

富栄養化した浅い貯水池における 魚類斃死事故と水質動態に関する基礎的研究

FISH KILL PHENOMENON AND WATER QUALITY IN EUTROPHIC SHALLOW RESERVOIR

池田 裕一¹・木内 崇偉²・須賀 堯三³

Hirokazu Ikeda, Takayori Kiuchi, Kyoza Suga

¹正会員 博(工) 宇都宮大学助教授 工学部 建設学科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7丁目)

²学生員 宇都宮大学大学院 工学研究科博士前期課程 建設学専攻 (同上)

³フェロー員 工博 宇都宮大学教授 工学部 建設学科 (同上)

In Watarase Reservoir, a eutrophic shallow lake, fish kill phenomenon has been occurred especially during spring and summer. In this study, the dominant factor of this fish kill was investigated not only from ecological view point but also from that of water quality and movement. It was shown that the primary production of phytoplankton in this reservoir is high enough to feed fishes whose standing crop is high. Field observation with fish finder indicated that almost fishes exist in deep area near the bed. And it was concluded the sudden fall of dissolved oxygen at night, which is caused by stirring mud with strong wind, is one of the important factor of fish kill.

Key Words : Eutrophic Shallow Lake, Fish Kill, Water Quality, Dissolved Oxygen.

1. はじめに

富栄養化した浅い湖沼の水質管理にあたり、窒素・リンなどの栄養塩、また一次生産者である植物プランクトンに関する研究などが、これまで盛んに行われてきている。しかし実際の生態系においては一次生産者ととどまらず、生態系のより高次に位置する生物も重要な役割を果たしており、これらを考慮に入れた水質管理が必要である。例えば渡良瀬貯水池では魚類の大量斃死事故が10年間にわたり報告されており、生態系において栄養段階の高次に位置する魚類を考慮した水質管理の必要性を表しているといえる。浅海域における魚類の斃死事故に際して、関根ら¹⁾は魚類の生態を含め、貧酸素状態や化学物質の混入などといった多角的な視点からその原因について考察を行っているが、湖沼や貯水池における魚類斃死事故に関する研究はあまり報告されていない。

そこで本研究は、富栄養化した浅い湖沼の一つである渡良瀬貯水池で報告されている魚類斃死事故を、溶存酸素を中心とした水質や気象といった物理化学的側面、および魚類の生態や基礎生産量といった生物化学的側面から検討し、その原因を探ることを目的とする。

渡良瀬貯水池は平成2年より運用が開始されており、これまで斃死魚回収の報告が為されている。本研究では現地観測を行い、一次生産を担う植物プランクトンの日生産量(光合成量)を把握することにより、栄養面から斃死の原因を検討した。また観測によって魚類の分布状況を把握した上で、最も回収量の多かった平成5年の春季から秋季に焦点を当て、その前後を含めた水質および気象の変化と斃死事故との関連を検討した。さらに、貯水池の底泥を用いた底泥巻上による酸素消費実験を行い、溶存酸素の急激な低下について検討した。

2. 渡良瀬貯水池および斃死事故の概要

渡良瀬貯水池は栃木県南部に位置し、洪水調節・水道用水の安定供給等を目的に建設され、平成2年度よりダムとしての利用が開始されている。図-1に示すように、貯水池は谷中ブロック、北ブロック、南ブロックの3ブロックに分割されている。その規模は、面積約4.5km²、総貯水容量2,640万m³である。水深は春季から夏季にかけて3.0m程度、秋季から冬季にかけて6.0m程度に調節される。谷中ブロックの一部を除いて、湖岸一帯はコンクリート護岸が施されている。また、図-1の「観測地点」



図-1. 貯水池概略図

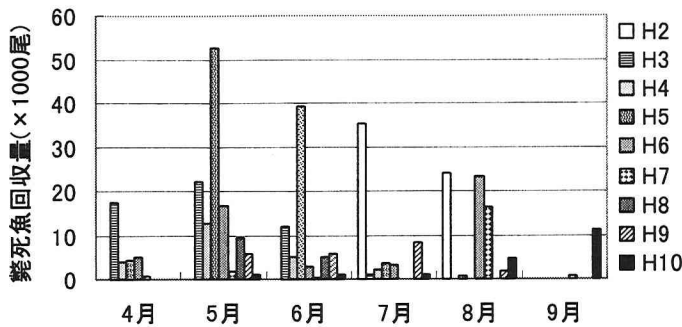


図-3. 月別斃死魚回収量(平成2～10年)

