

流域の汚濁負荷対策の違いが湖沼底質に与える影響

中 菌 孝 裕* 久 岡 夏 樹** 鈴 木 穰***

1. はじめに

湖沼の水質には、流域からの汚濁物質流入による外部負荷と、底泥からの汚濁物質溶出による内部負荷が影響を及ぼしている。外部負荷に関しては、その原因となる汚濁源について数多くの調査・研究が実施されてきており、汚濁負荷削減対策の立案に寄与しているが、内部負荷に関しては、底泥の特性を対象とした研究に限られており、流域の汚濁負荷対策との関連については検討されていない。

このため本研究では、下水道など汚水処理施設整備による汚濁負荷量の削減程度が異なる湖沼を選定して、汚濁負荷の程度と底泥からの溶出速度の関係に関する検討を行った。

2. 研究方法

2.1 調査対象湖沼および調査時期

調査対象湖沼として、琵琶湖の南湖(滋賀県)霞ヶ浦の西浦と北浦(茨城県)、油ヶ淵(愛知県)および江津湖(熊本県)を選定した。湖沼の位置を図-1に示す。琵琶湖は国内1位の湖面積を有しており、南側に位置する南湖は比較的狭く、平均水深4mと浅い。霞ヶ浦は国内2位の湖面積を有し、平均水深は4mと浅い。油ヶ淵は海水が一部流入する汽水湖であり、江津湖は比較的水深が浅く、湧水が流入する環境を持つ。

底泥採取は、琵琶湖の南湖(以下琵琶湖)で平成18年9月、霞ヶ浦の西浦と北浦(以下西浦、北浦)で平成19年8月、油ヶ淵で平成19年9月、江津湖で

平成19年7月に行った。各調査地点の水深および底泥直上水中の溶存酸素(DO)濃度は、琵琶湖で4.2m、9.2~9.9mg/L、西浦では5.8m、5.5~8.3mg/L、北浦では6.3m、4.7~6.3mg/L、油ヶ淵では3.5m、3.0~4.1mg/L、江津湖では2.1m、9.8~10mg/Lであった。

2.2 汚水処理施設整備状況

各湖沼の流域における汚水処理施設処理人口、未処理人口等^{1)~3)}を表-1に示す。未処理人口を湖面積で割った値を求め、現状の湖沼への人由来汚濁負荷状況の指標とした。

琵琶湖や西浦は、湖面積が広く下水道の整備が進んでいることから、湖面積当たりの未処理人口の値は比較的小さな値を示した。北浦は、普及率は低いものの、湖面積に対する人口が少ないため西浦と同程度の値を示した。油ヶ淵流域は、汚水処理施設整備が遅れており、湖が小さいこともあ



図-1 調査対象湖沼

表-1 各湖沼の流域における汚水処理施設整備状況の比較

湖沼名	湖面積 (km ²)	行政人口 (人)	処理人口 (人)	未処理人口 (人)	普及率 (%)	未処理人口/湖面積 (人/km ²)
南湖(琵琶湖)(19年度)	52.5	567881	539766	28115	95	536
西浦(霞ヶ浦)(15年度)	172	993708	748370	245338	75.3	1426
北浦(霞ヶ浦)(15年度)	36	70527	18692	51835	26.5	1440
油ヶ淵(17年度)	0.64	99168	56290	42878	56.8	66997
江津湖(18年度)	0.49	162444	160432	2012	98.8	4106

って、湖面積当たりの未処理人口の値は極めて大きくなっている。また江津湖は、湖の大きさは油ヶ淵と同程度であるが、下水道普及率が高いために、湖面積当たりの未処理人口は低い値を示している。

2.3 底泥と湖沼水の採取方法

底泥の試料は、船上より不攪乱柱状採泥器を用いてアクリル製円筒に複数本採取し、分析と実験に供した。湖沼水はバンドーン採水器（横型）を用いて、鉛直方向に表層、中層および下層の3地点の採水を行い、分析を行った。

2.4 底泥の前処理と性状分析

採取した底泥試料は、深さ方向に2cm毎、30cmまで切り出しを行い供試試料とした。西浦、北浦、および油ヶ淵については、底泥試料の切り出しを行う前に酸化還元電位を測定し、底泥表面から酸化が確認された箇所まで(酸化層)を別途捕集し、供試試料とした。なお、前処理中の試料の酸化を防止するため、切り出し作業は窒素雰囲気下で行った。切り出した底泥試料を遠沈管に分取し、遠心機により底泥と間隙水とを分離させ、底泥は真空凍結乾燥器にて乾燥させて均一に粉碎、間隙水は孔径1μmのフィルターにてろ過後、栄養塩自動分析装置にて測定した。

