

## 県内3湖沼代表地点の底質（間隙水）の調査結果について

九 鬼 貴 弘 ・ 福 田 明 彦 ・ 南 條 吉 之  
洞 崎 和 徳

### 1 はじめに

湖沼や内湾等の閉鎖性水域における水質汚濁（特に有機汚濁）は、重要な環境問題のひとつであり、鳥取県内の主要な湖沼もその例外ではなく、湖山池でのアオコの形成、中海での赤潮の形成といった現象が生じ、問題となっている。このように、閉鎖性水域の汚濁は、湖水中の溶存栄養塩類等と太陽光からのエネルギーを利用（光合成）する植物プランクトンの増殖（内部生産）によって引き起こされている部分が多い。太陽光の供給は気象条件によって決定される。従って、湖沼の水質の改善・保全を考えて、水質予測（シミュレーション）を行ったり、効果的な施策を考えるには、植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩類の、湖水中での挙動やその供給のされ方を把握しておくことが不可欠である。

湖水中への栄養塩類の供給のされ方は、流入河川や面源負荷等といった外部からによるところと、底質からの溶出等といった内部からによるところとに大別される（図1参照）。

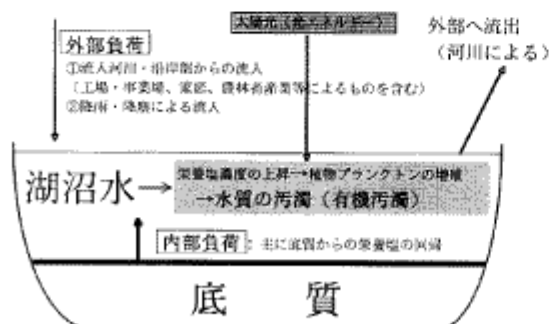


図1 湖沼における栄養塩の流れと水質汚濁

外部負荷については、流入河川の水質調査等が継続的に行われている。しかし、内部負荷につい

ての調査は少なく、過去に底質汚濁概況調査（1979、1987年）と底質水平分布調査（1984、1986年）が行われている<sup>1)</sup>が、これらの調査は、底質の有機汚濁状況の把握や堆積環境の解明を目的とした単発的なものであって、内部（底質）からの栄養塩等の負荷を具体的・継続的に捉えようとしたものではない。湖沼に堆積している底質は、“底泥”とも呼ばれるように含水率が高く（液相の占める割合が大きい）、この液相（水溶液）を「間隙水」といい、この間隙水中には、主として

- (1) 底質粒子中の有機態窒素・リンの微生物による分解反応に伴う、無機化・溶解。
- (2) 種々の機構で底質粒子表面に吸着している窒素及びリンの脱着。
- (3) 酸化還元反応に付随した系の物質組成の変化に伴うリン酸塩（二次鉱物）の溶解度の変化（上昇）による、リン酸の遊離・溶解。

のような過程を経て、無機態の窒素・リンが高濃度で溶存しているものと考えられる<sup>2)</sup>。これらは、拡散や物理的な混合によって直上の湖水中に移行するものと考えられ、底質粒子と湖水との両方に接して定常状態にある間隙水に関する情報は、内部負荷を考える上で、非常に重要である（図2参照）。

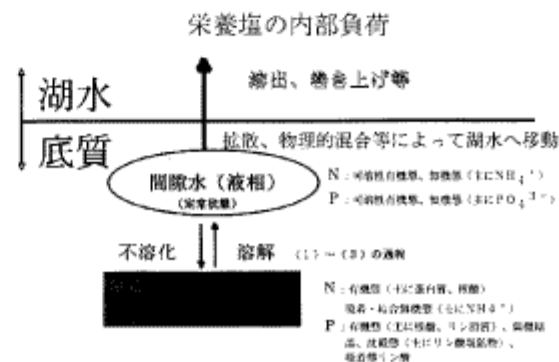


図2 底質と湖水との関係

以上のことを踏まえ、また、平成6年度より調査を実施している湖山池中央部について得られた結果<sup>3)</sup>も念頭に置きつつ、県内の主要3湖沼（湖山池、中海、東郷池）での、底質による内部栄養塩負荷の実態・量・機構を把握するための基礎データを得ることを目的とし、その手始めとして、毎月1回、各湖沼の常時監視調査時に底質を採取し、間隙水中の溶存栄養塩（窒素、リン）、及び溶存有機・無機炭素(DOC、IC)濃度を測定し、現場の計器測定データ(Eh)と合わせて解析した。