には水質自動観測用のブイが設置され、水温、D0 をはじめとする水質が1時間ごとに計測されている。

魚類の大量斃死事故は運用が開始された平成2年当初から報告されている。斃死魚(図-2)はやがて腐蝕して悪臭を発し、また貯水池の美観を損なうため、随時回収作業が行われている。図-3に平成2～10年の、4～9月における月別斃死魚回収量を示した。回収量は貯水池全ブロックで回収された魚類の合計である。年間回収量は平成5年で100,100尾に達し、それをピークに減少しつつあるが、平成11年現在も斃死事故は発生しており、その量は年間10,000尾を超えている。

3. 生態的要因からみた考察

魚類斃死事故について、まず貯水池内の魚相およびそれらの現存量を踏まえた上で、栄養状況や基礎生産量といった生物化学的な要因について検討した。

(1) 渡良瀬貯水池に棲息する魚種とその現存量

図-4に平成9年に建設省利根川上流工事事務所が行った魚量調査から試算された、貯水池内の魚種別魚量試算結果を示す。現存量は湿重量で表されている。種類別にみると、植物プランクトンを捕食するゲンゴロウブナとハクレンが、それぞれ75.5%、13.8%と全体の9割近くを占めている。それらを除くと雑食性の魚類がほとんどであり、肉食性の強い魚類は少ない。ゲンゴロウブナとハクレンはどちらも本来表層に棲息するが、手賀沼ではハクレンの増殖とともにそれまで浮遊植物を捕食していたゲンゴロウブナが底生植物食に変わり、個体数も減少した²⁾事が認められている。また、ハクレンは酸素欠乏

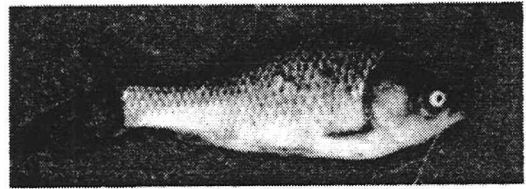


図-2. 湖岸に打ち上げられた斃死魚(ゲンゴロウブナ)

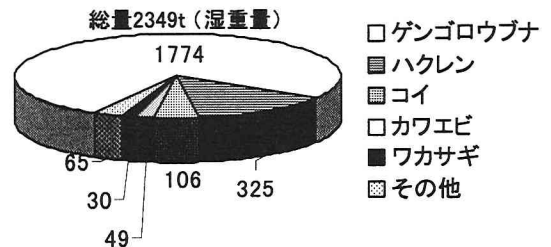


図-4. 平成9年度魚種別魚量調査結果

表-1. 湖沼における魚類現存量(湿重量)の比較

水域名	渡良瀬 貯水池	霞ヶ浦 高浜入り ³⁾	Lake Zwemlust ⁴⁾
平均水深(m)	3.0～6.0	1.5	1.5
現存量(g/m ²)	522	4.69	80

に対する耐性が強く、空気呼吸もおこなうことが知られており、富栄養化に強い魚種とされている。しかし河川で産卵するという習性のため貯水池内での繁殖は難しいと考えられ、優先種とはなっていない。

表-1は、魚類の現存量を他の2つの湖沼と比較したものである。それぞれ水深が異なるため単純に比較は出来ないが、それを考慮しても渡良瀬貯水池の魚類が非常に豊富であることがわかる。

(2) 魚類の鉛直分布状況

貯水池内に棲息する魚類の鉛直分布状況について検討した。分布状況の把握には魚群探知機を用いた。魚群探知機を用いた魚類調査の手法については水深5m程度の水域においてもその実績が報告されている。⁵⁾観測ポートに魚群探知機を搭載し、図-1の「観測地点」とその東岸の間約450mを連結したロープを手繰ることにより、約3.0km/hの一定速度で往復し、その間に魚群探知機から出力される映像(図-5)をビデオテープレコーダーで記録した。後に映像を再生し、各深度に出現する魚影の数をカウントした。観測は1999年8月24日15:00と25日3:00の昼夜2回おこなった。観測期間の水深は4.0m前後であった。昼夜それぞれにおいて、水面から1.0m毎の深度に現れた魚影と全体との割合を算出し図-6に示した。

