

釜房湖における溶存酸素消失過程の現象論的考察

東北大学工学部 平田 強
佐藤敦久

1. はじめに

上水道水源として利用される湖沼等の静水域における水質問題は単なる視覚問題のみならず、よりよい水質の水を廉価で供給する使命を有する上水道関係者にとっては、処理水質の質的低下と処理コストの上昇の両者とも重要な関心事である。

昭和44年に仙台市圏の水ガメとして釜房ダムの築造により形成された多目的ダム湖である釜房湖は、昭和44年から夏季成層期において下層部の溶存酸素の消失とそれに伴う底床からの鉄・マンガン等の溶出が認められており、¹⁾程度の差はあるものの毎年この現象が繰り返されるようになってきている。

夏季成層期には水体の安定性の故に中・下層への溶存酸素の供給が少ないため、通常は中・下層の溶存酸素は減少の一途を辿ることとなり、さらに、そのあとに硝酸イオンの還元、硫酸イオンの還元が続き、還元的性状にに伴って鉄・マンガン等の酸化還元性金属の溶出がみられることを考慮すると、酸素消失の要因とその速度を現象的に把握する必要が生じて来る。

本研究では、このような観点から釜房湖の夏季成層期における溶存酸素の消失要因を湖水中に存在するものと底床-水界面にあるものの2者に分け、それぞれ調査および実験を行なった。

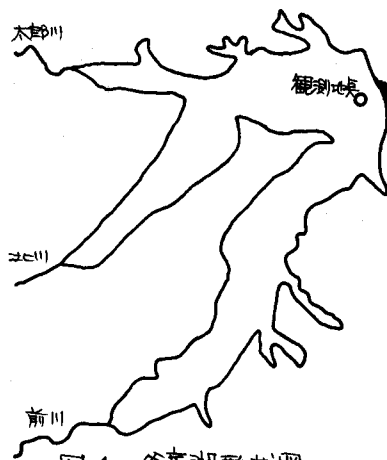


図-1 釜房湖形状図

2. 釜房湖・流域諸元

釜房湖は図-1に示すように三本の流入河川を有し、それぞれ太郎川、北川、前川と称される。湖全流域は約200km²で流域内に約9000人の居住者がある。このため各河川はそれぞれの流域条件に応じて異なった水質を示す。これらの地理的諸元を表-1に、河川別の年平均水質を表-2に示す。

表-1 釜房湖流域諸元

	流域面積 km ²	山林 km ²	田 km ²	畑 km ²	宅地 km ²	その他 km ²	牛 頭	豚 頭	人 人
太郎川流域	38.0	35.5	1.2	1.0	0.2	0.1	236	145	427
北川	77.5	71.6	1.7	3.3	0.6	0.3	1138		1430
前川	64.8	50.8	9.3	2.9	1.4	0.4	951	655	6236
湖流入	15.8	9.4	0.8	0.6	0.3	4.7	529		658
計	196.1	167.3	13.0	7.8	2.5	5.5	2854	800	8751

また、ダムの最高水位は150.6m(このときの貯水量 $V=4530$ 万m³)、最低水位は133m($V=600$ 万m³)であるが、洪水期(7月1日~9月30日)

には水位を143.8m($V=2400$ 万m³)以下に制限する。さらに多目的に利用するため取水口の高さが異なり、そのFL(標高)は次のようになっている。

- ・10 m³/sec以上の放流……………谷口中心で125.5m
- ・10 m³/sec以下の放流……………表面水位 ± 0.15 m
- ・発電、かんがい……………任意の高さに調節する ± 0.5 m以内
- ・上水道……………今回の調査期間中は138.0m

表-2 釜房湖水系水質 (昭和49年平均値)

	濁度	BOD mg/l	COD mg/l	総N mg/l	PO ₄ -P μg/l
太郎川	13.3	0.56	1.71	0.17	4.3
北川	10.6	0.62	1.21	0.32	6.8
前川	34.7	0.86	2.01	0.57	13.5
湖表層	4.8	1.57	1.50	0.30	3.1
湖底層	34.1	0.96	1.66	0.38	3.9
流出水	10.9	0.92	1.32	0.33	3.6