## 2 方 法

### (1) 調査地点・時期

ア湖山池：湖心中央部（1996年4月～1997年3月）

イ中海：米子湾中央部（1996年5月～1997年3月）

ウ東郷池：湖心中央部（1996年4月～1997年3月）

これらは、いずれも常時監視調査地点であり、この調査も、毎月1回の常時監視調査時に行った。

### (2) 試料採取・調整

船上より、エクスマンバージ採泥器を用いて底質の表層部を採取し、採泥器を傾斜させて共存湖水を捨て、形状を崩さぬうちに酸化還元電位を測定した後、混合したものを密閉容器に入れて持ち帰った。

持ち帰った試料は、孔径2mmのふるいを通して貝殻等の異物を除去した後、遠心分離(3000rpm、20min)して間隙水を採取し、孔径0.50 $\mu$ mのメンブランフィルターを用いて吸引濾過し、得られた濾液を分析に供した<sup>3),4)</sup>。

### (3) 測定項目・方法

ア 酸化還元電位Eh：

東亜電波製携帯用酸化還元電位計飽和塩化銀電極の複合電極を用いた酸化還元電位(ORP)を測定し、その測定値を換算して、標準水素電極に対する酸化還元電位(Eh)を求めた。

イ  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ：

水質汚濁調査指針(1980)によって測定。

ウ  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、：

JIS K0102(工場排水試験方法)によって測定。

エ 有機態N・P：

JIS K0102によってDT-N、DT-P(溶存全窒素、全リン)を測定し、この測定値から先の $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 濃度を差し引いて算出。

オ DOC、IC：

高津TOC-5000(燃焼-非分散赤外分析法)を用いて測定。

## 3 結果・考察

### (1) 間隙水の各態窒素、リン組成

各湖沼とも、間隙水中の溶存窒素・リンの大半は $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ であった(図3参照)。

このことは、図2に示したような機構により、これらの化学種となって底質固相から液相(間隙水)中へ移行(溶解)した窒素・リンは、湖水中よりも嫌気的な雰囲気の中で、引き続き同じ形態のまま存在しているものと考えられる。

よって、以下の部分では、間隙水中の窒素・リン濃度を議論する場合には、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ の濃度をもって行うこととする。

### (2) 間隙水中の栄養塩濃度の推移

3-(1)の結果を受け、湖水への栄養塩の内部負荷の可能性を比較的直接反映する因子である(図2参照)、底質間隙水中の溶存 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 濃度の推移を3湖沼について図4に示した。比較のため、データは3湖沼のものが揃っている平成8年度のものである。平成7年度以前の湖山池のデータは割愛(ちなみに、同様な数値とパターンになっている)、以下同じ。