昼夜とも水深1.0m以浅にほとんど魚影は認められなかったが、実際はその領域にも魚類が棲息しており、魚群が観測ポートから逃避した可能性がある。魚類は中層から底層にかけて多く分布しているが、昼夜の分布を比較してみると、日中は3.0m以下が最も多いのに対し、夜間は2.0～3.0mに頻出しており、日中底質付近にいた

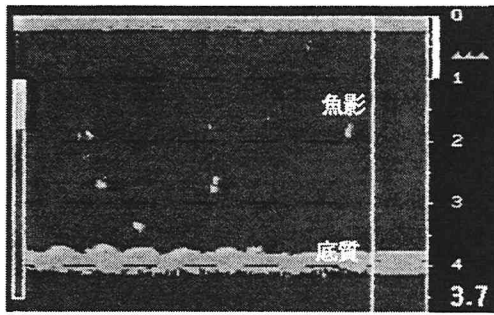


図-5. 魚群探知機映像

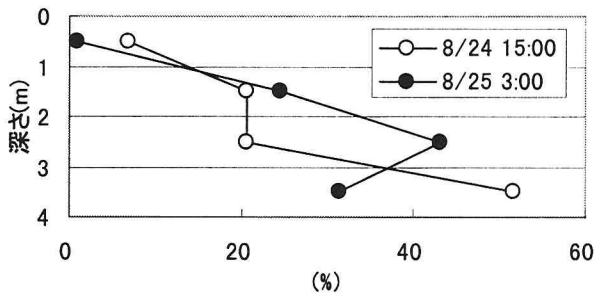


図-6. 魚類の鉛直分布(1999年8月24日 15:00, 25日 3:00)

魚類が夜間は浮上してくる傾向があるといえる。

これらについて魚類の習性や水質の変化など、何らかの理由が考えられるが、魚群探知機では種の同定は困難であるため明確な理由を得ることはできなかった。

(3) 斃死量とクロロフィル a 濃度の関係

斃死事故を“栄養不足”という視点から考察した。ゲンゴロウブナおよびハクレンは前述のように植物プランクトン食であるため、それらの増減が斃死に関係していた可能性が考えられる。そこで植物プランクトン量の指標であるクロロフィル a 濃度について、平成 2～10 年にかけての夏季の月平均濃度を図-7 に示し比較した。

運用開始からの 9 年間を通じて、4 月から 6 月にかけてクロロフィル a 量が減少し 7 月から再び増加する傾向にあり、平成 5 年もまたその例に従っている。量的にみても平成 5 年が特に低かったことは確認されず、むしろ全体的にみて豊富であったといえる。過去 9 年間の魚類現存量が平成 7 年のそれと同程度であったと仮定するならば、栄養不足による魚類斃死の可能性は低いといえる。

(4) 明暗ビン法による基礎生産量の測定

斃死事故発生当時、貯水池が栄養不足の状態ではなかったといえるが、生産量という観点からすると、必ずしも魚類の成長を支えるだけの生産が行われていたかどうかは断言できない。

貯水池の生態系の基礎となる植物プランクトンの基礎生産量は明暗ビン法によって測定可能である。測定は図-1 に示す観測地点において、1999 年 8 月 24 日の日の出(5:00)から日没(18:00)までおこなった。まず観測地点の水面から 0.5m 毎に水深 4.0m まで各深度の D0 を測定

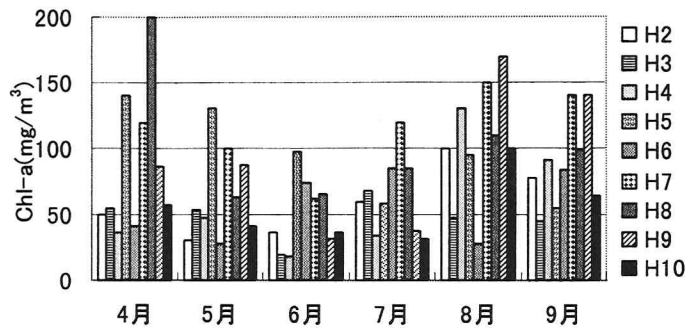


図-7. 月平均クロロフィル a 濃度(平成 2～10 年)

