

川原大池における水質変動特性と 底泥からの栄養塩溶出について

THE CHANGE OF THE WATER QUALITY AND NUTRIENT RELEASE FROM BOTTOM SEDIMENT IN KAWAHARA LAKE

古本勝弘¹・竹本陽一²・蒔田明弘³・立石ヒロ子³

Katsuhiko FURUMOTO, Youichi TAKEMOTO, Hiroaki MAKITA and Hiroko TATEISHI

¹正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8131 長崎市文教町1-14)

²学生会員 長崎大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (〒852-8131 長崎市文教町1-14)

³長崎県食品環境検査センター (〒851-2127 西彼杵郡長与町高田郷3640)

The nutrient release from bottom sediment in a lake occurs under anoxic condition in the hypolimnion, and influences the water quality in the whole lake. The purpose of this study is to make the influence of bottom sediment on water quality clear. Annual change of water quality in Kawahara Lake was investigated, and laboratory tests and field tests to clear the consumption of dissolved oxygen and nutrient release were carried out. From the test data, the oxygen transfer coefficient and the nutrient release rate were discussed. By comparison the test results between the change of water quality in Kawahara Lake, the efficiency of the tests was confirmed.

Key Words : Bottom sediment, Nutrient release, Dissolved oxygen consumption, Eutrophication

1. はじめに

湖沼における水質は、流入水の水質、底泥に蓄積された物質の溶出、プランクトンに代表される生物活動、湖内の流動などに関係して変動する。特に、春先から夏期にかけて水温成層による鉛直循環が抑制される時季には、底層水の貧酸素化とこれに伴う底泥からの栄養塩や金属イオンの溶出が起これ、またプランクトンの増殖で水質は悪化する。近年、湖沼や閉鎖性水域の環境保全や親水性向上を目指して底泥の影響に注目した多くの実験研究^{1), 2), 3), 4)}や現地調査^{5), 6)}あるいは水質シミュレーション^{7), 8)}が行われている。しかし、湖沼ごとに水質特性、流動特性、底泥の性質は異なり、湖沼水を利用するためには水質の変動を実測し把握しておく必要がある。

ここで対象とした川原大池は、地元の町が新たな水資源として候補に挙げ検討を始めたもので、小規模な上に富栄養化がかなり進んだ湖であるために、その浄化法とともに利水するにあたっての問題点を明らかにすることが求められている。本論では、川原大池における年間の水質変動の調査結果と水質に与える底泥の影響を明らかにするためにに行った室内実験及び現地試験の結果を併せ

て示し、酸素移動係数と栄養塩溶出Fluxについて検討した。

2. 現地調査

(1) 川原大池の概要

川原大池(図-1)は、砂嘴の成長で入江が閉塞してできた海跡湖で、満水時の貯水量 71万m³、水面積 0.127km²、最大水深9m、流域面積 1.74 km²をもつ比較的小さな湖である。湖には池田川のみが注ぎ、湖水は末端の水門(敷高TP 1.47m)から越流し、水位は一定に保たれている。流域は僅かの果樹栽培の他は森林であり、人工的な汚濁負荷は少ない。

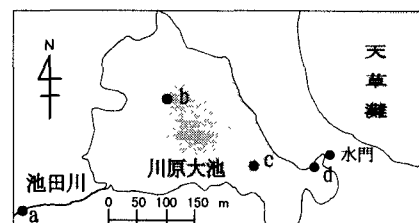


図-1 川原大池略図

(2) 水質調査

年間の水質変動を把握するために1997年10月から1998年8月にかけて月一度の頻度で調査した。

水質調査は、b、c地点の表層(水面から1m)、中層(水面から4.5m)、底層(底から1m)及び流入河川の池田川(a地点)で採水し、全窒素、全リン、溶存酸素量(DO)等全19項目にわたって調査した。また、DOについては、DOメータ(UK-2000型、セントラル科学(株)製)を用いてその都度鉛直分布(1m間隔)も測った。

