

潟沼における DO の挙動とその支配要因

三村 信男* ・ 吉野 哲平** ・ 信岡 尚道***
横木 裕宗**** ・ 荒井 将人*****

潟沼における長期水質観測データを用いて、DO・塩分濃度の動態把握と貧酸素水塊形成の支配要因の解明を試みた。貧酸素水塊は湖底のごく近傍に形成され、分布域は湖底地形と強い関係がある。潟沼における貧酸素水塊形成の最大の要因は、塩分・水温による密度成層の形成であり、特に間欠的な塩分浸入の影響が卓越している。一定の塩分濃度はヤマトシジミの産卵及び初期発生のために必要であるが、他方で貧酸素水塊の形成を促進する危険性があるため、塩分導入などの方策は十分に検討する必要がある。

1. はじめに

潟沼の水質は、1997 年に COD 9.7 mg/l(全国ワースト 4 位)、2000 年には COD 9.5 mg/l(同 5 位)を記録するなど、長期的な水質悪化に直面している。特産のヤマトシジミは、1974 年から 1979 年当時には潟沼及び那珂川を合わせて約 6 千トンの漁獲高があったが、現在では 1700~2000 トン程度に減少しており、資源増殖をめざして調査検討が行われている。同時に、コイやフナなど他の魚種の漁獲高も減少している。ヤマトシジミの産卵及び初期発生には海水の 1/4 程度の塩分濃度が必要であるとされており、近年の漁獲高の減少は潟沼への塩分浸入が低下したことが原因の一つではないかという指摘もある(桑原・齋藤, 2003)。

潟沼における環境修復の目標は、水質改善とヤマトシジミを含む汽水域生態系の再生の両立であり、ヤマトシジミの増殖もその目標の一つである。そのため、湖内への塩水の導入案も対策として検討されている。しかし、潟沼は平均水深 2.1 m のごく浅い湖沼で、塩分の流入、日射による水温上昇、風応力などの外乱に対して非常に敏感である。そのため、溶存酸素(DO)の動態解明なしに塩水を導入すると貧酸素化を助長する可能性がある。そこで本研究では、潟沼湖内における長期観測データに基づいて、DO・塩分濃度の変動実態を把握し、貧酸素水塊形成の支配要因の解明を試みた。

2. 現地調査・データ解析の方法

(1) 潟沼の概要

潟沼是那珂川の支流である潟沼川下流部に位置する湖で、潟沼川、大谷川など 7 つの河川が流入している。流域は水戸市や茨城県などをはじめ 2 市 5 町 2 村(流域人口 16 万人)、流域面積 439 km²に及ぶ。湖水の面積は 9.35

km²、周囲は 20 km である。中央部の水深は 3 m でその外周に水深 2 m 以下の浅瀬があり、平均水深が 2.1 m のお皿のような極めて浅い湖である(茨城県史編さん委員会, 1993)。

潟沼は潟沼川の途中にあるため、下流潟沼川を通して那珂川を介して太平洋とつながっている。下流潟沼川は感潮河川であり、間欠的に海水が湖の中まで浸入するとともに、湖内の水位は潮位の影響を受けて変動する。潟沼への塩分浸入特性については、三村ら(2002)、信岡ら(2003)に示した。

潟沼は、霞ヶ浦と北浦が淡水化された現在では、茨城県内に残された貴重な汽水湖である。汽水域は生物の貴重な生息場所であり漁業生産が盛んで、特にヤマトシジミは全国的に有数の漁獲高を有している。しかし、上に示したようにかつて約 6 千トンあった漁獲高が現在では半分以下に減少しており、その再生策が検討されている。

(2) 現地観測とデータ解析

潟沼において、茨城大学、茨城県内水面水産試験場、水産工学研究所の 3 機関共同で長期定点観測を行ってきた。2003 年における測定期間は、2003 年 5 月~2004 年 3 月、測定点は潟沼内から下流潟沼川に至る 8 点である(図-1)。自記式測定器による測定項目は、DO、塩分、水温、流速、水位、クロロフィル、濁度等であり、その他に定期的にシジミの幼生・稚貝の分布なども調べた。