2.5 底泥の酸素消費速度試験

底泥の鉛直方向における酸素消費速度を把握するために、採取した底泥と湖沼水を三角フラスコ中に封入し、20℃の恒温室（暗条件）にて連続攪拌を行いながらDOセンサーによる連続モニタリングを実施し、30分間の底泥酸素消費速度を評価した。供試試料としては、酸化層、酸化層以深～2cm層（以下～2cm層）、14～16cm層および28～30cm層を用いた。

2.6 底泥からの栄養塩類溶出速度試験

DO条件の違いによる各湖沼の底泥からの栄養塩類溶出速度を把握するため、溶出速度試験を行った。アクリル製円筒で採取した底泥を、表層から15cmになるよう厚みを調整し、その上に現地で採取し1μmのフィルターでろ過した湖沼水を静かに加えて試験を開始した。試験は20℃の恒温室（暗条件）にて行い、DO条件は好気条件(8mg/L以上)と嫌気条件(1mg/L以下)の2条件とした。栄養塩類溶出速度は溶出速度の大きい5日目までで算出した。

3. 研究結果

3.1 底泥の性状

底泥中の全窒素および全リン含有量の鉛直方向分布を図-2に示す。全窒素含有量は西浦と北浦が高い値を示したが、全リン含有量は表層15cmにおいて、油ヶ淵が最も高い値を示した。江津湖は表層から15cmの範囲では霞ヶ浦と油ヶ淵の中間的な特性を示した。琵琶湖は全窒素、全リンどちらにおいても低い値を示した。

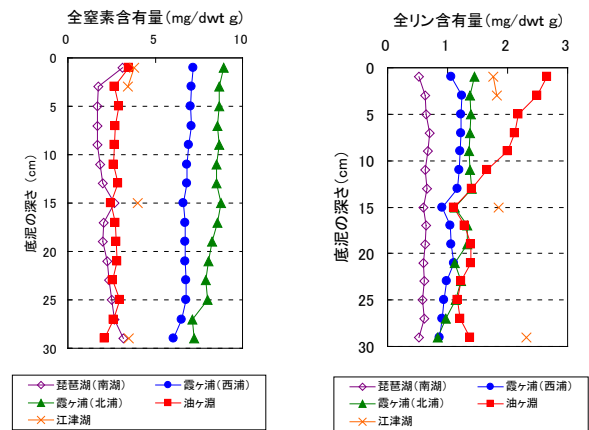


図-2 底泥中の全窒素、全リンの含有量

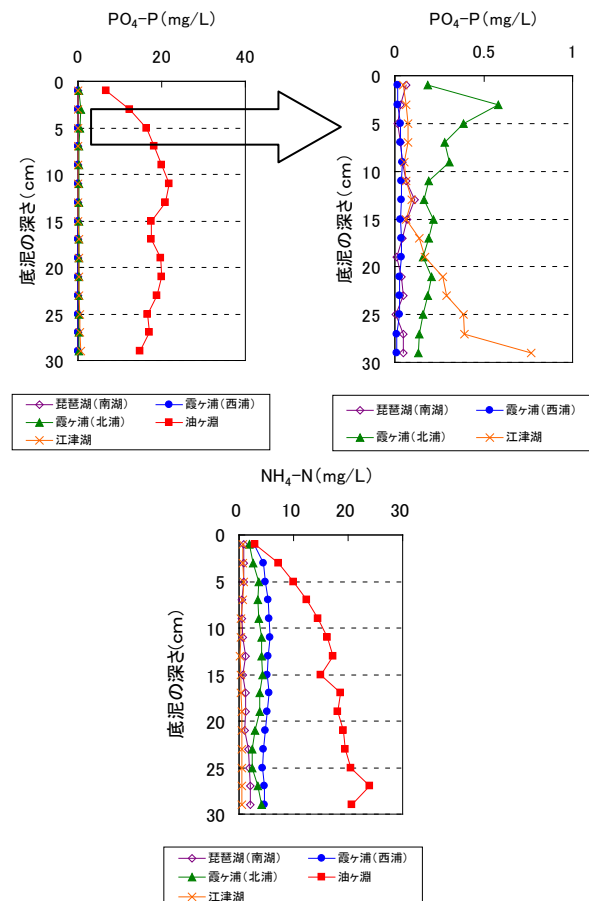


図-3 底泥間隙水中における栄養塩類の鉛直分布

底泥間隙水中における溶存態栄養塩類 (NH₄-N、PO₄-P) 濃度の鉛直分布を図-3に示す。含有量に見られた湖沼間の大小関係とは異なり、油ヶ淵の濃度が他湖沼に比べて高いことが確認された。