水温はc地点に水温センサーを1.5m間隔で6点に垂下設置し、30分毎にデータロガー((株)IBC製)に自記記録させた。

(3) 調査結果

水質について、b、c地点の水質に顕著な差異がないので、ここではc地点の水質結果のみを掲載する。また、紙面の関係上、19項目の水質検査結果のうち、図-2に水温(a)、DO(b)、全窒素(c)、全リン(d)、クロロフィルa(e)を示す。

a) 水温成層に伴うDOの経時変化

図-2より、夏期の水温成層は10月中旬には解消し、以後最低水温となる2月初旬まで湖内は循環期にあり、徐々に水温を低下させる。成層は2月中旬から始まり、8月中旬で表層と底層の温度差は15℃以上となる。DOは10月中旬から2月にかけてほぼ全層一様となり飽和度90～110%で推移する。4月～9月にかけて表層のDOは飽和度100%以上に存在するものの、中・底層で減少し、底層ではほぼ無酸素状態となる。

b) 水質変化について

図-2より、循環期の全窒素、全リン濃度は全層ほぼ一様で、低濃度であるが、4月以降8月にかけて底層の濃度はDOの減少に伴って増加し、湖沼の環境基準V類型よりも高濃度化する。ピーク時の濃度は水温成層が解消されている時期と比べ4倍を超える濃度である。これは、水温成層が発達し表層水から底層水への酸素供給が抑制され、かつ底泥中および浮遊の有機物分解により溶存酸素が消費されて貧酸素状態となると、嫌気性微生物の働きによって、底泥中の栄養塩物質が溶出してくるためと考えられる。また、表層においても3月以降全窒素、全リンに濃度増加がみられる。これは表層におけるクロロフィルaの変化と対応していることから、底泥からの溶出による影響ではなく、植物プランクトンの消長による考えられる。これは、底層水がアンモニア態窒素とリン酸態リンの濃度が高いのに対して、表層水はこれら物質量が低濃度であることから判断できる。植物プランクトンは、日射量により強光障害を受けると言われており⁹⁾、7～8月、水温が30℃を超える表層のクロロフィルaは低く、これに伴い全窒素、全リンともに低い。流入河川水は全リンは低いものの、全窒素については年間を通してかなり高い値を示す。富栄養化レベル¹⁰⁾は富栄養

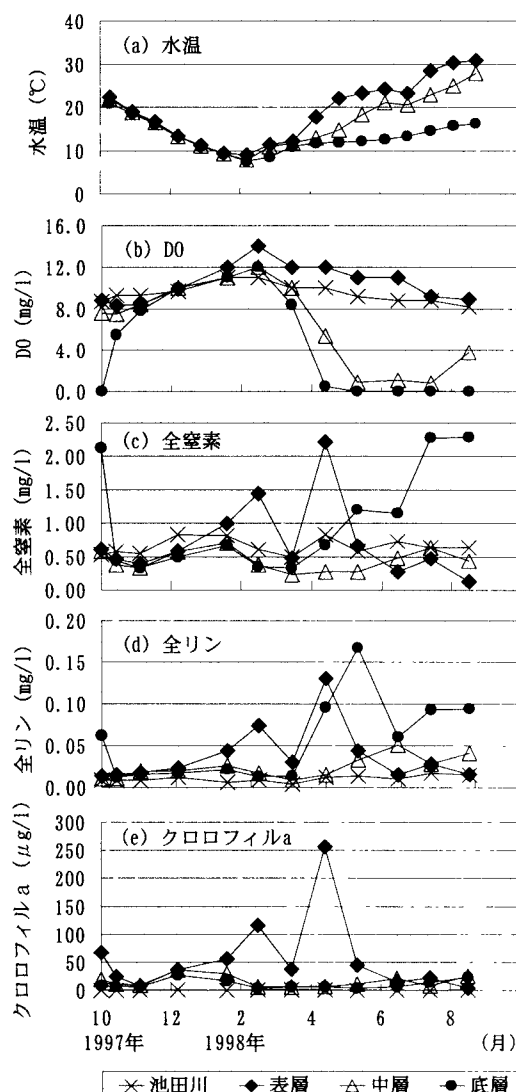


図-2 各層の水温(a)、DO(b)、全窒素(c)、全リン(d)、クロロフィルa(e)の経時変化

(全窒素: 0.5～1.3mg/l、全リン: 0.035～0.1mg/l、クロロフィルa: 8～25 μ g/l)とされる段階にある。

3. 室内実験

(1) 実験の概要

酸素消費過程と底泥からの栄養塩の溶出過程を調べるため室内実験を行なった。本実験では長期に亘って実験を行い、貧酸素状態後の栄養塩の溶出過程に注目して調べた。また、流速及び水温の違いによる影響についても調べた。