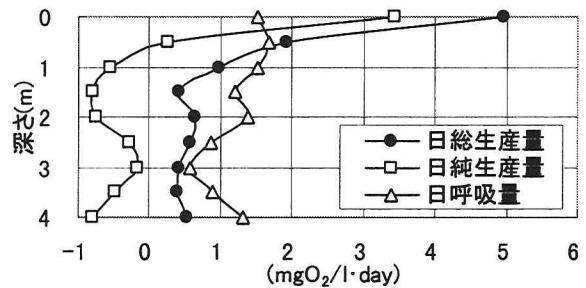


図-8. 各深度における基礎生産量(1999 年 8 月 24 日)

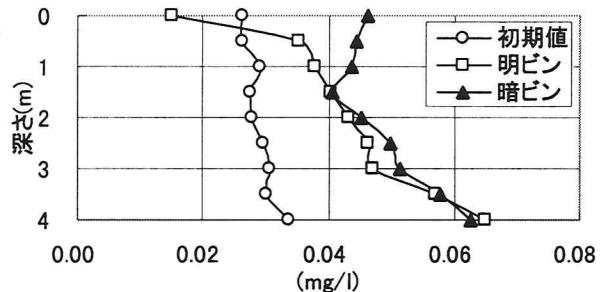


図-9. 明暗ビン中の亜硝酸性窒素の変化

した後採水をおこない、それぞれの水深について明暗合計 14 個のプラスチックビンを設置し、日没後に回収して即座に明暗ビン内の D0 を測定した。

図-8 に D0 の変化量から得た各水深における生産量と呼吸量を示す。測定時間は 13 時間であったため、D0 の変化量を 24 時間に換算している。水深 0.5m 以下のものと比較すると水面での酸素増加量は非常に高く、水柱の生産の大部分を担っているといえる。

また、明暗ビン中の酸素の生産と消費の動態を示す他の例として、亜硝酸性窒素の変化を図-9 に示した。初期値は明暗ビンに封入する時点のサンプルの値を示している。当初 $\text{NO}_2\text{-N}$ は 0.03mg/l 前後の値を示しているが、水面では暗ビンで 8 割程度の増加、明ビンが 4 割程度の減少をみせている。しかし水深 1.0m 以下では両者がほぼ同じ動態を示している。このことは貯水池の生産層が水面から深度 1.0m 程度までのごくわずかな範囲に限られていることを意味している。

観測日は曇天で日射が弱く、また前月の平均透明度が 0.5m と低かったことから、水中への照射が少なかったことも考えられるため、年間或いは季節を通じた平均的な結果が得られたとは言い難い。しかし概算として単位

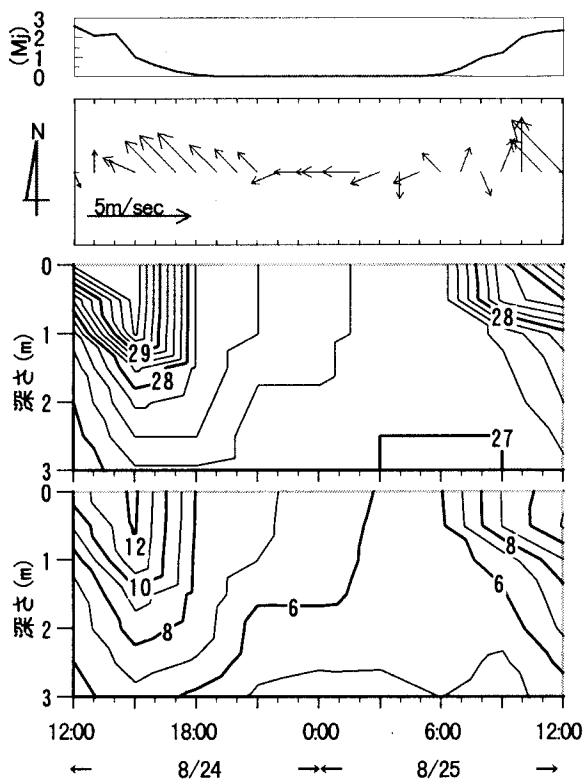


図-10. 水温、DO および気象の変化(1998年8月24～25日)
上から、日射量(Mj)、風ベクトル、水温(℃)、DO(mg/l)