まず、間隙水の $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 濃度(mg-N/l)は、

ア 湖山池中央部：

最大：3.6(10月)、最小：0.16(3月)、  
平均：1.5

イ 東郷池中央部：

最大：7.8(10月)、最小：3.4(5月)、  
平均：6.1

ウ 中海米子湾中央部：

最大：19(2月)、最小：3.0(6月)、  
平均：10

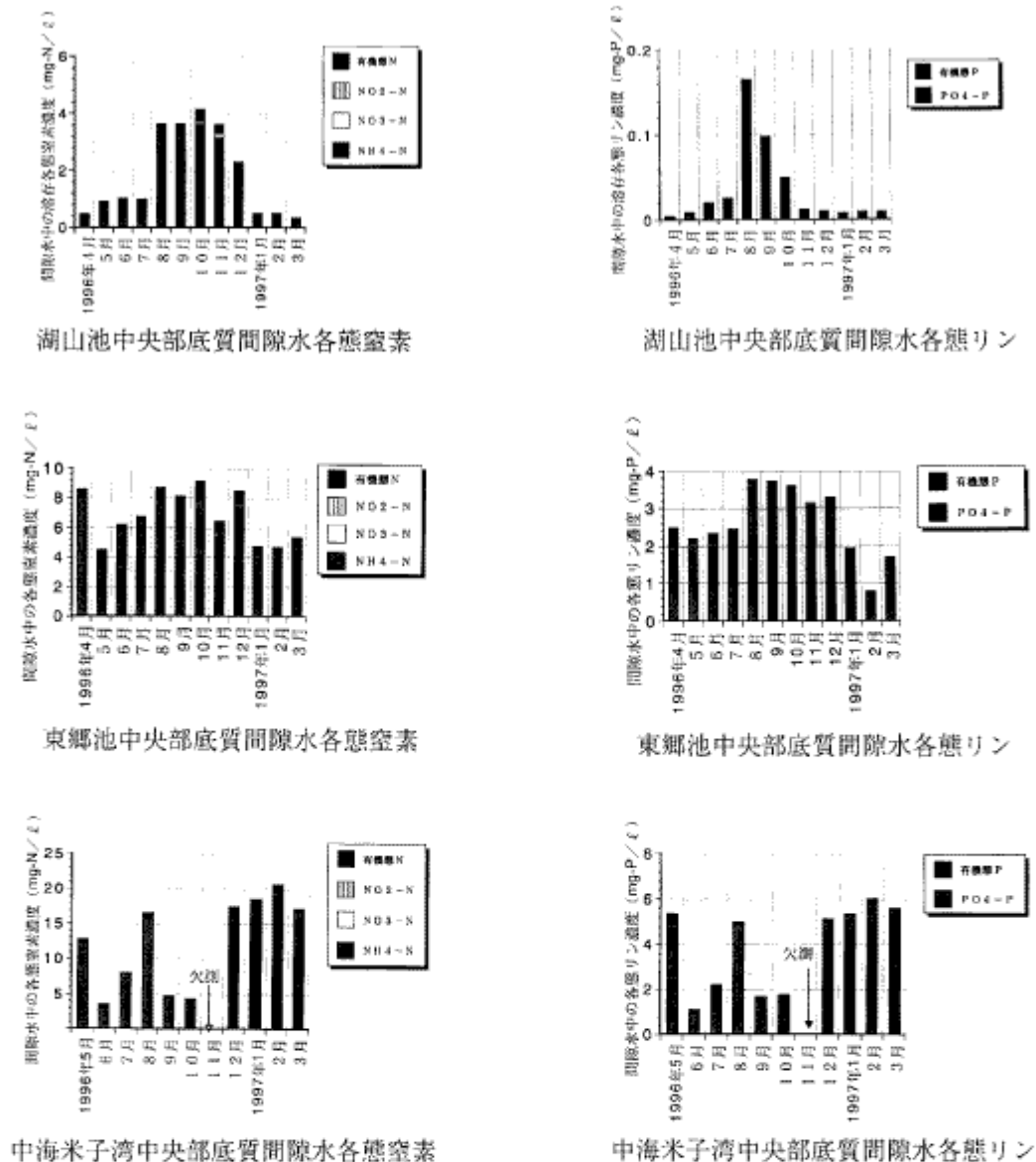


図3 3湖沼間隙水中の溶存各態窒素・リン組成

であり、平均値で比較すると、中海>東郷池>湖山池となる。

中海がやや異質な推移をしているものの、各湖沼とも、初夏～秋の時期にかけてその濃度が上昇し、湖水への溶出の潜在能力（ポテンシャル）が高くなっていることが示唆される（図3、4参照）。このことは、湖山池中央部について先に報告したことと一致している<sup>3)</sup>。なお、東郷池、中海では、冬場にかけての時期においてもその濃度はかなり高く（湖山池の夏季並もしくはそれ以上の濃度である）、湖水への溶出のポテンシャルが1年を通じて高いことがうかがえる。