3. 調査および実験方法

i) 湖内水温、溶存酸素垂直分布

湖内最大水深を有する地帯を観測地帯とし、水深1m毎に水温はサーミスタ温度計、溶存酸素はウィンクラー法アジ化ナトリウム変法により測定した。また溶存酸素測定用検水の採取は北原式採水器を使用した。

ii) 湖水の保有する酸素消費能

水温、溶存酸素垂直分布の測定の際、適当な深さで湖水を採取し、これを現場でふらんビンに満てし実験室に持ち帰ったあと20℃、暗所に保存し適当な時間間隔毎にふらんビン中の溶存酸素を測定した。得られた結果を整理して初期酸素消費速度を算出した。

iii) 底泥の酸素消費能

最大水深部より湖底泥をエクスマンバー型採泥器により採取し、底泥に関しては回分式、底泥上の水に関してはほぼ完全混合型の連続流式実験装置に入れ実験を行ない、流入、流出水中の溶存酸素濃度を測定しその収支から底泥による酸素消費速度 R_b ($g O_2/m^2/日$) を算出した。なお、底泥の圧密率による間隙水の上昇による影響を避けるために実験槽に入れた後、約10月の安定期間を与えた。

4. 調査および実験結果

本調査の主たる対象期中の釜房湖への総流入量と湖からの流出量の日平均値 (m^3/sec) を図-2に示す。

i) 水温・溶存酸素垂直分布

湖内最大水深を有する地帯の水温、溶存酸素の垂直分布を各測定日毎に図-3に示す。図-3に示されるように6月20日から7月16日までには水温・溶存酸素とも全体の分布形状は似かよってはいるが中層部の値は全体的に動いており、またE.L. (標高) 120m以下に存在する水温躍層の形状も観測日によりかなり異なっていることがわかる。さらに、中層部にありて水温が上昇すると溶存酸素は減少し、逆に水温が下降すると溶存酸素は増加する。この挙動は溶存酸素が飽和値に近しい値をとっている河川の水温と溶存酸素の挙動に一致するものであり、湖水と流入水との交換現象を窺わしてゐると考えられる。さらにまた、この時期の流入・流出量は図-2に示されるように量的に大きく、かつE.L. 125.7mの放流口からの流出量が非常に大きいことから中層部の水温・溶存酸素の変動が水体の交換作用によるものと推定される。

一方、7月16日以降は水温分布に表層での昇温傾向がみられるが、中層部はほとんど動かず安定であり、7月16日にE.L. 117m以下に形成されてゐた高温部側に備へた水温躍層は時間の経過とともに順次めらめらなる型曲線へと移行してゆく。この時期には図-2に示されるように流入・流出水量が比較的小さく(最大でも貯水量の2%/日以下)、かつE.L. 125.7mからの流出量もほとんどない。この時期の溶存酸素の垂直分布は下層から順次減少を示し無酸素層が拡大されてゆく。このような状況が