面積当たりの一日の総生産量Pg、純生産量Pn、呼吸量Rを求めることができた。酸素量では $Pg=4.05\text{mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 、 $Pn=-0.74\text{mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 、 $R=4.80\text{mgO}_2/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 、炭素量に換算すると $Pg=1.52\text{mgC}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 、 $Pn=-0.28\text{mgC}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 、 $R=1.80\text{mgC}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ であった。前述の理由により、純生産量は負の値を示しているが、宝月⁹⁾によれば、富栄養湖の日総生産量は $0.2\sim 2.3\text{mgC}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ が妥当であるため、渡良瀬貯水池の日総生産量は上記の範囲内にあり、湖内の消費者を支えることが可能なだけの生産がおこなわれているといえる。

4. 物理的要因からみた考察

魚類斃死事故の一因として挙げられる、DOの動態を中心とした物理化学的要因について検討した。

(1) 水温およびDOの鉛直分布の日変化

夏季のDOおよび水温の鉛直分布の日変化の観測結果を気象とともに図-10に示した。水温とDOの測定は、図-1「観測地点」において1998年8月24正午から25日正午まで3時間おきに水面から水深3.0mまで0.5mごとにおこなった。観測期間中の平均水深は3.2mであった。

24日日中の表層におけるDOは最高で $12\text{mg}/\ell$ と非常に高く、底質直上の2倍近い値を示した。これは観測期間中の強い日射量からもわかるように植物プランクトンの盛んな光合成による酸素供給があったためである。しかし日没後、表層のDOが低下し始めるのに伴い、下層のDO

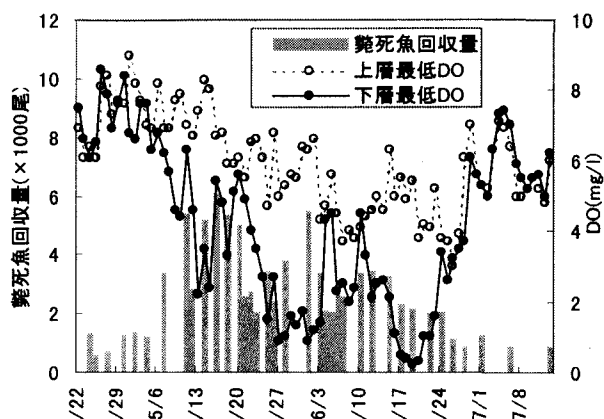


図-11. 斃死魚類回収量と上下層日最低DOの関係

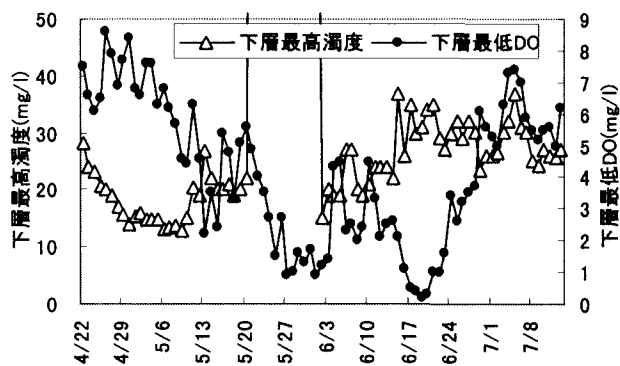


図-12 下層日最低DOと下層日最高濁度の経時変化

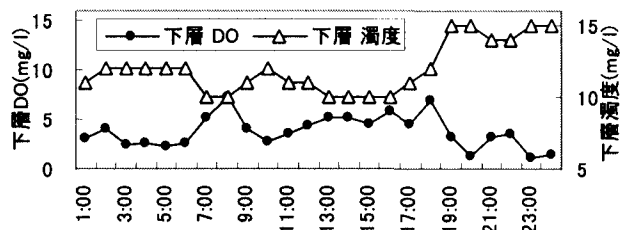


図-13. 下層におけるDOと濁度の日変化(1993年6月2日)