この両指標の差異の原因としては、湖沼に流入する土砂の影響が考えられる^{4), 5)}。油ヶ淵は湖面積が小さいため流入土砂が底泥採取ポイントである湖心まで運ばれて堆積する。流入土砂自体に含まれる栄養塩類量は流入する汚濁負荷量と比較して少ないため、間隙水中の栄養塩類濃度は高いが底泥に占める栄養塩類量は小さくなったと考えられる。一方、琵琶湖、西浦、北浦においては湖面積が大きいため、土砂が底泥採取ポイントまで運搬される前に沈殿し、底泥採取ポイントにおける底泥中の土砂量が少なくなるため、相対的に栄養塩類の割合が高くなったものと考えられる。また、江津湖においては流域の市街地化率が高いため、土砂の流入自体が少なかったことにより、底泥中の栄養塩類の割合が相対的に高くなったものと考えられる。

以上のことから、底泥の特性を評価する際、含有量を指標に用いる場合には、土砂の堆積特性も考慮する必要があると考えられる。

3.2 底泥からの栄養塩溶出速度の比較

各湖沼における底泥のPO₄-PおよびNH₄-Nの溶出試験結果を図-4に示す。PO₄-Pの好気条件における溶出速度から、油ヶ淵では好気状態においても溶出が起りやすい底質であることが分かった。一方、嫌気条件においては全湖沼の溶出速度が顕著に増加した。これより、高水温期などDOが低下する時期には顕著に溶出量が多くなり、底泥から湖内の水質へ影響を及ぼすことが推察される。

NH₄-Nの好気条件における溶出速度は、西浦、北浦、油ヶ淵が他湖沼と比較して高い値を示し、嫌気条件では全地点において増加した。

各湖沼における底泥表層間隙水中のPO₄-P濃度とPO₄-P溶出速度の関係を図-5に示す。底泥表層間隙水中のPO₄-P濃度と溶出速度の間には正の相関が見られることから、間隙水中濃度は、リン溶出速度を推測する有効な指標であると考えられる。

3.3 底泥の酸素消費速度の比較

霞ヶ浦と油ヶ淵における底泥鉛直方向(酸化層、~2cm層、14~16cm層および28~30cm層)の酸

素消費速度の比較を図-6に示す。底泥の巻きあげによる酸素消費速度を測定するため、三角フラスコに試料を入れ、連続攪拌を行いながら測定した。

表面酸化層の酸素消費速度は、最も小さく、直上水のDOにより酸化が進んでいる影響と考えられる。2cm以深の底泥の酸素消費速度は、油ヶ淵が霞ヶ浦に比べ2倍以上と高いことから、湖内への流入および内部生産による有機物負荷が高かったことが原因であると考えられる。

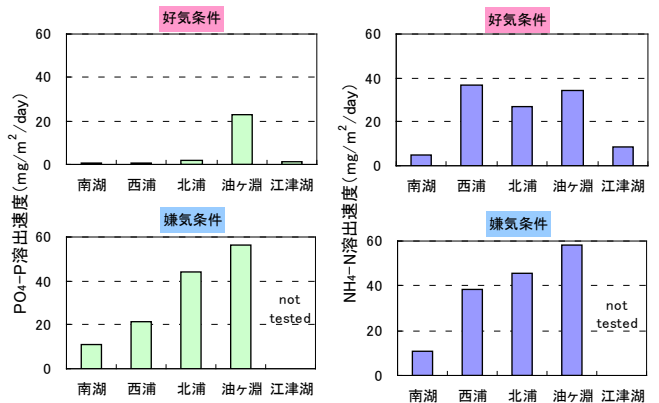


図-4 各湖沼底泥におけるPO₄-P、NH₄-Nの溶出速度の比較

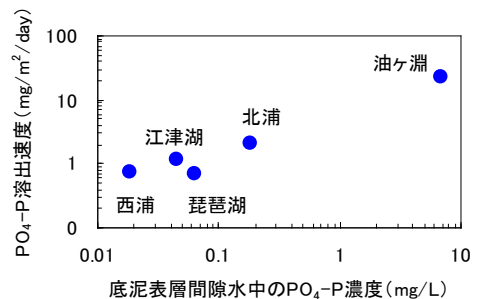


図-5 底泥表層間隙水中のPO₄-P濃度とPO₄-P溶出速度の関係 (好気条件)