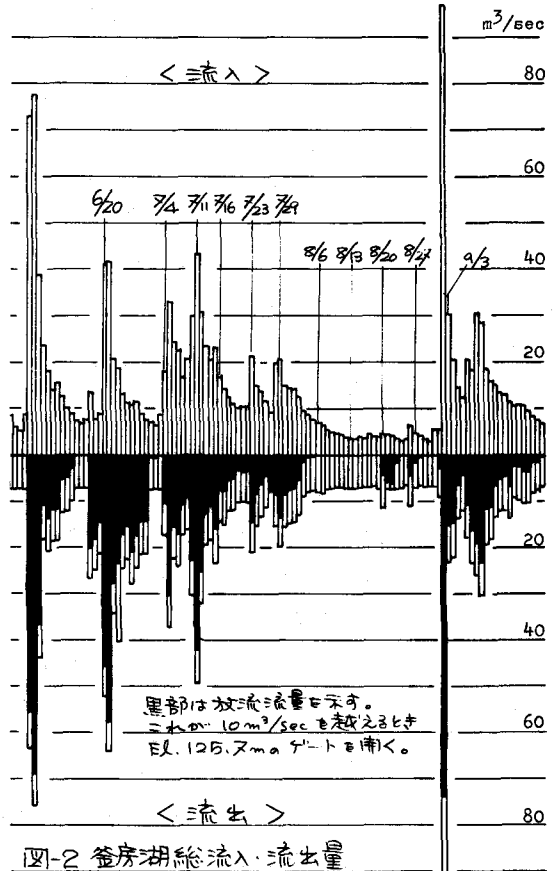


図-2 釜房湖総流入・流出量

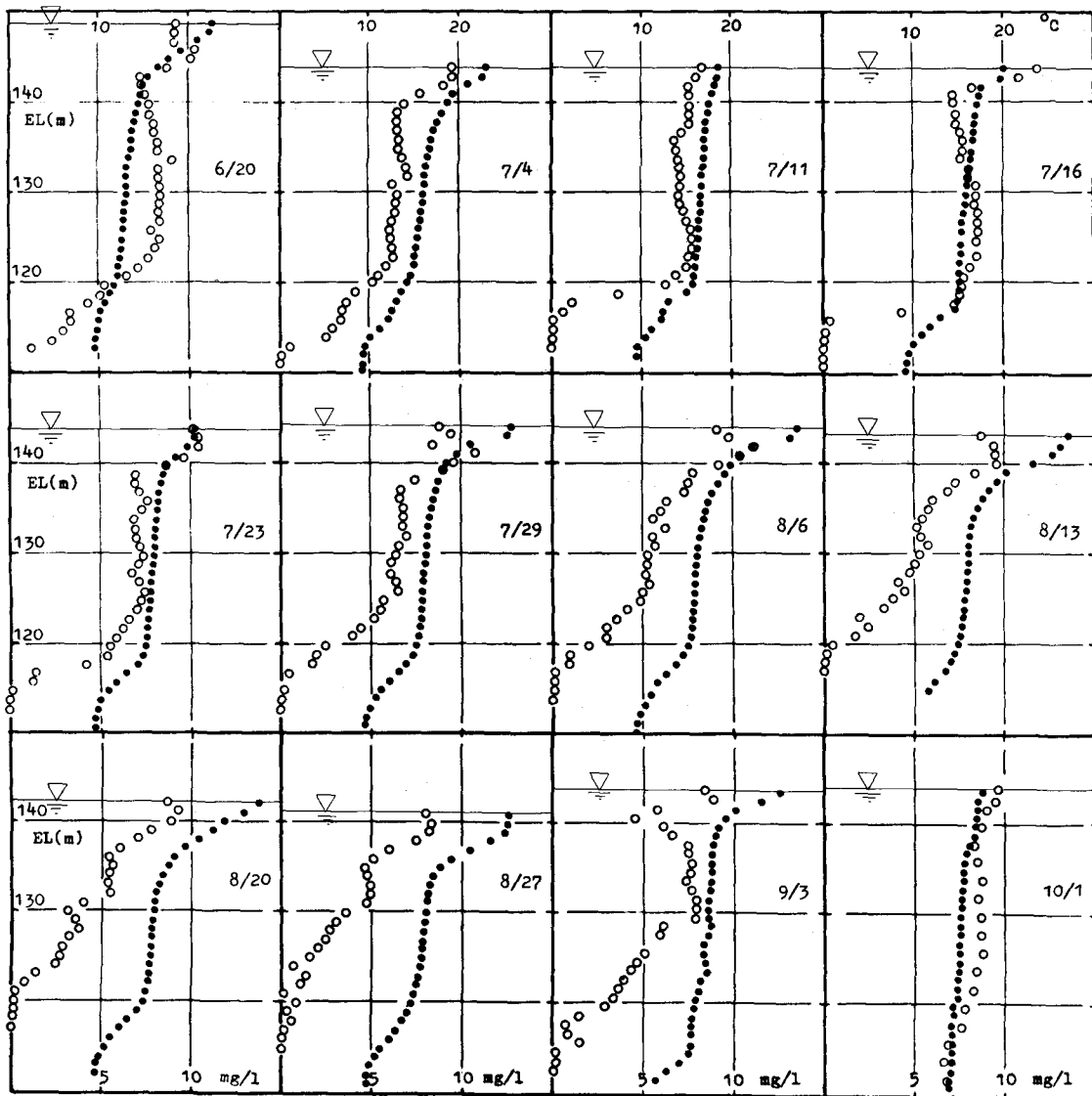


図-3 各観測日の水温・溶存酸素垂直分布

8月22日まで続く。

9月3日には水温・溶存酸素ともその前回(8月22日)とは大きく異なった分布となっており、水温は表層を除いて全体的に上昇、溶存酸素も中層が大きく増加しており、9月2,3日の大量流入・流出(図-2)からも推定されるように大規模な交換現象が生じたものと推測される。このうち水温の低下に伴って作冰期に入り、上下の均一化に向かうものと考えられる。