次に、間隙水の $PO_4^{3-}-P$ 濃度（mg-P/l）は、

ア 湖山池中央部：

最大：0.090（8月）、最小：<0.003（4、11、12、1月）

平均：0.028

イ 東郷池中央部：

最大：3.7（8月）、最小：0.76（2月）

平均：2.4

ウ 中海米子湾中央部：

最大：5.7（2月）、最小：0.89（6月）

平均：3.4

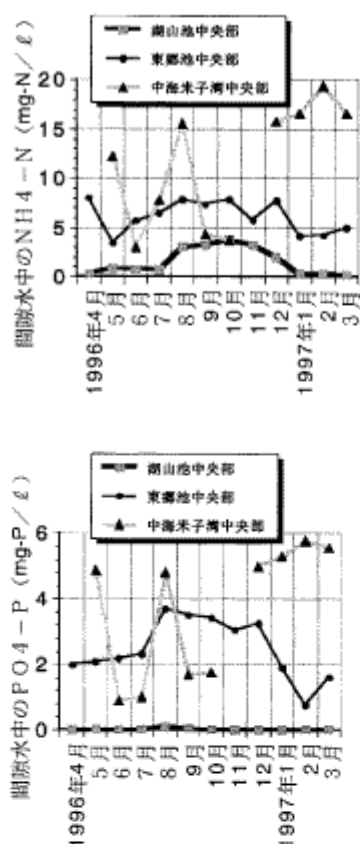


図4 3湖沼底質間隙水中のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P濃度の推移

であり、平均値で比較すると、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nと同様に中海>東郷池>湖山池となる。

基本的にはNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nと同様な推移であるが、湖沼間の差、特に湖山池とその他の2湖沼との差がNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nの場合よりもはるかに大きく、平均値で2桁オーダーの差があった。

このように、間隙水中の溶存栄養塩濃度は、湖山池中央部では冬場には低下するものの、東郷池中央部、中海米子湾中央部では、底質からの栄養塩の内部負荷の潜在性が1年を通じて高く（冬季においても湖山池の夏季並以上）、条件が揃えばこれらが湖水へと移動する可能性があることを示唆している。特に、結果に不規則性があるものの、冬季における中海米子湾中央部の数値の高さは注目に値する。

(3) 間隙水中の溶存有機・無機炭素濃度の推移、及び底質の酸化還元電位の推移

底質の液相である間隙水中の溶存窒素・リン濃

度の推移は、底質系の微生物を中心とする生物活動やそれらに付随して変移する酸化・還元状態等と大きく関連しているものと思われる（図2参照）。そこで、有機物（炭素化合物）の集合体である生物の活動状態やその間隙水への影響を反映するものと考えられる間隙水中の溶存有機・無機炭素濃度（DOC、IC）、及び底質系の酸化・還元状態を示す酸化還元電位（Eh）の推移に着目した。