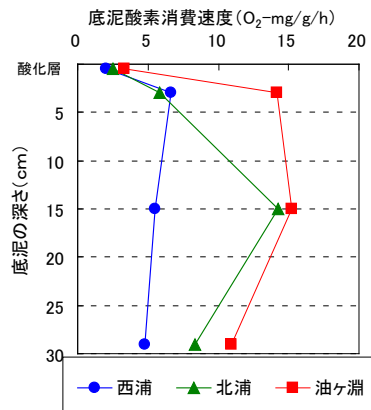


図-6 底泥各層における酸素消費速度の比較 (攪拌系)

3.4 湖面積当りの未処理人口とPO₄-P溶出速度との関係

湖面積当りの未処理人口とPO₄-P溶出速度（好気条件時）との関係を図-7に示す。湖面積当りの人由来汚濁負荷の大きさは、油ヶ淵>江津湖>霞ヶ浦であり、溶出速度の大小関係もこれに対応していた。

人由来汚濁負荷は油ヶ淵が極めて大きく、それに伴いPO₄-P溶出速度も高い値を示した。江津湖は油ヶ淵と同規模の湖沼であり、流域内人口はむしろ2倍程度と大きい、下水道整備率が100%に近い生活排水による汚濁負荷が小さくなっており、PO₄-P溶出速度は油ヶ淵の20分の1程度と低い値となっている。霞ヶ浦の下水道普及率は油ヶ淵よりやや高い75%であるが、湖面積が300倍ほど大きい、湖面積当りの負荷は小さくなっており、PO₄-P溶出速度も小さい値であった。油ヶ淵において汚水処理施設整備が進めば、PO₄-P溶出速度は漸次減少し、江津湖などの値に近づいて行くものと推察される。

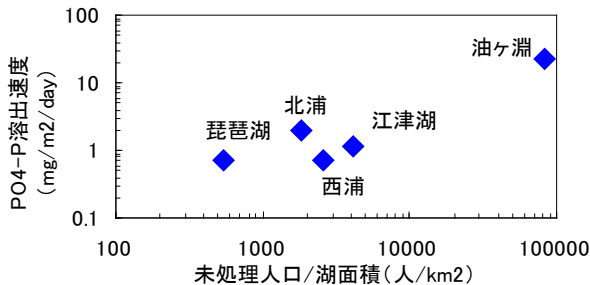


図-7 湖面積当りの未処理人口とPO₄-P溶出速度との関係

4. まとめ

流域の汚濁負荷対策が異なる湖沼において、底泥からの栄養塩類溶出速度の測定などを行い、以下のことが明らかとなった。

- ・底泥表層間隙水中のPO₄-P濃度は、PO₄-Pの溶出速度と相関が見られたことから、溶出速度を推測するためには、底泥間隙水中の栄養塩類濃度を計測する必要がある。
- ・リン溶出速度は未処理人口の湖面積に対する大きさとの関係が見られた。このことから、汚水処理施設整備による汚濁負荷対策の進展が底泥の溶出速度に及ぼす影響を推定できる。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、下水道整備の情報提供等においてご協力を頂いた茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所、国土交通省霞ヶ浦河川事務所、愛知県建設部下水道課、熊本市都市建設局下水道部の関係者各位には、ここに謝意を表します。

参考文献

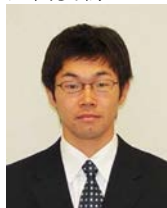
- 1) 茨城県・栃木県・千葉県：霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画（第5期）、2007
- 2) 愛知県：油ヶ淵清流ルネッサンスⅡの進捗状況について、2007
- 3) 熊本市：江津湖流域下水道整備状況、2007
- 4) 岩田進午、喜田大三：土の環境圏、(株)フジ・テクノシステム、pp.1041~1056、1997
- 5) JURG BLOESCH : Sedimentation and Lake Sediment Formation, LAKES HANDBOOK, Limnology and Limnetic Ecology, 1, pp.197-229, 2004

中 菌 孝 裕 *



中外テクノス株式会社関東環境技術センター（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水環境研究グループ水質チーム専門研究員）
Takahiro NAKAZONO

久 岡 夏 樹 **



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水環境研究グループ水質チーム 研究員
Natsuki HISAOKA

鈴 木 穰 ***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ長（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水環境研究グループ水質チーム 上席研究員）
Yutaka SUZUKI