上述のように夏季成層期においては、溶存酸素の減少に着目するとき、流入・流出水量が小さいとき最も重要であり、大量の流入は溶存酸素レベルを相対的に回復させる。そこで流入・流出水量の小さい、水温分布の安定な時期である7月16日から8月22日までの各段、における溶存酸素濃度を実測分布から推定し、これを時間に対しプロットすると、下層部ではほぼ直線関係が得られる下の、ニ水を直線とみなし最小自乗法によりその勾配を求めた。この勾配(mg/l/日)をみかけの減少係数と称し、その垂直分布を図-6中に示した「○印」。

ii) 湖水の保有する酸素消費能

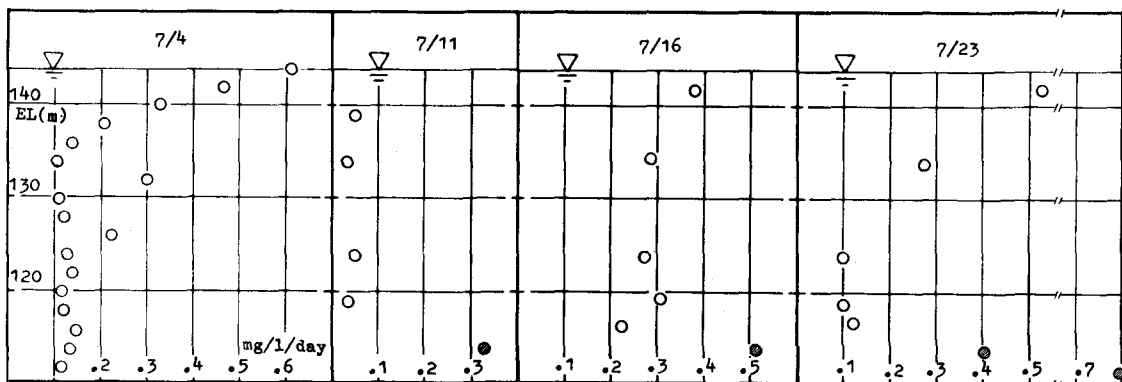
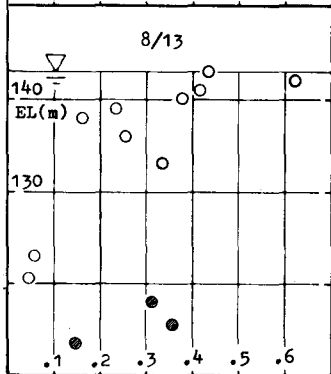