まず、3湖沼間隙水中の溶存有機・無機炭素濃度の推移を図5、6に示す。

まず、間隙水中のDOC濃度（mg-C/l）は、

ア 湖山池中央部：

最大：10（8月）、最小：1.8（2月）

平均：3.7

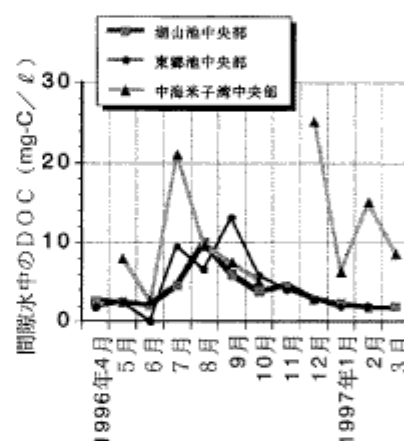


図5 3湖沼底質間隙水中の溶存有機炭素濃度の推移

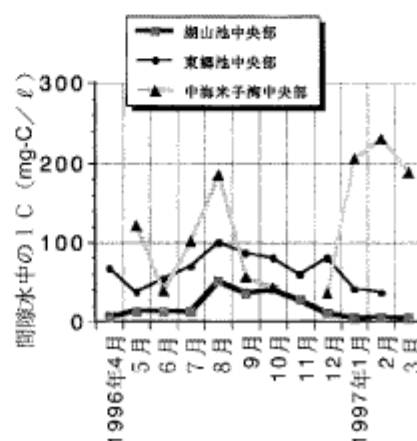


図6 3湖沼底質間隙水中の溶存無機炭素濃度の推移

イ 東郷池中央部：

最大：13（9月）、最小：0.0（6月）

平均：4.6

ウ 中海米子湾中央部：

最大：25（12月）、最小：2.6（6月）

平均：10

であり、溶存窒素・リン濃度と同様に平均値で比較すると、中海>東郷池>湖山池となった。

次に、間隙水中のIC濃度（ $\text{mg-C}/\ell$ ）は、

ア 湖山池中央部：

最大：51（8月）、最小：4.8（1月）

平均：19

イ 東郷池中央部：

最大：99（8月）、最小：37（2月）

平均：65

ウ 中海米子湾中央部：

最大：230（2月）、最小：36（12月）

平均：110

であり、その推移の仕方がDOCとは異なるが、平均値で比較すると、やはり、中海>東郷池>湖山池となった。

米子湾中央部が他と異なった推移をしているものの、窒素・リンと同様に、DOC・IC濃度も夏～秋にかけて高くなっているようである。このことについて、高分子で複雑な構造である故に大部分底質の固相（固体）として存在していた有機物が、夏季の温度が高い時期の底質中の微生物を中心とする活発な生物の代謝作用によって分解され、それらを構成していた炭素が、最終分解産物の $\text{CO}_2$ 及び $\text{HCO}_3^-$ 等（IC）や中間分解産物である低分子で水溶性の溶存有機化合物（DOC）の炭素へと変換されていった結果を示すものと思われる。

次に、底質系の酸化還元電位の推移を表層部と内部とに分けて図7に示す。

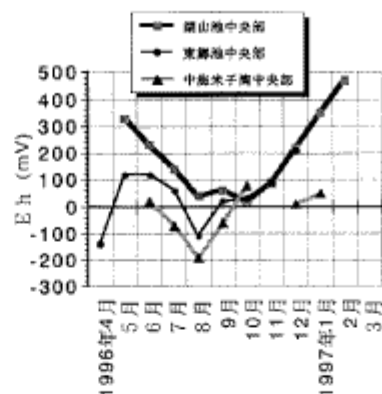
得られた底質系のEh（mV）は、

ア 湖山池中央部：

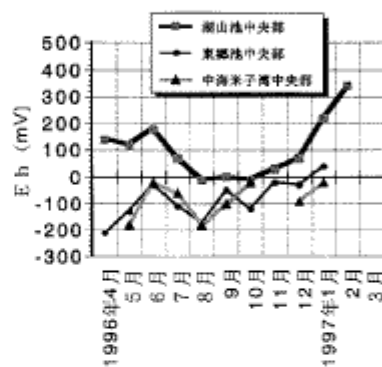
(ア) 表層部：

最低：20（10月）、最高：470（2月）

平均：200



底質表層部



底質内部

図7 3湖沼底質の酸化還元電位の推移

(イ) 内部：

最低：-10（8、10月）、最高340（2月）

平均：80

イ 東郷池中央部：

(ア) 表層部：

最低：-140（4月）、最高：210（12月）

平均：40

(イ) 内部：

最低：-210（4月）、最高：40（1月）

平均：-80

ウ 中海米子湾中央部：

(ア) 表層部：

最低：-190（8月）、最高：80（10月）

平均：-20

(イ) 内部：

最低：-180（5、8月）、最高-20（6、10、1月）

平均：-80

であった。図7及びこれらのEhの数値（その数値が低いほど系内が負電荷をもつ電子に富んだ状態、すなわち還元状態の程度が強い）をもって、これら3湖沼の底質の1年を通じた還元状態の程度の強さを比較すると、中海>東郷池>湖山池であることがわかる。また、最高・最低の月に違いがあるものの、基本的に、夏～秋にかけて底質系の還元状態が進行していることがうかがわれる。

これらの結果について、3湖沼の底質系において、夏～秋にかけての温度の高い時期に、微生物を中心とした活発な代謝活動によって主に底質中の固相として存在していた有機物が分解されて、間隙水中のDOC、ICへと移行し（それらの濃度は上昇）、その結果として系内の酸素及び酸化型物質が消費されて減少し、系が還元的な雰囲気となってEhが低下するものと解釈できる。そして、その程度が中海>東郷池>湖山池であるものと思われる。

#### (4) 総合考察、検討事項

(3)のように、3湖沼の底質中の微生物を中心とする（有機物）分解活動及びそれに付随した系の酸化・還元状態の推移についてある程度の知見が得られたが、この推移は、間隙水中の溶存 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ それぞれの濃度の推移とタイムラグを持ちつつ、概ね対応しているようである。これは、間隙水中のこれらの濃度が、実際に、底質中の有機物の分解・無機化の反応活性度や付随する底質の酸化・還元状態の変位によって決定されることを示唆している。