実験にはb地点の底泥および底層水を実験毎に採取(1997年10月(Run1)、同年11月(Run2)、1998年2月(Run3))したものを用いた。水質検査項目は、DO、全窒素、全リン、他4項目である。使用した底泥の分析結果を表-1に示す。

CODsed (mg/g)	硫化物 (mg/g)	強熱減量 (%)	全窒素 (mg/g)	全リン (mg/g)
73	2.72	11.2	1.1	0.7

表-1 底質分析結果

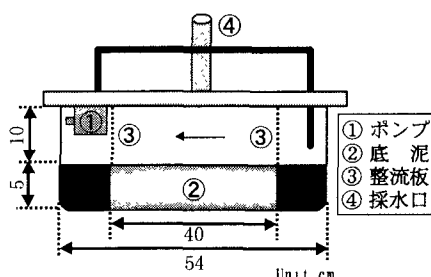


図-3 実験水槽断面図

表-2 実験水槽容量

	水の体積 (ml)	底泥の表面積 (cm ²)	流速 (cm/s)
水槽A	4900	320	1.27
水槽B	4200	240	1.70
水槽C	6300	底泥なし	1.02
水槽D	13600	880	0.46

a) 実験装置

図-3は実験水槽の断面図で、水槽を幅の異なる4つの槽に仕切り、それぞれの槽に設けた鑑賞魚用水中ポンプで循環させ、流速差のある実験を可能とした。水質検査のための採水は採水口より行う。表-2に4つの実験水槽の容量と流速を示す。実験水槽は恒温水槽中に沈め、温度制御している。

b) 実験方法

湖内b地点で採取した底泥をこね返して水槽内に敷き詰め、曝気して飽和状態にした現地採取の底層水をその中に注ぎ、水槽中に空気が入らないよう完全密閉した後、恒温水槽に沈め、暗条件とし、ポンプで一定の流速を与えて循環させた。DOは上部の採水口からDOメータを挿入して計るとともに、150ccを採水し水質検査した。実験は水温の影響を見るために現地底層水温の変化する範囲で温度の異なるRun1(18℃)、Run2(12℃)、Run3(7℃)の3回、その都度底泥を更新して行った。また、Run2、3では水槽Bは曝気して実験を行った。

(2) 実験結果

3回の実験によって得た結果のうち、Run1、2のDO、全窒素、全リンの経時変化のみを掲載する。

a) Run1(18℃)

図-4のDOの経時変化より、底泥上の流速の差はDOの変化にほとんど影響を与えていない。また、栄養塩の溶出にもほとんど流速の影響は認められない。DO消費と栄養塩溶出は底泥上の流速に関係することは細井ら¹⁾、中村ら³⁾により示されているが、本実験のような底泥を

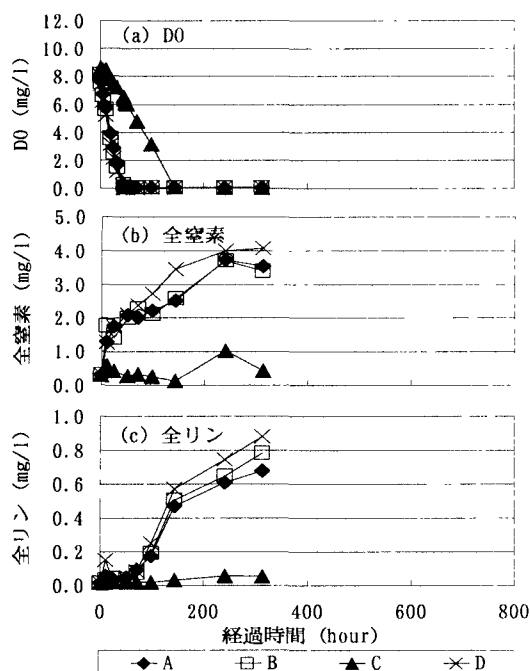


図-4 各水槽のDO (a), 全窒素 (b), 全リン (c) の経時変化 (Run1)