図-4. 三湖水のネオ夏期有機炭消費速度分布

●印は三湖水中の溶解有機炭消費速度の減少のために有機炭消費物質の蓄積が想定されるものを示す



湖水中の溶解有機炭の減少の一因として、水中に存在する有機物等による酸素消費（BOD物質に消費）がある。これを実験的に評価するために適当な深さ毎に湖水を採取し、20℃、暗所でのBODびらんビン中の溶解有機炭の減少曲線を求めた。ほとんどの場合、BODは2mg/l以下であり、相対的にばらつきが大きい反応式を定めるのが困難ではあるが、ここでは一定一次反応式に従うものとし、モーメント法により整理した。得られた反応速度定数（ k ）と初期酸素消費物質濃度（ L_0 ）は共に大きくばらつきを示すため、初期酸素消費

速度（ $k \cdot L_0$ ）を評価した。これを図-4に示す。なお、本実験は20℃での結果であるので、これを温度補正係数 $\theta = 1.05/^\circ\text{C}$ を用いて現場の水温に補正した。全体に表面で高く、深度を増すにつれて減少するが7月11以降のものでは最下層付近での増大が認められる。

iii) 底泥の酸素消費能

湖沼の富栄養化の蓄積型の要素の一つとして底泥がある。湖表層で顕著な光合成生物による生産は比較的良好とされた有機物集塊の生産でもあり、湖沼のような静水体ではその一部が沈降堆積し底泥の構成要素となる。底泥上では上部の水が好氣的であれば表面で好氣的分解過程が進行するが、底泥内部は常に嫌氣的であり底泥内部で生成された酸素消費物質は表面に向って上昇し、酸素と出会うと酸化される。したがって底泥は水中の溶解有機炭濃度に影響を及ぼし得る。この影響力を上部の水が好氣的である状態で評価するためには、iii) に示す方法で実験を行った。得られた消費速度 [$\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{日}$] をそのときの槽内の溶解有機炭濃度に対しプロットしたのが図-5である。図-5に示されるように槽内の溶解有機炭濃度が2mg/l以上存在すれば底泥-水界面での酸素消費速度はほぼ一定であり濃度に依存しないことがわかる。しかし、採取時期の異なる底泥ではその値に大きな開きがあり、本実験はエグマンバー型採泥器で表面から約40cmまでのものを採取し混合して反応槽に入れたため、底泥の再構築、特に表面状態の再現に大きな問題がある。したがって、この結果から直ちに現場を推定することは無理があるが酸素消費速度の値は0.5～1.0 $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{日}$ のオーダーにあるものと考えられる。

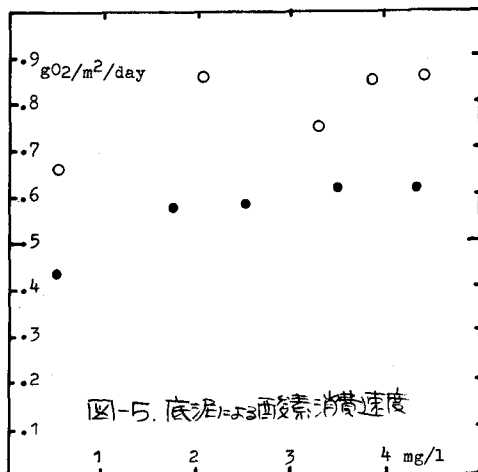


図-5. 底泥による酸素消費速度

5. 考察

湖沼等における溶存酸素の消失問題において、単に溶存酸素の消失が重要であるのではなく、酸素を消失させるような水質になるということと、酸素の消失に伴って水体が嫌氣的となり嫌氣的微生物群による各種の反応が大規模に生じ水質が著しく劣化する二点が重要である。周知のように、温帯湖においてはその気候的変化に応じて春季循環期、夏季成層期、秋季循環期、冬季（近冰）成層期の混合、成層を繰り返すが、夏季は水温も高く、したがって生物による生産も速く、各種の生物反応も速いため水質汚濁現象が最もよく示されうる時期であるといえる。本期においては、冬季の結氷がほとんどみられず、したがって秋季循環期から春季循環期の間は成層化はほとんど生ぜず、常時循環期的性状を示し、各水質項目も全層ほとんど均一である。したがって、1年の周期の中で最も水質劣化の生じやすい時期は成層化が著しくかつ水温の高い夏季成層期であり、湖の形成後行なわれている水質調査結果にも8、9月の底層水の嫌気性化が毎年記録されていることは明らかに夏季成層期の水質問題が重要となる。