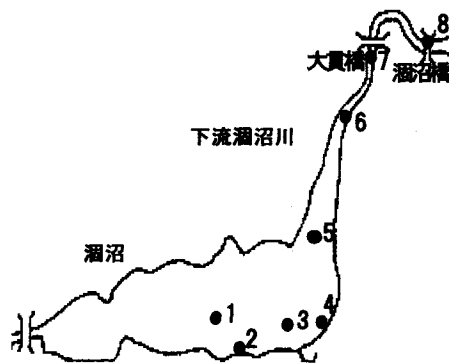


図-1 自記式測定器の設置場所

* 正会員 工 博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

** 修(工) ボラス(株)

*** 正会員 博(工) 茨城大学助手 工学部都市システム工学科

**** 正会員 博(工) 茨城大学助教授 広域水圏環境科学教育研究センター

***** 茨城県内水面水産試験場河川部主任

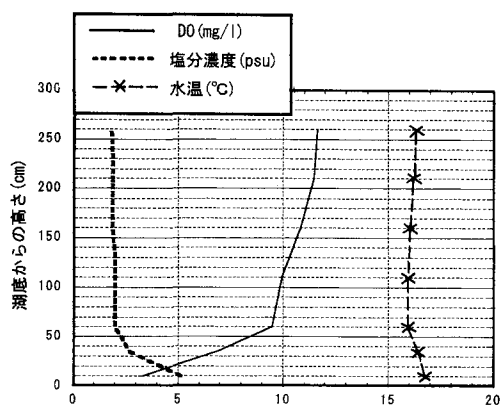


図-2 塩分濃度、水温、DOの鉛直分布

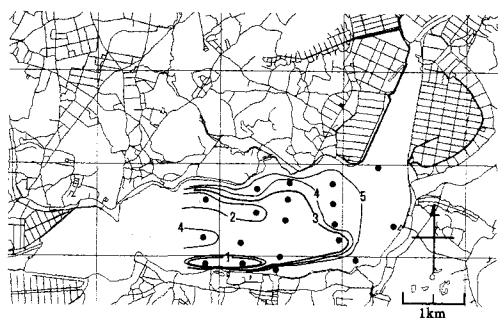


図-3 底層におけるDOの分布

自記式測定器の測定間隔は1分である。また、2003年10月30日には集中観測を実施し、舟によって移動することによって、19点で塩分濃度、水温、DOの鉛直分布を測定した。

集中観測のデータを用いて、貧酸素水塊の形成の有無及びDOの鉛直構造を解析した。定点観測データでは、涸沼湖内の箕輪沖(図-1のNo.1)を集中的に解析した。この地点では、湖底上0.2mと0.5mの位置で塩分、水温、DOが測定されており、かつ流速も連続測定されている。これらの時系列データの他に、大洗港の潮位、那珂

川の水位、気温・日射(水戸市)、風速・風向(涸沼北岸の茨城町広浦)などのデータを用いて、DOの動態とそのメカニズムを解析した(吉野, 2004)。

3. 涸沼におけるDOの動態とメカニズム

(1) 空間分布特性

集中観測で得られたデータを用いてDOの空間分布を示す。集中観測では、いずれの測定地点においても水深の増加とともに塩分濃度の上昇、DOの低下という傾向がみられた(図-2)。特に、底面に近づくにつれて、塩分濃度が大きく上昇し、DOが著しく減少していた。

全測定地点のデータを用いて底層のDO等濃度線を求めたのが図-3である。貧酸素化の境界をDO 3 mg/lとすると、10月にもかかわらず涸沼では広い範囲に貧酸素水塊が形成されていることが確認された。この領域を水深分布と比較すると、DO 3 mg/l以下の範囲は水深2.5 m以上の部分と概ね一致していた。すなわち、貧酸素水塊は水深2.5 m以上の領域の底層に薄く存在していた。鉛直分布の測定から、DO 3 mg/l以下となる境界が湖底面から10~20 cmに存在する地点も見られた。涸沼中央の南岸付近には、かつて土砂が浚渫されてできた窪地が残っており、そこでは水深が他の地点より1 m以上深くなっている。この地点では、湖底直上でのDOが0.2 mg/lとほぼ無酸素状態であった。

(2) 時間変動特性

図-4に箕輪沖の湖底から20 cm(箕輪沖底層)における2003年夏季(6月1日~8月31日)のDO、塩分、水温の時系列を示す。グラフでは、とくに塩分とDOが激しい変動を示している。塩分濃度の特徴は、ある時に突然、急激に上昇し、その後徐々に減少していく過程が繰り返されることである。これは、湖口からの塩水の侵入によって涸沼湖内の塩分濃度が上昇し、一旦侵入した塩水は時間をかけて周辺の水塊と混合するか、あるいは、下流へ流出することを示している。

