

溶存酸素回復による湖沼環境の改善に関する研究

Environmental restoration of lake bottom by oxidation

島谷幸宏*

○保持尚志*

Yukihiro Shimatani

Takashi Yasumochi

ABSTRACT

The pollution of the water quality with the eutrophication is a problem in shallow lakes and marshes. Especially, oxygen shortage in the bottom layer causes rendering down, doing of nourishment from the bottom mud, and the smell to be generated.

The bottom mud consumes the melting oxygen in the lake. And, living thing's inhabiting becomes difficult. The problem is lack of the melting oxygen. A desirable environment is made if there is more melting oxygen.

We examined the method of supplying oxygen to the bottom layer region. We devised the method of sending water which abundantly contained the melting oxygen with the pump and pipe lying on the bottom. We examined the practical use by using the simulation calculation. As a result, the result that we were practicable was obtained.

KEYWORDS: restorate, oxidation, lake environment, melting oxygen.

1. はじめに

比較的浅い湖沼において、富栄養化に伴う水質汚濁現象、特に藻類の発生による透視度の低下、COD値の上昇などが問題視されている。その原因の一つに底泥からの栄養塩の一つであるリンの溶出があるといわれている。リンは、特に湖の低層域が嫌気化したとき湖水中に溶出し、藻類の増殖に利用される。このような底泥はまた、黒色化するなどして見た目が悪く、さらに嫌気発酵による臭いの源となったり、低層域での生物の生息を困難にするなど問題が多い。

これらの問題の多くは溶存酸素の不足という点に集約できる。溶存酸素が豊富に存在する状況下では、リンの溶出は抑制され、臭いの問題も発生しない。湖の低層域および底泥は好氣的な状況となり、好ましい環境が作られると考えられる。

本論文では溶存酸素の回復を図ることが好ましい湖沼環境の創造・保全につながるとの観点から、底層域への酸素供給のための手法について検討した。

まず霞ヶ浦と中海における底層域での貧酸素状況について、既往文献、現地調査結果などから把握したことを述べる。次に底層域への酸素供給のための手法として、溶存酸素を豊富に含んだ水を底層にポンプで送り込む方法を考え、その実現性について数値シミュレーションにより検討を行った。

2. 霞ヶ浦と中海における溶存酸素環境

実際に富栄養化など水質悪化が問題となっている湖における溶存酸素環境について、淡水湖の霞ヶ浦、汽水湖の中海を対象として述べる。

2.1 霞ヶ浦における溶存酸素状況

霞ヶ浦における溶存酸素状況について、既往調査から検討した。建設省霞ヶ浦工事事務所が行った霞ヶ浦の水質観測結果(平成6年1月～7年3月・調査地点湖心)を整理したところ(図-1～2)、7月～11月の水温の高い時期と同時期に、底層での溶存酸素濃度が減少している状況が見

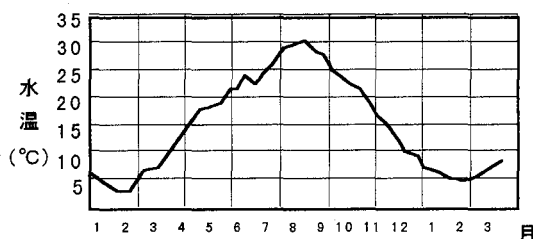


図-1 水温の変化

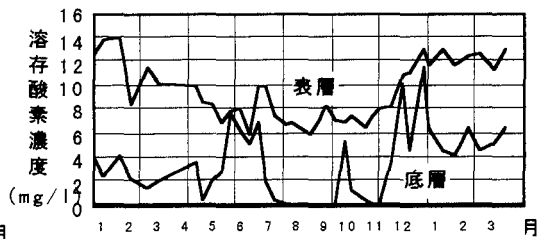


図-2 溶存酸素濃度の変化

られた。また図-3に同じデータから湖底直上の溶存酸素飽和度が10%を下回った時の鉛直プロファイルを示した。特に湖底付近の溶存酸素濃度が低いことが分かる。石川らは1)、夏期の霞ヶ浦では水温の日躍層が発生し、この躍層を壊すほどの風がない状況が連続すると湖底付近の溶存酸素量が減少し、リン酸態リン濃度が上昇すると報告している。石川の調査結果によると、霞ヶ浦湖心において、風により上下層が混合してから後3日間で、底泥直上の溶存酸素濃度は約9 mg/lから1 mg/l以下へと減少し、リン酸態リン濃度は1 mg/l以下から4 mg/lへと上昇している。