も低下し、特に深夜から翌朝までの底質直上においては $5\text{mg}/\ell$ 以下に減少している。

(2) DOと斃死魚回収量の関係

斃死魚の年間回収量が過去最高であった平成5年のなかでも回収量が多かった4月22日から7月13日までの回収量とDOの変化について検討した。図-11にその期間における斃死魚類回収量と上層および下層における日最低DOの関係を示した。

回収量とはその日に回収された死魚の尾数であり、斃死した魚類の数そのものではない。また回収作業は毎日行われていないため、長期にわたって回収が行われないと、それに伴い斃死魚も累積される。また、ここでの上層は水深0.5mを、下層は底質から0.5mを指す。

5月20日からの4日間、6月3日からの5日間は回収作業が連日おこなわれていたにも関わらず、1日の回収量が2000尾以上に及んでいる。

図中の魚類斃死が多かった期間において、上層・下層

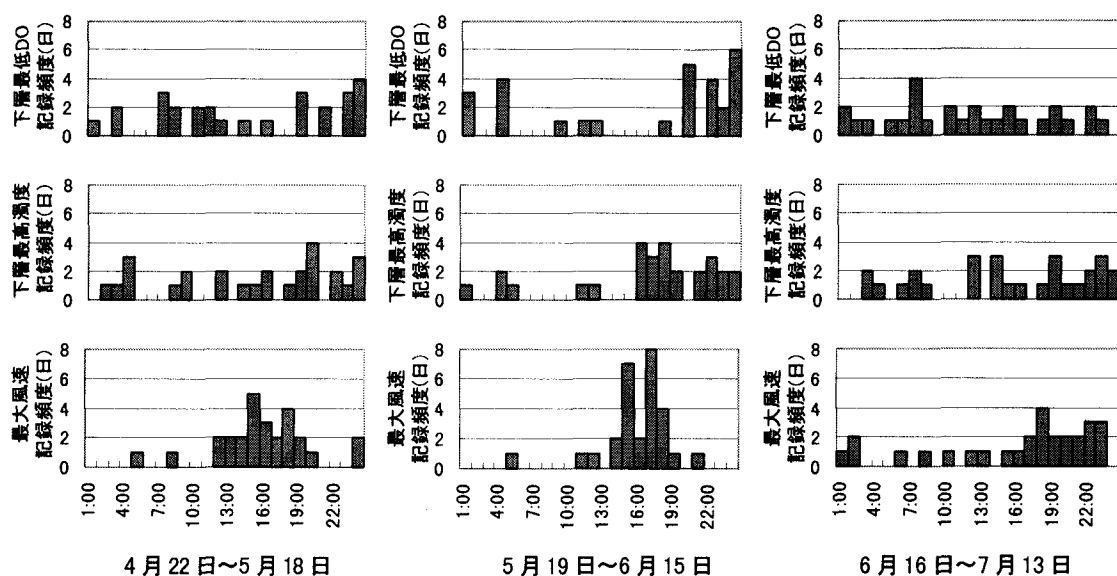


図-14. 下層日最低DO, 下層日最高濁度, 最大風速が記録された時間の頻度(1993年4月22日~7月13日)

とも日最低のDOは低下しているが、特に下層のDOが大きく低下しており、上下の差が拡大している。しかし斃死には空間的に急激なDOの変化よりもむしろ時間的に急激な変化が影響していると考え、特に下層のDOの挙動が斃死に関与している可能性が高いことを示唆しているといえる。また魚類の分布調査より、下層に魚類が多く分布していることから、これらがDO低下の影響を受けていると考えられる。回収量と下層の日最低DOとの関係を見てみると、DOが低下し始める5月10日前後から回収量が増加し、DOが回復し始める6月末から減少している。

つぎにDOの低下の原因として濁度の変化について検討した。図-12に下層の日最低DOと日最高濁度との関係を示した。図において5月21日から6月2日までの濁度は100mg/l以上を示していたため、表示の都合上、枠外にした。図からDOと濁度が負の相関を示していることがわかる。さらに図-13にDOと濁度の日変化を示したが、日変化においてもそれらの関係が明確に現れている。