DOにはこの塩分濃度の変化と逆位相の明瞭な変化が見られる。明確な貧酸素水塊が発生した6月13日から6

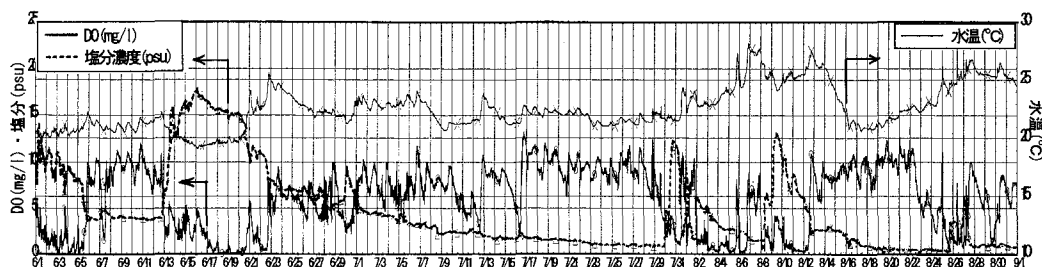
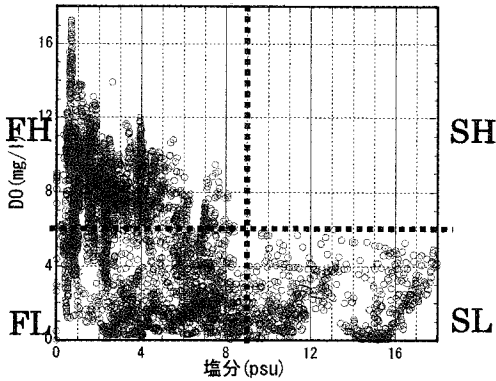


図-4 塩分濃度、水温、DOの時系列データ(箕輪沖、底面上0.2 m)



図一五 塩分濃度とDOの相関

月22日にかけては、その傾向がよく現れている。しかし、塩分濃度が単調に減少する期間（例えば、7月1日～7月30日）においてもDOは短周期の変動を示しており、DOの変化に寄与する要因が塩分濃度だけではないことを示唆している。

4. DO変動の支配要因の分析

(1) 個別要因との関係

以上のようなDOの時間変動の特徴をさらに解析するために、相関分析などによって低DOの出現と塩分、風、降雨、日射などの関係を解析した。

a) 塩分濃度との関係：DO・塩分の単相関分析を行った。その結果を図一五に示すが、塩分濃度が9 psu以上でDOは低くなり、逆に塩分濃度が小さくなるにつれてDOが回復する傾向が顕著に現れている。こうしたことから、DOの低下・貧酸素化に対して、塩分濃度がもっとも大きな要因であると推定される。他方、塩分濃度が小さい範囲においても低DOが出現しており、他の要因が支配的になる貧酸素化メカニズムもあることが分かる。

b) 風との関係：湖沼では、水深が浅いため風によって駆動される流れの効果が大きいと推測される。そこで、風速・流速をそれぞれ南北(NS)成分、東西(EW)成分に分解し、風と流れの関係を調べたところ、風速NS成分と流速NS成分の間に明瞭な逆相関の傾向が見いだされた。すなわち、北風によって、南向き表層流(吹送流)・北向き底層流(補償流)が発生し、南風によって北向き表層流(吹送流)・南向き底層流(補償流)が誘起されるという明瞭な関係があった。さらにDOとの関係では、北風(北向き底層流)の時には箕輪沖底層のDOが高く、南風(南向き底層流)では貧酸素化が促される傾向が確認された。このことから、風による補償流によって別の場所にあった貧酸素水塊が移動する結果、観測点でのDOが急激に低下したと推定された。これは、水塊移動型貧

酸素化とも呼ぶべき現象である。

c) 降雨との関係：流域の降雨の代表として水戸市と笠間市の降雨量とDO時系列データを比較した。1日60 mm程度のまとまった雨が降ったときには、水温が低下し、同時にDOが上昇する傾向があった。水温の低下は明らかに淡水の流入によるものであり、DO濃度の高い淡水が流入することによって湖沼底層のDOも上昇したものと考えられる。

d) 日射との関係：日射は2つの拮抗する作用を持つ。日射によって水温成層が生成し貧酸素化が促される。他方、DO変化に日変動が現れており、水中での光合成によるDO供給が大きいと推定される期間があった。

(2) DO変化のパターン分類

上で示したように、DOの挙動を支配するもっとも大きな要因は塩分濃度である。そこで、DO・塩分の単相関分析の結果(図一五)に基づいて現象論的なパターン分類を行うと、1) 高塩分濃度・高DO(SH)、2) 高塩分濃度・低DO(SL)、3) 低塩分濃度・高DO(FH)、4) 低塩分濃度・低DO(SL)の4つに分けられる。この中で、図一五から分かるとおりSHパターンは出現しない。すなわち塩分濃度が9 psuを越えた条件下で底層のDOが5 mg/l以上になることはないことが分かる。