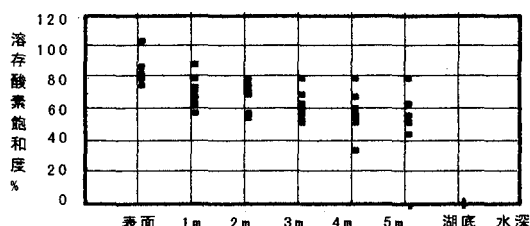


図-3 酸素飽和度の鉛直分布

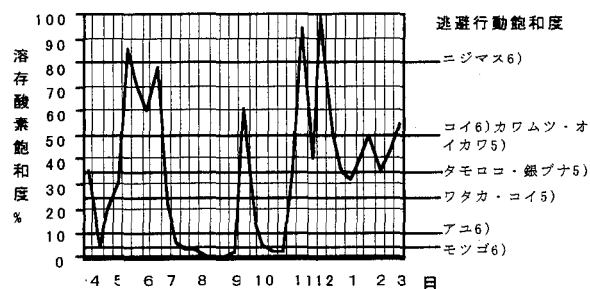


図-4 底層の溶存酸素飽和度と魚類の逃避行動

藻類増殖の原因となる栄養塩のリンは湖底に堆積する底泥から溶出する。その溶出速度は、その底泥直上水の溶存酸素量が少ないほど大きいことが知られている。(例えば細見ら2))。また河合らは、底泥の表面に発生する酸化層の有無がリンの溶出を制御すると述べている3)。酸化層の有無は、その直上の溶存酸素量によると考えられる。霞ヶ浦の観測結果を考え合わせると、この時期にはリンが溶出していることが予想され、石川らの調査結果はこれを裏付けるものとなっている。

平成6年度における霞ヶ浦底層域の溶存酸素濃度の75%値は0.4 mg/lとかなり低く、また環境基準C類型に相当する2 mg/lを下回ったのは平成6年度に33回測定した内14回(42%)有った。環境基準における2 mg/lの根拠は嫌気発酵による臭気限界である4)ことからみて、霞ヶ浦の底層域における溶存酸素環境はかなり悪い状況にあるといえよう。

図-4に底層域の溶存酸素飽和度と、数種の魚における逃避行動が見られた溶存酸素飽和度の関係を示した。山元5)の実験によると貧酸素水域からの逃避は水温27度において、カワムツ・オイカワで飽和度50%、タモロコ・銀ブナで35%、ワタカ・コイでは25%で始まったとしている。また本田ら6)は水温14度または19度で実験した結果から、逃避行動が見られた溶存酸素飽和度はそれぞれ、ニジマスで80%、アユ10%、コイ50%、モツゴ5%であったとしている。

霞ヶ浦の平成6年度観測結果でみると、底層域で溶存酸素飽和度が80%、50%、35%、25%、10%、5%を下回ったのは33回測定した内、それぞれ30回(91%)、23回(70%)、16回(48%)、14回(42%)、11回(33%)、9回(27%)であった。水温の条件が異なるため厳密な比較はできないが、魚類の生息にとって湖底の溶存酸素環境は決して良好なものとはいえない。

2. 2 中海における溶存酸素状況

次に中海米子湾における溶存酸素の状況について筆者らの調査結果からみる。調査は米子湾の

A-1、A-2地点の計2点において平成8年8月9日と9月4日に行った。A-2は幅約100m長さ約500mにわたって浚渫後の窪地で水深が深くなっている箇所があり、窪地内で貧酸素水塊が発生するといわれている。A-1は窪地周辺の湖底面である

調査結果にもとづきA-2の窪地内の水質がA-1と比較してどのような違いがみられるか、また8月9日から9月4日間での間に、どのように変化したかについて検討した。

図-5にA-1、A-2地点の8月9日の溶存酸素濃度と電気伝導度、水温の状況を示した。A-1地点水深は観測時に2.9m、一方A-2の窪地では7.17mと約4m深かった。溶存酸素濃度は表層域ではA-1は10.4mg/l、A-2は10.1mg/lだが、A-1の底泥直上の水深2.8mでは3mg/lとごくわずかに存在するだけとなり、A-2の3m以深の窪地内では0mg/lで全くの無酸素状態にあった。水温の変化をみるとA-1、A-2地点とも水深2mから2.5mにかけて、A-2地点ではさらに3mから3.5mにかけてその変化に段差がみられ、躍層が発生しているとみられる。窪地の下層での水温は水面の約30度に対して、約17度とかなり低かった。また電気伝導度は水温と同じ変化を示しており、窪地の下層は66.3mS/cmで表層の40.5mS/cmよりも高い値を示した。