夏季成層期には、表層で植物性プランクトンによる光合成が行なわれるため表層の溶存酸素は常に飽和または過飽和となっていることが多いが、中・下層では表層で生産されたプランクトンの死骸等が有機性粒子として沈降するためいわゆるBOD物質の供給が行なわれることになる。一方、表層に高濃度で存在する溶存酸素は底層に妨げられ、下層への移行がほとんど行なわれず。このため、中・下層の溶存酸素は消失する一方であり、溶存酸素に富んだ大量の流入水による交換が行なわれず限りこの消失が続く。本期においてはこの溶存酸素の減少が各断面においてみかけ上二次反応的であることから、単位時間あたりの各断面における溶存酸素の減少速度が一定であるとして整理し、その垂直分布を得た（図-6中に□印で示す）。この減少係数は断面138m付近でほぼ0となり、それより下層では深さが増大するにつれ減少係数も増加を示しており、対象期間中、湖からの流出高さ（上水道は断面138m、発電等は141~138m）付近において卓越する流れが存在すると仮定すれば、断面138m付近の溶存酸素がみかけ上減少しないことと説明されうる。

この溶存酸素の減少に影響を及ぼす要因のうち、真の消費によるものとして（1）湖水中に含まれるBOD物質等によるものと（2）底泥-水界面での反応によるもの、の二者を考え、これを水化学的に実験的に評価を行なった（図-4、5）。湖水中に含まれる物質によるもの、ある特定時間における消費速度は図-4に示すようなものとして得られた。この調査で得られた消費速度（ $k \cdot L$ ）の値はその消費を行なう物質の由来（たとえば流入水によるもの、湖内での生産によるもの、底泥から溶出して来たもの等）については不明確に示しえず、単にその水体が閉鎖系に移行されたときの溶存酸素の初期減少速度を意味するにすぎない。しかし、成層型貯水池等の表面での植物プランクトンによる生産が栄養塩の供給との関連で夏季には比較的小さく安定であること、対象期間中の成層状態が極めて安定であったこと、それに流入・流出水量が小さく安定であったことを考慮すると、全体の $k \cdot L$ の分布は時間によりそれほど大きくは変化しないと考えられる。そのため、 $k \cdot L$ の垂直分布を全体的に評価するため、各断面における全観測日のデータを単純平均し、さらに上・下層で平均化し平滑化した。その際、嫌気性化によって底泥から溶出して来た酸素消費物質が蓄積されていると想定される層のデータ（図-4中●で示した）は全て除外した。その結果を図-6中に示す（□印）。図に示されるように表層で非常に高く、断面135m以下でほぼ安定となる垂直分布が得られ、中・下層においては0.1~0.2 mg/L/日程度の消費が行なわれていると推測される。

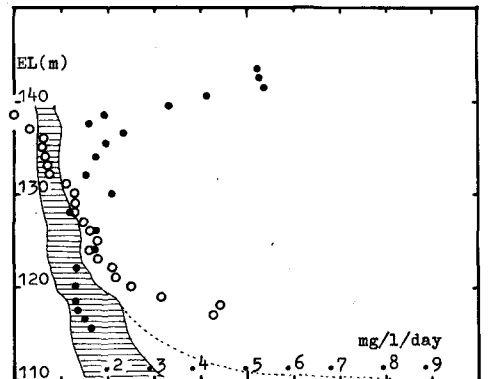


図-6. 各速度の比較

○はみかけの減少係数、●は湖水の保有溶存酸素消費速度、▨は底泥-水界面における酸素消費速度を水平方向にのみ平均したものと計算した。