全く巻き上げない遅い流速ではその影響を捉えにくいものと思われる。底泥を入れない水槽Cでも、DOの消費は遅いものの起こっており、SSによる酸素消費が認められる。また、水槽Cの栄養塩増加はないことから、他の槽の栄養塩の供給源は底泥といえる。全窒素は注水直後から溶出があり、DOが低下する以前の溶出速度の方が貧酸素下のそれよりも大きい。一方、全リンは貧酸素下でなければ溶出は起こらないことが分かる。

b) Run2(12℃)、Run3(7℃)

Run1、2では、底泥を入れた水槽Bに連続的に曝気を行い酸素を供給したほかはRun1と同様で、水温を下げて実験を行った。図-5にRun2の実験結果を示す。当然水槽BのDOの減少はみられないが、他の槽のDO消費速度はRun1(18℃)よりかなり遅くなる。栄養塩の溶出は、Run1の時間軸を2倍強引き延ばした様子にほぼ一致する。ただし、曝気を加えたB槽では全窒素の溶出が初期に起こり時間的濃度増加はあまり見られない。いずれの槽も全窒素はピーク濃度に達した後漸減する。この理由は、脱窒菌の働きで窒素ガスに変換され揮散することが考えられるが、高精度の詳細な実験が必要である。全リンについては、曝気したB槽の濃度上昇は認められず、リン溶出は貧酸素環境下のみで起こることが確認できる。

Run3では、図-5(Run2)の時間軸を更に引き延ばした形状に近く、全窒素・全リンのピーク濃度に達する時間は約1300時間となっている。

3回の実験により水温による影響は明らかであり、水温の低下によって、DOの消費速度及び栄養塩の溶出速度はともに遅くなる。これは、生物化学的活性が温度に

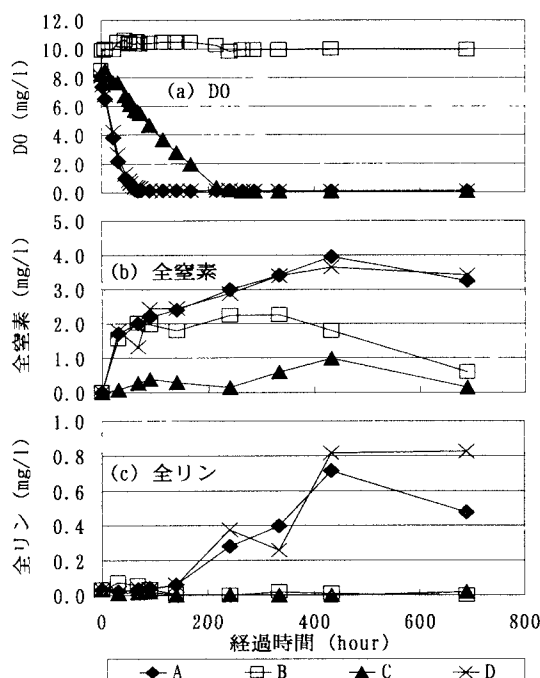


図-5 各水槽のD O (a), 全窒素 (b), 全リン (c) の経時変化 (Run2)

影響されることを示している。しかし、水温により遅速の差はあるものの、栄養塩濃度はほぼ同一のピーク濃度となるので、当該実験系及び底泥における栄養塩の飽和濃度は温度にはよらないと思われる。

4. 現地試験

(1) 現地試験の概要

室内実験よりも現地の環境に近い状態で酸素消費過程と栄養塩の溶出過程を調べるため、チャンバーを用いた現地試験を行った。水質検査項目は、D O、全窒素、全リン、他6項目である。試験期間は、Field Run1：1998年7月21日～8月28日、Field Run2：1998年8月28日～9月19日で、チャンバー内水温はそれぞれ16.5～17.8℃、17.1～17.8℃の範囲であった。

a) 現地試験装置

図-6は試験装置の断面図である。現地の底泥上に直接設置するチャンバー(容量：34.3ℓ、底泥接地面積：1270cm²)には、沈下防止板と底泥に刺さり水平移動を防ぐための固定板を取り付けている。また、チャンバー中の水を循環するために水面に達するホースと観賞魚用水中ポンプ(流量：6.4ℓ/min) および採水口を備え、フロートで水表面近くに垂下している。