次に、それぞれのパターンがどのようなメカニズムで発生するかを検討した。

a) 塩分浸入型：SLパターンが発生するメカニズムは次のようにまとめられる。湖沼湖内に塩分が浸入すると、底層付近に高塩分水塊が停滞し密度成層が形成される。その結果、塩水の浸入発生後2～4日かけて徐々に底層水中のDOが消費され、貧酸素水塊が生まれる。逆に、塩水塊の消滅とともにDOも回復、貧酸素化が解消される。

b) 水塊移動型：塩分濃度とDOの観測時系列データに、塩分浸入型と比較して短期間にDOが大きく変化する変動が見られる。この現象は、風向や風速が変化・増大する時点に対応していることから、風によって誘起された吹送流(底層では補償流)によって、湖内の別の場所にあった水塊が観測点に輸送されてきたものと考えられる。そうであれば、このDO変動は、実質的なDOの増減ではなく湖内における水塊移動の結果ととらえるべきものである。こうした塩分濃度とDOの突発的な急変現象はSL(DO低下)とFH(DO回復)パターンの中に含まれる。

c) 淡水停滞型：残されたFLパターンは、塩分濃度が低い時期に2～3日かけて徐々にDOが低下し貧酸素化する現象である。塩分濃度が低い時期に貧酸素化が発生するので、塩分濃度は原因とはなり得ない。そのかわり、風や流れが弱い時期には、日射による水温成層が重

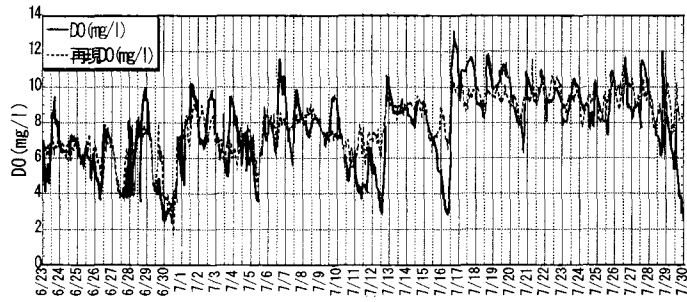


図-6 DOの観測値と重回帰モデルによる再現値の比較

要な役割を果たし、底層水塊が停滞して貧酸素化が発生する。

対象期間のDO観測時系列データにあてはめた結果、涵沼におけるDOの変化、とくに貧酸素化は、上で示した3つのメカニズムによっておおそ説明できることが分かった。

(3) 重回帰モデルによる要因間の寄与

これまでの解析で注目した環境要因は、DO変化に対してそれぞれどの程度の寄与率を持つのであろうか。それを解析するために、DO時系列データを目的変数、環境要因を説明変数とする重回帰分析を行った。取り上げた環境要因は、塩分濃度、水温、風速のNS成分、降水量、日射時間、潮差、那珂川の水位である。

重回帰分析によって再現した箕輪沖底層のDOと実際の箕輪沖底層のDOを図-6に示す。この期間では相関係数が0.76と高く、取り上げた要因で観測時系列の基本的傾向を再現できていることが分る。しかし、振れ幅のおおきいDOの変化は十分表現されていない。

また、3つの期間に分けて各項目の寄与率を表したの

が図-7である。重相関分析の結果から、いずれの期間も塩分の寄与がもっとも大きいことが分る。また6/23~7/29、9/16~10/2の2期間は比較的再現性が高い(相関係数0.76、0.71)。また、6/23~7/29のDO変動に及ぼす寄