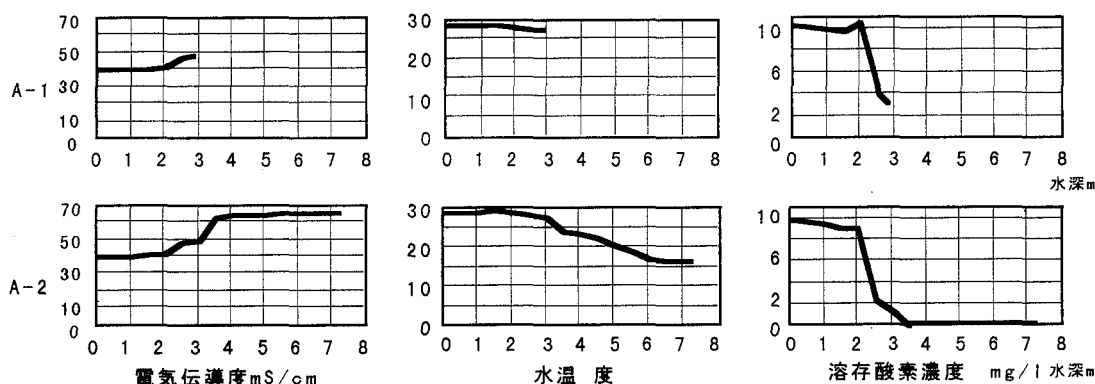


図-5 A-1、A-2地点の8月9日の電気伝導度、水温と溶存酸素濃度

つぎに図-6にA-2地点における9月4日の溶存酸素濃度と塩分濃度、水温の状況を示す。水温、塩分濃度についてみると、8月9日のようなはっきりした躍層はみられず、表層と低層での濃度勾配が緩やかになっていることがわかる。その理由については十分な考察はできないが、拡散現象、8月14日頃に中国地方を通過した台風12号の影響、8月から9月にかけての気温の低下等によるものと思われる。一方、溶存酸素についてみると水深3m以深での無酸素状況はまったく変わりが無い。また水深3m以浅でも全体に濃度が低下しており、貧酸素状態の範囲が広がっていることがわかる。これらから、中海米子湾内の浚渫後窪地では、若干の拡散などによる上下層の物質・熱移動はあるが、塩分と水温の躍層が発生するなどして低層域の水は動きにくくなっている。そして低層域の溶存酸素濃度は低く、特に窪地内の溶存酸素濃度は夏期にはおおむね0に近い状態にあると思われる。

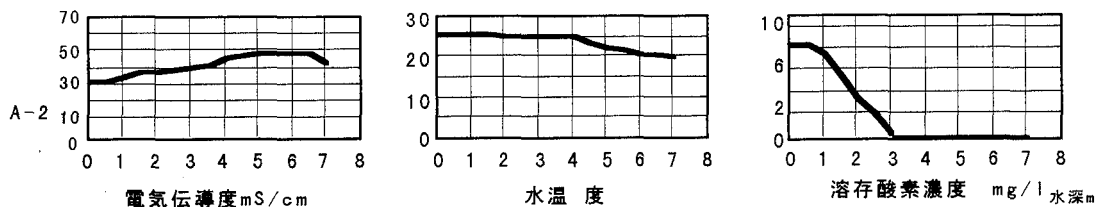
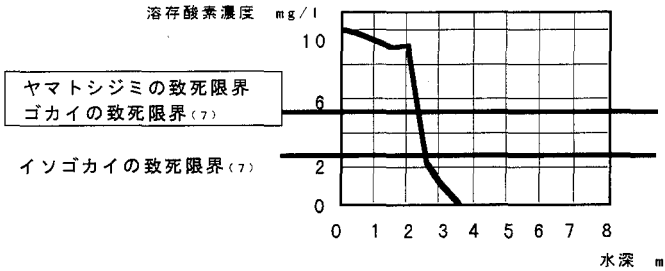