b) 現地試験方法

湖内b地点(水深8m)の底泥上にチャンバーを下ろし、底泥によるD O消費を調べるため採水口よりD O豊富な表層水をチャンバーに送り、ポンプによりチャンバー内

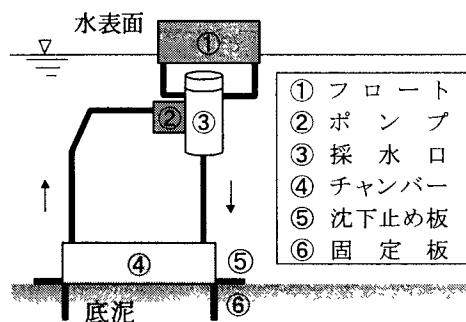


図-6 試験水槽断面図

の水を排出する。その後ポンプと採水口を接続し密閉された循環系としたうえで、ポンプで循環させて試験装置内の水質を一様にし、試験開始の初期水を採水する。また、底泥に接していない水の酸素消費量を調べるため、チャンバー内と同じ表層水を入れた密閉容器を底泥上に垂下した(図-7中には“Ref”と表記)。

常時はポンプによる循環は行わず、採水時にチャンバー内とホース内および採水口内の水質を一様にするため20分間ポンプ循環を行う。採水試験間隔は初期には密に入れ、3～7日毎に採水し水質検査した。

底泥の栄養塩溶出能の低下の有無を調べるため、同じ底泥で2回試験を行った。すなわち、Field Run1終了(約900時間)後、再度チャンバー内の水をポンプで表層水と入れ替え、同条件でField Run2を行った。

(2) 現地試験結果

2回の現地試験によって得た結果のうち、D O、全窒素、全リンの経時変化を図-7に示す。

D Oは100時間程度で1.3mg/lまで低下するが、この後も1mg/lより下がることはなく、0.1mg/l程度まで下がる室内実験とは異なる。全窒素の溶出は室内実験と初期濃度が異なるものの、よく似た変化を辿る。また、全窒素の最大溶出濃度は約4mg/lで室内実験とほぼ同じ値である。全リンの溶出も窒素と同じ経過を辿るが、最大溶出濃度は約0.38mg/lにとどまり、室内実験のその約1/2である。これは、リンの溶出はD O濃度依存性が高く、実験よりも現地試験の方がD Oが高く推移したからと考えられる。Field Run2は、1回目の実験である程度の溶出が終わった後の実験であるから、溶出速度や溶出量は減少するとの予想で実施したが、Field Run1と殆ど同様の溶出を示している。室内実験と同じく溶出濃度がある一定値に達するとそれ以上の溶出はなく、濃度はほぼ横這いとなるが、引き続き2回目の実験で新たな溶出が同様に起こることは、底泥中に溶出物質は十分に存在し、飽和濃度に達すると溶出が止まるといえる。実際の湖沼は飽和濃度に達しにくい開放系であるから、湖沼の栄養塩溶出速度を室内実験または現地チャンバー試験で評価するには実験初期の値を用いる必要がある。

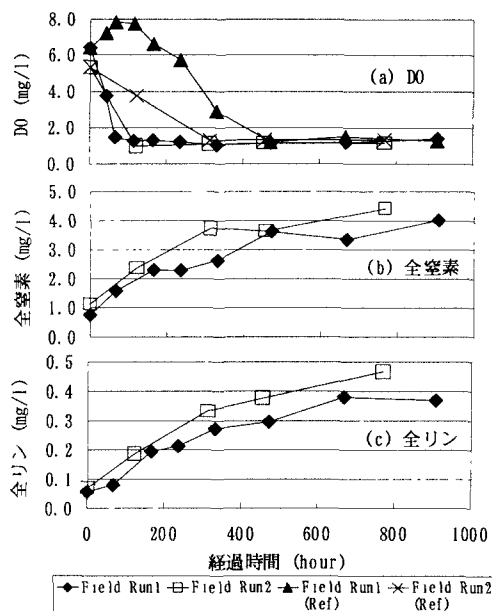


図-7 現地試験のDO (a), 全窒素 (b), 全リン (c) 経時変化 (Field Run 1, 2)