また、結果(2)で採り上げた間隙水中の $\text{NH}_4^+-\text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ との濃度推移の違い（特に、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 濃度の湖沼間の差が大きいこと）について、水田土壌（“冠水した土壌”という部分で底質と水田土壌とを類似した系であると考えることができる）についての研究の知見<sup>9)</sup>によれば、アンモニア生成を伴う有機物分解は比較的広い範囲の酸化・還元状態で進行するのに対して、リン酸の遊離・溶解反応は（アンモニア生成と比較したときに）還元状態の程度が強い条件下において、2価鉄や硫化物の生成・存在量等の程度に大きく

依存するとされる。このことと、上述の3湖沼底質のEhの推移の差とを考えたとき、底質が比較的酸化的な状態である湖山池とその他の湖沼とで間隙水中の溶存 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 濃度の差が大きいことについてある程度の説明がつくと思われる（図4、7参照）。これらのことも含め、各湖沼の底質中の窒素・リンの存在形態の違いや、陽イオンである $\text{NH}_4^+-\text{N}$ と陰イオンである $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ との底質中での挙動の違い等も考慮しつつ、今後の検討課題としたい。

最後に、中海米子湾中央部の結果について、各項目（特に溶存窒素、リン、有機・無機炭素濃度）ともその推移が不規則であるが、その調査地点の近くで浚渫工事が行われており、結果的に浚渫前の部分と後の部分との境界付近で試料の採取を行うことになってしまい、毎月の調査時の調査船の到着位置の僅かな（船上のナビゲーションシステムの1種であるGPSで捉えきれない程度の）ズレに伴うサンプリングの問題の可能性が否定できない。ただ、このような問題があるとはいえ、冬季においても間隙水中に窒素・リンが高濃度で溶存する（箇所がある）ことは、冬季においても、条件が揃えばこれらが湖水へ移動（溶出）する可能性があることを示すものである。このことと冬季に赤潮が米子湾一帯に発生することとの因果関係等にも着目していくべきものと思われる。このことや米子湾中央部のデータとしての評価、ならびにサンプリング方法等も含めて検討すべき課題である。

## 4 ま と め

湖山池中央部、東郷池中央部、中海米子湾中央部において、底質と湖水との媒体であって底質からの内部負荷の状況を反映する「間隙水」の調査を行い、以下のような知見が得られた。

- (1) 間隙水中の溶存窒素・リンの大半は、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ であり、概ね、初夏から秋にかけての温度が高い時期にその濃度が上昇していた。
- (2) 各湖沼とも、夏場にかけて、底質系の活発

な生物活動とそれに付随する還元状態の進行を反映して、間隙水中のDOC、IC濃度が上昇し、底質の酸化還元電位Ehが低下していた。また、その推移と(1)の $\text{NH}_4^+-\text{N}$ と $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ の推移とはタイムラグを示しつつ概ね対応していた。

- (3) 3湖沼での底質中の生物による分解活動及びこれに伴う還元状態の進行度、並びにそれらの結果としての間隙水中の溶存窒素・リン濃度等を平均値をもって比較すると、各項目ともに

中海>東郷池>湖山池

であり、底質から湖水への窒素・リンの移動の潜在性もこの順であるものと思われる。特に湖山池と東郷池・中海との差は大きく、特に $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ で顕著であった。また後者の2湖沼では1年を通じて湖水への溶出の潜在性が高いようである。

これらの知見や、先に指摘した検討課題等を基にして、間隙水への栄養塩類等の溶解の機構や、間隙水中の溶存栄養塩類等の湖水への移動・影響の

実態の把握やその機構の解明等について今後取り組んでいく必要がある。

## 参考文献

- 1) 安田満夫・寛一郎他：鳥取県内の底質の有機汚染状況と特性について、鳥取県衛生研究所報第30号P.44~54 (1990)
- 2) 日本水質汚濁研究協会：底質汚濁改善対策調査総合報告書P.32~41, 73~83 (1987)
- 3) 環境庁水質保全局水質管理課編：改訂版底質調査方法とその解説 (1988)
- 4) 村上和則他：霞ヶ浦における底泥からの有機物及び栄養塩の溶出への浚渫による抑制効果、霞ヶ浦臨湖実験施設研究発表会講演報告集P.30~36 (1996)
- 5) 九鬼貴弘他：湖山池中央部底質(間隙水)の調査結果について、第39回鳥取県公衆衛生学会 (1996)
- 6) 浅見輝男：水田土壤中における各種物質変化、国立公害研究所調査報告第16号P.32~43 (1981)