濁度の増加には降雨による濁水の流入や風による底泥の巻上などが起因していると考えられる。貯水池では運用にあたって常に河川水が流入しているわけではなく、またコンクリート護岸のために湖岸からの濁水の流入も考えにくい。しかし、風による底泥の巻上によって濁度が上昇する可能性は、底質がヘドロ状であることから十分考えられるため、後者について検討した。

図-11, 12に示した期間について、回収量が増加する4月22日から5月18日までの27日間を前期、回収量がピークとなる5月19日から6月15日までの28日間を中期、回収量が減少する6月16日から7月13日までの28日間を後期として3期間に分割し、一日のうち下層のDOが最小値を示した時刻の頻度を示した(図-14, 上段)。これらによると、DO最低値は前期、後期では一日のどの時間帯にもほぼ均等に現われており、明確な傾向

は確認できない。しかし中期においてDO最低値は20:00前後から夜半にかけて多く現れる頻度が高い。

同様に、下層最高濁度が記録された時刻の頻度を図-14, 中段に示した。これらも下層最低DOと同様に、前・後期ではどの時刻にもほぼ均等に現れている。また中期においては16時以降に最高値を示す頻度が高く、DOが最低値を示す時刻より数時間早いことがわかる。

さらに、平均最大風速(図-14, 下段)についてみてみると、前・中期について、16:00前後に起こる頻度が高いことが分かる。午後から夕方にかけて発生する風は、この地方では日常的に起こっている大気現象であるが、特に中期においてはその傾向が強く現れている。

これらを総合すると、短時間における下層のDO低下に関する次のような機構が考えられる。つまり、午後の強風の影響が湖底まで達すると、底泥の巻上が起こり濁度を急激に増加させる。濁度の増加により、DOは低下し夜半にかけて最低値を示す、というものである。もともとDOが低ければその値はさらに低下し、魚類の斃死に至ると考えられる。

(3) 底泥巻上によるDO消費実験

つぎに、底泥による酸素消費を実証するために室内実験をおこなった。ここでは高い濁度を再現するために、底泥を巻上げて浮遊させた。

底泥は、南ブロック沿岸50m付近において円筒形サンプラーを用いて採取した。底泥の含水比は163%であり、黒色で腐臭を発し、粘性が非常に高い。

実験には直径20cm、高さ80cmの円筒水槽を用いた。底泥を水槽の底部に5cmの厚さに敷詰めラップフィルムで表面を覆い、20ℓの水を注ぎ、DO計センサー部を底泥表面から50cmの高さに設置した。DOの安定後ラップフィルムを取り去り実験開始とし、開始から90分後まで、DOの変化を記録した。底泥の巻上がある場合は水槽内に

表-2 実験条件

case	使用した水	DO 初期値	底泥巻上	水温
1	蒸留水	7.38	なし	26.8±0.4℃
2	蒸留水	6.98	あり	26.8±0.4℃
3	酸素曝気した蒸留水	19.50	なし	26.8±0.4℃
4	酸素曝気した蒸留水	17.75	あり	26.8±0.4℃
5	現地水	5.28	なし	26.8±0.4℃
6	現地水	5.22	あり	26.8±0.4℃

設置した水中モータで水流を起こし、底泥粒子を均等に浮遊させることで再現した。また実験開始後は水面に発泡スチロール製の蓋をすることにより、空気中から水中への酸素供給および空気中への溶出を防止した。以上の手順により表-2 に示す条件で6 ケースの実験を行った。

実験結果を図-15 に示す。底泥巻上のない場合はいずれのケースも、DO の低下はほとんどみられない。底泥巻上のある場合は、いずれのケースも約 20 分で初期値の 5 割以下に低下している。さらに時間が経過すると低下の割合は緩やかになるが、case.6 では最終的に 1mg/l 以下まで低下した。実際の貯水池では上層からの酸素供給があることが考えられるが、底泥の巻上が短時間における DO の著しい低下を招いている事が実証された。