5. 酸素移動係数の算定

現地調査、室内実験及び現地試験それぞれの酸素移動係数を算定することによって、室内実験及び現地試験の妥当性を調べる。

(1) 定義

底泥及びSSにより一次反応で酸素消費が表されるとすると、溶存酸素濃度 C は次式のように表される¹⁾。

$$V \frac{dC}{dt} = -KAC - kVSC \quad (1)$$

ここに、 V : 水量

A : 水と接している底泥表面積

t : 経過時間

K : 底泥単位面積当たりの酸素移動係数

S : SS

k : 単位SS当たりの酸素消費速度定数

(2) 酸素移動係数の算定方法

a) 室内実験及び現地試験

DO測定に用いたDOメーターの性能上、低濃度の検出精度は低いため、酸素移動係数の算定には実験初期におけるデータを用いた。また、底泥の入っていない水槽Cの酸素消費がすべてSSによって消費されたと考えることで k を評価し、これを用いて他の実験から K を求めた。現地試験でも同様に算定を行った。

b) 現地における酸素移動係数

図-8はc地点における各時季のDO鉛直分布である。3月～4月にかけて、水温躍層はシャープではないものの

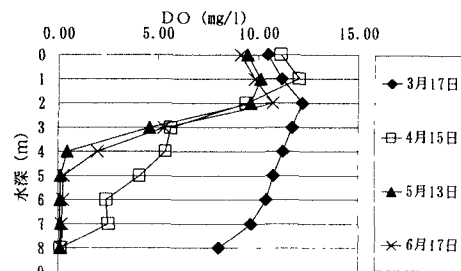


図-8 DOの鉛直分布(c地点)

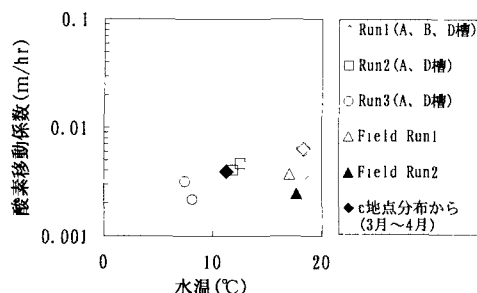


図-9 酸素移動係数と水温の関係

2m～3mに形成される。この時期には、河川流入水温は表層水温より高く、表層水越流方式のため、流入水が持ち込むDOは中・底層に影響することは少ない。また、中層で測られたクロロフィルaは四季を通じて低く、中層以深での光合成による酸素生産は少ない。以上のことから少々粗いが、4m以深の範囲のDOが底泥およびSSで消費されたと仮定して、(1)式より K を求めた。すなわち、水平方向にDOは一様分布とし、1m毎の水体積と各時期毎のDO鉛直分布から酸素消費量を求めた。ここで、SSによる影響は室内実験及び現地試験によって求めた底泥とSSの寄与率 $(KA/V)/kS$ を用いて評価した。

(3) 酸素移動係数の算定結果

K の算定結果を水温で整理して図-9に示している。プロットの散らばりはあるものの、水温の上昇で K は増加しており、酸素消費に水温が深く関係している。室内実験及び現地試験では実際の湖沼環境をそのまま再現することは不可能であるが、実際の現地における酸素消費をもとに算定した K と室内実験及び現地試験で求めた値はほぼ近似しており、実験的算定がある程度有効であるといえる。

6. 栄養塩溶出Fluxの算定

(1) 定義

室内実験及び現地試験では密閉槽であり、栄養塩の流入はなく、溶出のみを考えればよいので、栄養塩の保存式は次式で表される。

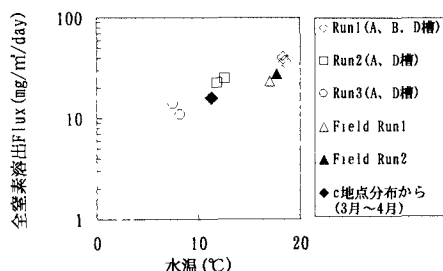


図-10 溶出Fluxと水温の関係(全窒素)