図-6 A-2地点における9月4日の溶存酸素濃度と塩分濃度、水温

図-7に文献7)から生物に対する溶存酸素濃度の影響について、ヤマトシジミ、ゴカイ、イソゴカイを抜粋し、溶存酸素濃度調査の結果(A-2地点、8月9日調査)を併せて示した。これから中海米子湾の溶存酸素は、水深2.5m以下ではいずれの生物に対しても溶存酸素濃度は、致死限界値

を下回っていることがわかる。

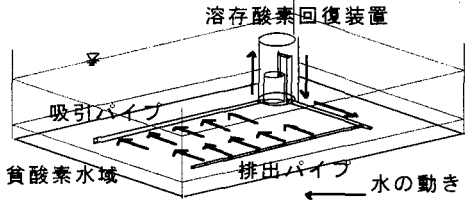
以上のように、霞ヶ浦、中海湖底の溶存酸素環境は良好ではないといえる。湖底付近の湖水へ酸素を供給し貧酸素状況を改善することが、リンの溶出を抑制し、魚類・好気性生物の生息を可能にするなど湖の環境改善につながると考えられる。



図－7 生物に対する溶存酸素濃度の影響⁷⁾

3. 湖における底層への酸素供給法の提案

さて筆者らは、低層の貧酸素層状況を改善するため、湖底に敷設したパイプによって溶存酸素濃度の高い水を供給し、底層域の溶存酸素濃度を高める手法について検討した(図－8)。本手法では塩分躍層や水温躍層のある湖でも、底層の塩水または冷水を吸引し酸素を供給して戻すことで、底層域の溶存酸素濃度を効果的に回復させることが可能と考えられる。



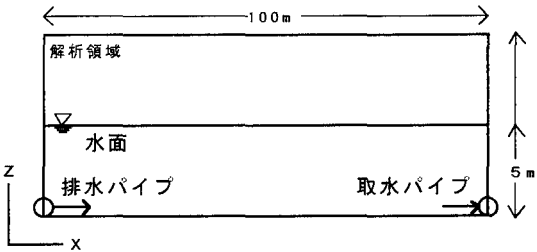
図－8 水循環装置イメージ図

4. 水の流れに関するシミュレーション

湖底にパイプを敷設し酸素濃度の高い水を送り込んだとき、貧酸素層の溶存酸素濃度はどのように変化するか、数値解析をおこない検討した。

4.1 計算条件

図－9に解析モデルを示した。解析領域として水深10m、幅100mの断面2次元モデルをデカルト



図－9 解析領域

座標系で作成し、計算格子は領域両端が細かい不等間隔で104×101に分割した。そのうち今回の解析では水深5mを設定し、5×100mの水域について計算した。水面および領域側面は対称境界条件とし、湖底面は粗度係数 $n=0.022$ を与えた。乱流モデルは $K-\epsilon$ 2方程式モデルを使用した。領域両端の底部にパイプ(直径0.5m)を設置し排水パイプの側面(幅0.25m)から横向きに実験ケースにしたがって、一定の流速、水温で水を噴き出させ、取水パイプから同流速で吸引させた。溶存酸素濃度はパイプの側面は幅0.25mのうち設定した割合(面透過率)だけ開口しているものとした。酸素消費については水、湖底とも考慮していない。なお、本数値解析はアプリケーションソフトウェア「 α -FLOW」((株)富士総合研究所製)の非圧縮性流体解析モジュールを使用して行った。

解析は3つのケースについて行っ

た。表－1に計算ケースを示した。

ケース1は送り込む水の水温を低層域の水温と等しくして、比較的大量の水を吐出させたものである。ケース2と3は送り込む水の水温を低下させ、吐出量を減らし、水を湖底に這わすことを考えた計算ケースである。

表－1 計算ケース

計算ケース	吐出流速	面透過率	1haあたり流量	水温
1	10cm/s	0.5	1.25m ³ /s	25
2	0.4cm/s	0.5	0.05m ³ /s	24
3	0.4cm/s	0.1	0.01m ³ /s	24

初期条件として、X、Z方向の流速0 cm/s、さらに図－10に示した温度分布、溶存酸素濃度分布を与えた。この初期条件は霞ヶ浦で観測された一例である。 ケース1は約10時間分、ケース23は約50時間分の計算を行った。