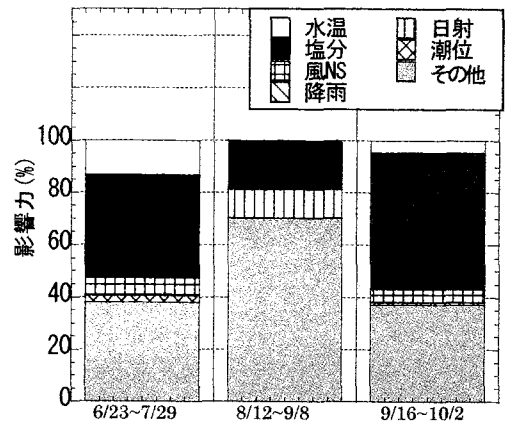


図-7 DO変動に対する各要因の寄与

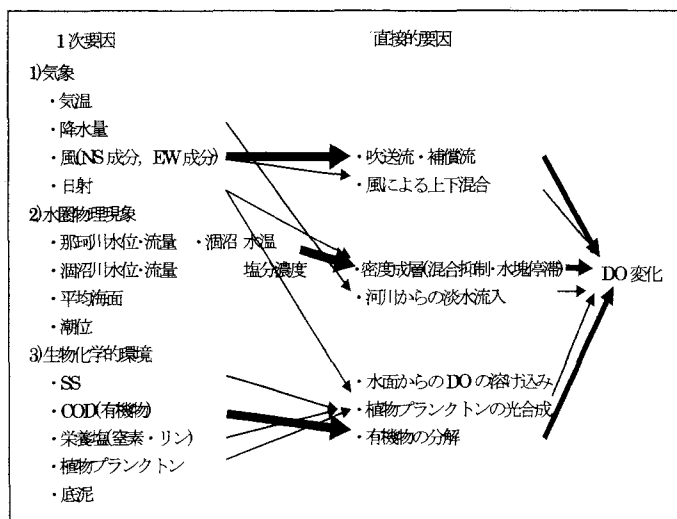


図-8 DO変動に関連する要因の相互関係

与率の大きさは、塩分濃度、水温、風速 NS 成分、潮位、の順になっており、9/16~10/2 では塩分、風速 NS 成分、水温、降雨、日射、潮位の順である。一方、8/12~9/8 に関しては相関係数が低く、これらの要因では十分説明できないという結果であった。この期間に関してはその他の要因が影響していると考えられるが、それが何かについては今回の解析では解明できなかった。

以上の結果から、潟沼における DO の変動に対して寄与の大きい環境要因は、塩分、水温、風の NS 成分の順であると考えられる。また、日射と降雨にはさほど大きな寄与は見られなかった。

これまで議論してきた要因を中心に環境要因と DO 変化との関係を整理すると、図-8 のように模式的にまとめることが出来る。この中で、太い矢印は潟沼の DO 変動に特に強く影響を与えるプロセスである。1 次要因としてあげられるのは気象、河川流、潮汐、さらに生物化学的環境であり、それが、DO の消長に対する直接的要因をコントロールしている。直接的要因の中で、潟沼において大きな寄与率を持つのは、密度成層(混合の抑制、水塊停滞)、吹送流・補償流、有機物の分解であった。

5. 結 論

今回の研究によって得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 潟沼は極めて浅いため、貧酸素水塊は湖底ごく近傍のみに形成される。平面分布は湖底地形と強い関係があり、水深 2.5 m 以上の範囲にとどまる。

(2) 潟沼における貧酸素水塊形成の最大の要因は、塩分・水温による密度成層の形成であり、特に間欠的な塩分浸入の影響が卓越している。

(3) 塩分濃度が低い時には、水温、風(NS成分)の影

響が大きく、降水量、日射の影響は相対的に小さい。

(4) ヤマトシジミの産卵及び初期発生には適当な塩分が必要のため湖内への塩水の導入が検討されている。しかし、塩水導入は貧酸素水塊の形成をもたらす危険性があり、他の底生生物への影響が懸念されるため、影響や導入方法について十分に検討する必要がある。

本研究は、茨城大学、茨城県内水面水産試験場、独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所の3機関共同で実施したものであり、データを使用させて頂いた水産工学研究所の桑原久実、齋藤肇、中村義治の皆様には感謝したい。また、現地観測に当たっては大潟沼漁業協同組合のご理解と援助を頂いた。本研究は、日産財団学術研究助成(代表者:安原一哉茨城大学教授)及び平成15年度文部科学省地域連携特別推進事業の援助を頂いた。これらの援助に対しても心から感謝したい。

参 考 文 献

- 茨城町史編さん委員会 (1993): 茨城町史 地誌編, 茨城町。
- 桑原久実・齋藤 肇 (2003): 下流潟沼川におけるヤマトシジミ浮遊幼生の挙動特性, 海岸工学論文集, 第 50 巻(2), pp. 1106-1110.
- 信岡尚道・三村信男・根本隆夫・布目彰一・齊川義則・大竹佑馬 (2003): 汽水湖への塩分浸入の過程と条件—茨城県潟沼川・潟沼を対象にして—, 海岸工学論文集, 第 50 巻(1), pp. 401-405.
- 三村信男・信岡尚道・三日市圭史・布目彰一・横木裕宗・根本隆夫 (2002): 水質改善に向けた感潮支川・湖沼の塩分動態の解析—潟沼川・潟沼を対象にして—, 海岸工学論文集, 第 49 巻(1), pp. 336-340.
- 吉野哲平 (2004): 貧酸素水塊に着目した潟沼の環境解析—DOの挙動と支配要因—, 茨城大学大学院理工学研究科修士学位論文, 99 p.