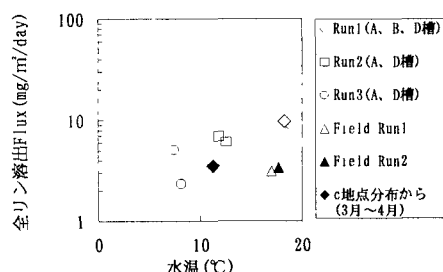


図-11 溶出Fluxと水温の関係(全リン)

$$V \frac{dC}{dt} = \text{Flux} \cdot A \quad (2)$$

ここに、 V ：水量

Flux ：底泥からの溶出Flux

A ：水と接している底泥表面積

C ：栄養塩濃度

(2) 溶出Fluxの算定方法

a) 室内実験及び現地試験における溶出Flux

溶出Fluxは全窒素及び全リンについて求めた。図-4、5、7から明らかなようにFluxは一定ではないが、栄養塩の水質検査はDOに比べて密に検査していないため、溶出濃度がピークに達するまでの平均Fluxで算定した。

b) 現地における溶出Flux

K と同様に水深4mから湖底までの範囲で増加した栄養塩量が底泥からの溶出であると仮定して、(2)式より溶出Fluxを求めた。ここで、各水深毎の栄養塩濃度を、中層から底層にかけて濃度分布は直線で近似できるとして求めた。

(3) 溶出Fluxの算定結果

溶出Fluxの算定結果は水温によって整理して図-10、11に示した。溶存酸素の消費と同じく、栄養塩の溶出も生物化学的活性による現象であり、水温が深く関係している。DOの減少速度が速いことと水質検査を密に行っていないため、DO濃度が溶出Fluxに与える影響は明らかにできなかった。図-10、11より、全リンの点のちらばりが全窒素より大きい、これはリン溶出の方がDO濃度依存度が高いためと思われる。室内実験及び現地試験より求めたFluxは、実際の湖内の栄養塩の変化から求

められる値と近似しており実験の有効性は評価できる。

7. まとめ

川原大池において約1年間、湖内2地点（表・中・底層）の水質調査を実施するとともに、底泥の栄養塩溶出に関する室内実験及び現地試験を行った。

当該湖は、10月から2月まで循環期であり、成層が強まる4月から9月まで底層は貧酸素となり、全窒素・全リン濃度は上昇する。湖全体の富栄養化レベルは栄養塩及びクロロフィルa両指標からも初期の富栄養段階にあることが分かった。

底泥による酸素消費と栄養塩溶出に関する室内実験と現地試験から求められる酸素移動係数や溶出Fluxから成層が始まる時季の湖内底層のDO及び栄養塩濃度変化を説明できることが分かった。

謝辞：本研究には、西彼杵群三和町の協力を受けたことを記し、関係者各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 細井由彦, 村上仁士, 上月康則：底泥による酸素消費に関する研究, 土木学会論文集, No. 456/II-21, pp. 83-92, 1992.
- 2) 東野 誠, 神田 徹：底泥による静水中での溶存酸素消費に関する基礎実験, 水工学論文集, 第41巻, pp. 439-444, 1997.
- 3) 中村由行, 井上徹教他：未覚乱底泥コアを用いた連続培養系での酸素消費・溶出実験, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1091-1095, 1996.
- 4) 中村由行, 井上徹教, 小松利光, 柳町武志, Fatos Kerciku, 山室真澄, 神谷 宏, 石飛 裕, 前田広人：栄養塩の溶出及びSODに関する室内実験手法の提案, 水工学論文集, 第41巻, pp. 433-438, 1997.
- 5) 道上正規, 檜谷 治, 山本真一：湖山池における溶存酸素濃度の変動特性, 水工学論文集, 第41巻, pp. 445-450, 1997.
- 6) 岡 史浩, 真野 明, 後藤光亀：貯水池における酸素の消費・生産特性, 水工学論文集, 第40巻, pp. 25-30, 1996.
- 7) 小松利光, 矢野真一郎他：新しい分散係数の評価法を取り入れた物質循環モデル, 水工学論文集, 第38巻, pp. 209-214, 1994.
- 8) 大島省吾・藤田満士・中津川誠：富栄養化水域における水質の短期的予測, 水工学論文集, 第40巻, pp. 1-6, 1996.
- 9) 西条八束・三田村緒佐武：湖沼調査法, 講談社, pp. 85-87, 1995.
- 10) 津野 洋, 西田 薫：環境衛生工学, 共立出版, pp. 34, 1995.

(1998. 9. 30受付)