4.2結果

図-11～13に溶存酸素濃度の経時変化を示した。なお図では縦方向を10倍して表示してある。

ケース1の場合(図-11)、底層の貧酸素層が急速に消滅していくことが分かる。排水パイプから50mまでの濃度は4時間経過後に8mg/lに上昇しているが、それ以降は若干時間がかかっていることがわかる。50mまでは移流が支配的、それ以降では乱れによる拡散が支配的になって酸素濃度が変化しているものと考えられる

ケース2(図-12)、3(図-13)の場合には送り込んだ水の水温は低層の水温より1度低く、水が底を這う状況が見られる。いずれのケースでも酸素濃度の高い水は低層から約50cmまでの範囲に滞留し、その上に貧酸素塊が残存する様子が見られた。50時間後の低層域の酸素濃度はケース2では約8mg/lまで、ケース3は約6mg/lまで上昇した。

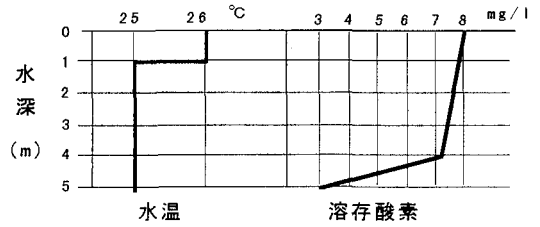


図-10 初期条件

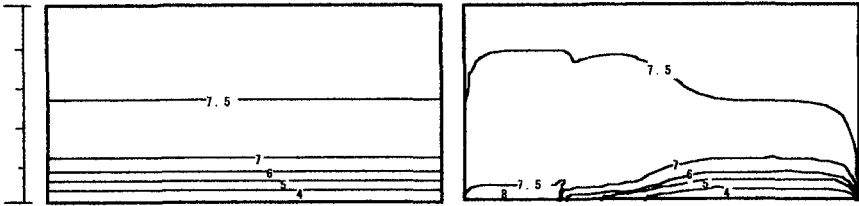


図-11.1 0時間後の溶存酸素濃度分布 図-11.2 2時間後の溶存酸素濃度分布

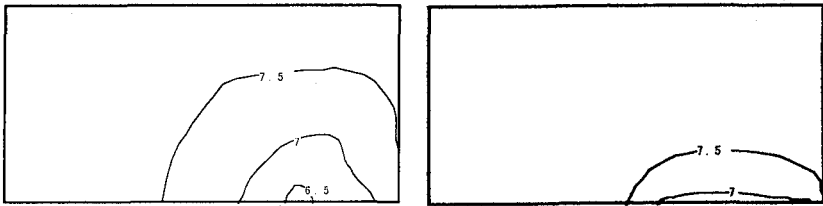


図-11.3 6時間後の溶存酸素濃度分布 図-11.4 10時間後の溶存酸素濃度分布

ケース1は1haあたり1.25m³と流量が多く、貧酸素層を押し流すような状況になる。湖沼全面にこの水量を流すことは現実的ではないが、間欠的におこなう、特に問題となっている一部におこなう、等の運用法が考えられる。ケース2、3はケース1にくらべて流量が少なく、常時流し続けることで、効果的に低層域の溶存酸素濃度を回復させることができると思われる。ただし、水温を冷やす方法については課題が残る。今回の計算では初期条件として貧酸素層を設けたため、ケース2と3では貧酸素水塊が残存したが、風などによる混合によって貧酸素層が破壊された直後から運用することを考えるならば問題にはならないだろう。

以上の検討より、本手法により低層域の溶存酸素濃度を回復、維持させることができると考えられる。ただし、流量なども含めたシステムの運用方法については、酸素消費、湖流、風による乱れなども考慮した検討が必要であろう。

