	-	10.5
27日	29.4	5.2	-	2.5
28日	25.3	2.5	0.5	9.3
29日	25.9	2.4	-	9.1
30日	25.3	2.6	37.5	1.3
31日	24.9	2.8	45.5	0.3
9月1日	24.1	6.7	-	3.8

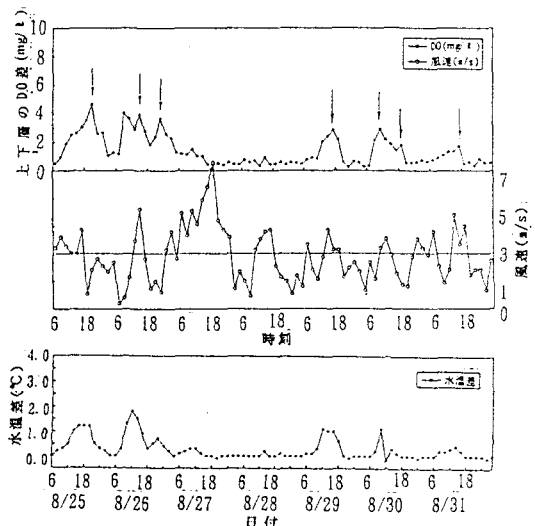
(d)Case4				
	平均気温 (°C)	平均風速 (m/s)	降水量 (mm)	日照時間 (h)
9月29日	19.0	2.2	-	5.2
30日	20.3	1.9	-	3.1
10月1日	19.2	1.8	24.0	-
2日	21.8	2.6	6.0	0.2
3日	20.8	2.2	-	10.5
4日	19.8	2.4	4.5	-
5日	18.5	1.7	5.5	-
6日	16.3	3.6	-	4.2



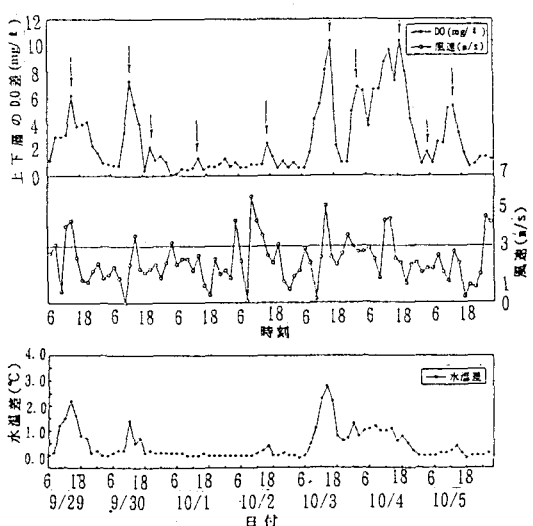
(a)Case1



(b)Case2



(c)Case3



(d)Case4

図-3 上層・下層のDO差と水温差・風速の関係

表-3 上層におけるD O値の平均値と平均変動率

(a) 昼			(b)夜		
	平均値(mg/ℓ)	平均変動率(mg/ℓ/h)		平均値(mg/ℓ)	平均変動率(mg/ℓ/h)
Case 1	9.01	0.16	Case 1	9.10	-0.18
Case 2	8.05	0.20	Case 2	6.83	-0.06
Case 3	6.91	0.04	Case 3	6.95	-0.16
Case 4	14.32	0.15	Case 4	13.92	-0.18

表-4 下層におけるD O値の平均値と平均変動率

(a) 昼			(b)夜		
	平均値(mg/ℓ)	平均変動率(mg/ℓ/h)		平均値(mg/ℓ)	平均変動率(mg/ℓ/h)
Case 1	7.94	0.09	Case 1	8.08	-0.28
Case 2	6.00	-0.13	Case 2	5.80	-0.04
Case 3	5.31	-0.17	Case 3	5.83	-0.13
Case 4	11.20	0.02	Case 4	11.70	0.11

観測期間内で無風状態が長時間継続することがなかったために貧溶存酸素状態は現れなかったが、湖山池の場合でも2～3日程度無風状態が継続すると貧酸素状態が出現する可能性があることがわかった。

4. おわりに

本研究では、湖山池における底泥からの栄養塩特に無機リンの溶出速度に大きく影響を及ぼす溶存酸素の特性について現地観測を行い、その特性を検討した。得られた結果を要約すると以下のようである。

- 1) 全体的なD O値の時間的変化については、朝方から正午にかけて上昇し、ピークを迎えた後、夜にかけて下降する日変化を示す。
- 2) 上層と下層の濃度差が出現する期間は、水温成層の形成時期とよく一致しており、吹送流による鉛直混合の影響が大きいことが分かった。また、平均風速約3.0m/s程度の風が2時間程度継続すると、風による流れによってD O濃度が鉛直方向に一様化される現象が認められた。
- 3) 風速3m/s未満の状態を無風状態と見なし、上層と下層、昼と夜に分けて溶存酸素濃度の平均変動率について調査した結果、上層においては植物プランクトンの光合成と呼吸の影響を受けて、昼上昇・夜下降する傾向があることが明らかとなった。この影響で全体的な日変動が生じているものと考えられる。

一方、下層では、昼でも濃度が下降するという現象が見られ、全体的に1日で約3mg/l程度の濃度低下が生じることが明らかとなった。その結果、無風状態が2～3日継続すると底層で嫌気状態が発生する可能性があり、水質悪化の原因となる恐れがあることが判明した。

湖山池のアオコの発生状況は、年々変化しており、特に月変化が顕著である。その原因がこの底層での嫌気状態の出現による底泥からの栄養塩溶出量の急激な増加に起因している可能性もあり、今後さらに詳細な検討を実施したいと考えている。

参考文献

- 1) 道上正規：植物を利用した湖山池の浄化研究、平成4,5年度河川整備基金助成事業報告書、1994。
- 2) 細見正明・須藤隆一：湖沼底泥からのリン溶出モデルに関する研究、Proc. of Environ., & Sani. Eng. Research, Vol. 23, pp.15-28, 1987。
- 3) 桧谷治・道上正規・辰巳尚希・川合啓介：湖における底泥間隙水中の無機リン濃度分布と溶出特性、第49回年次学術講演会概要集、Ⅱ-B, pp.1194-1195, 1994。
- 4) 道上正規・桧谷治・吉川英樹・川合啓介：湖山池の溶存酸素に関する研究、第47回中国支部研究発表会概要集、pp.115-116, 1995。
- 5) 田中昌宏：日成層が浅い湖の流動と混合に及ぼす影響について、東京工業大学博士論文、1990。