5. おわりに

- 本研究によって得られた知見を以下に列挙する。
- 1) 渡良瀬貯水池における魚類の現存量は高く、また植物プランクトン食の魚種が大半を占めている。
 - 2) 貯水池では植物プランクトン食の魚類が大半を占めるため、大量斃死事故の一因として植物プランクトン量の指標であるクロロフィル a 量の過不足について検討したが、斃死との直接的な関係はみられなかった。
 - 3) 魚群探知機を用いて魚類の鉛直方向の分布状況を調査した結果、下層に多く分布していることがわかった。
 - 4) 貯水池の生態系を支える植物プランクトンの基礎生産量を明暗ビンによって測定し、富栄養湖における一般的な生産量の値と比較したが、妥当な値を示していた。
 - 5) DO の鉛直分布の夏季の日変化を現地観測した。日中における上層と下層の DO には大きな差があるが、夜間にその差は小さくなり、夜半から明け方の底質直上において貧酸素状態となる。
 - 6) 魚類斃死は下層の DO および濁度の動態が関係していることがわかった。このことは魚類が底層に多く分布していることにも関係している。斃死魚類が最も多かった平成 5 年においては、午後の強風が底泥の巻上を起こして濁度を増加させ、夜半に DO が低下するという機構が明らかになった。
 - 7) 室内実験で底泥が静止状態にある場合と巻上状態にある場合の DO の変化を測定し比較した結果により、巻上状態にある場合は、DO の短時間における著しい低下

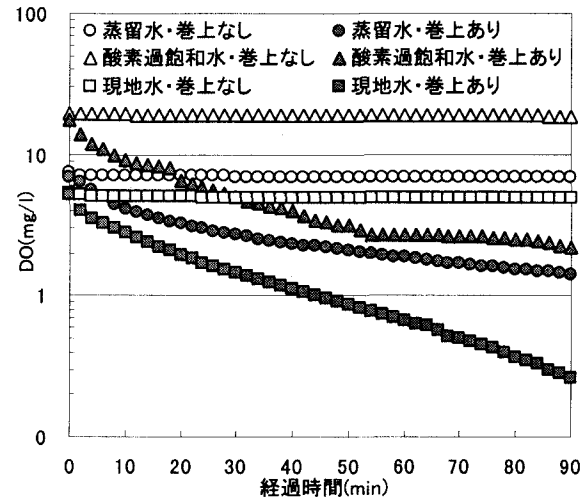


図-15. 底泥による酸素消費

を招くことが確認された。

ただし、今回は平成 5 年についてのみであり、運用開始後からの過去 10 年間に関しても検討する余地がある。また、底泥の巻上による酸素消費実験の結果を現地観測結果の定量的検討に活用するに至っていないので、これも今後の課題としたい。また魚類斃死時の DO および濁度の動態は把握できたが、魚類の生死に関してどちらが支配的になるかは現在のところ明らかになっておらず、今後魚類の生理学的見地からも検討する必要がある。

謝辞

観測および資料の提供につきまして、多大なるご協力を頂きました。建設省関東地方建設局利根川上流工事事務所利水調査課の皆様にご心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 関根雅彦, 中西弘, 浮田正夫: 水域生態系モデリングツール SSEM を用いた水門工事に伴う魚のへい死事故の解析, 土木学会論文集, No. 491/II-27, pp. 99-108, 1994.
- 2) (財)リバーフロント整備センター: 川の生物事典, pp. 309-419 山海堂, 1996.
- 3) 春日清一: 近年の霞ヶ浦の帰化魚侵入とそれらによる生態系攪乱, 第 6 回世界湖沼会議 霞ヶ浦 '95 論文集, vol.1, pp. 129-132, 1995.
- 4) 浅枝隆: バイオマニピュレーションの数学的モデル化 -富栄養化した浅い湖での水質管理法-, 用水と廃水, Vol. 39, No. 11, pp. 7-14, 1997.
- 5) 山岸宏, 古田能久, 福原晴夫: 生態研究法講座 24 水界生物生態研究法 I -淡水の魚類とベントス-, pp. 15-88, 共立出版, 1976.
- 6) 宝月欣二: 湖沼生物の生態学 -富栄養化と人の生活にふれて-, pp. 52-129, 共立出版, 1998.

(1999.9.30.受付)