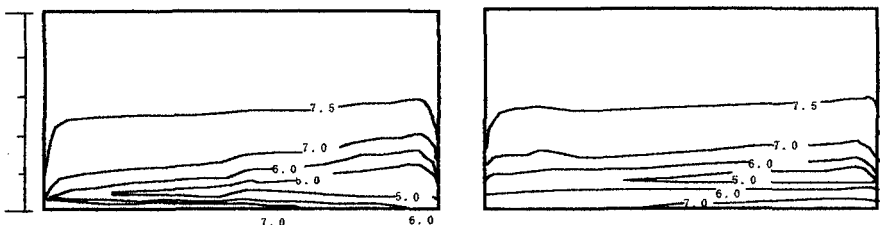


図-12.1 5時間後の溶存酸素濃度分布 図-12.2 10時間後の溶存酸素濃度分布

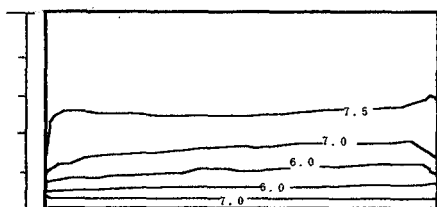


図-12.3 30時間後の溶存酸素濃度分布

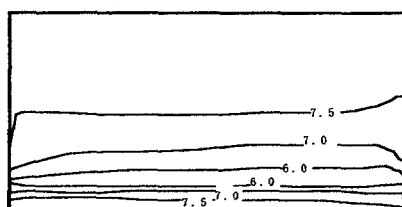


図-12.4 50時間後の溶存酸素濃度分布

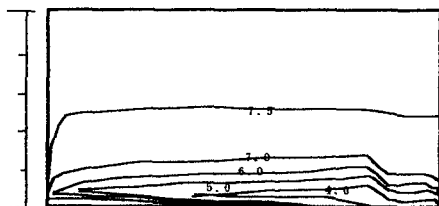


図-13.1 5時間後の溶存酸素濃度分布

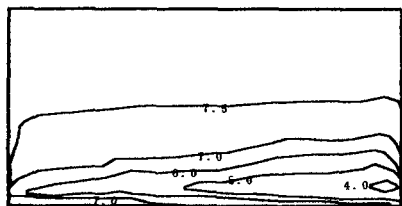


図-13.2 10時間後の溶存酸素濃度分布

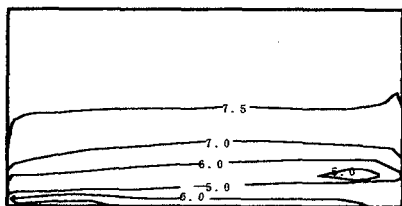


図-13.3 30時間後の溶存酸素濃度分布

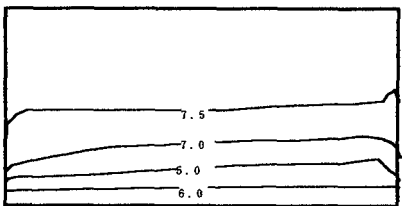


図-13.4 50時間後の溶存酸素濃度分布

5. まとめ

いままです湖沼の富栄養化問題は、栄養塩類の供給過剰という観点から把握されており、負荷の削減が主な目標となっていた。このため対策として流入負荷の削減、湖底泥の浚渫が行われてきた。よって栄養塩類が不溶化するような対策はいままで十分考えられていなかった。一方、湖底層の貧酸素環境についても、リン溶出や水産の観点から問題視されつつも、その対応については十分に議論されていないように思われる。

筆者らは、霞ヶ浦をはじめとして多くの湖沼において、低層域が貧酸素化している状況をみて、そのような貧酸素状況を改善し、生物の生息環境などを回復する必要があると考える。溶存酸素濃度を回復させることで、リンの不溶化による水質浄化や、好ましい生態系を回復することが可能であると思う。

技術的に検討すべき点は多いものの、本検討において水を底層に送り込むことにより、溶存酸素濃度を向上させ、湖沼の環境が改善される可能性が高いことが分かった。今後検討するべき事項として、研究的には酸素濃度の回復による効果の評価や送り込む水の質・量に関して、技術的にはこのようなシステムの構築に関して、実用化という面からはコストに関して、などが挙げられよう。

参考文献

- 1) 石川: 霞ヶ浦の日成層・日成層研究の序, 東工大 土木工科学研究報告, No40, p69-p82, 1989.
- 2) 細見, 須藤: 霞ヶ浦底泥からの窒素及びリンの溶出について, 国立公害研究所研究報告, 51号, p191-p217, 1984.
- 3) 河合, 大槻, 相崎, 西川: 底泥からのリンの溶出機構, 国立公害研究所研究報告, 51号, p219-p240, 1984.
- 4) 水質法令研究会編集: 水質汚濁防止法の解説, p84, 中央法規出版, 1988.
- 5) 山元: コイ科魚類6種の低酸素下における逃避行動, 水産増殖, No2, p129-132, 1991.
- 6) 本田, 清野: 低溶存酸素水に対する淡水魚の行動, 生物研究所, 1984.
- 7) 平野編: 漁場環境容量, p41, 恒星社, 厚生閣, 1992.