

湖山池における底泥の栄養塩溶出に関わる因子について（第2報）

【水環境対策チーム】

岡本将揮、森明寛¹⁾、前田晃宏、増川正敏¹⁾、盛山哲郎

要旨

湖山池底質の栄養塩溶出特性を把握するために、直上水の水温、塩分、DOの条件別の溶出試験を実施した。窒素(DIN)は高水温(28°C)、高塩分(15psu)、嫌気条件で溶出量が增大した。リン(DIP)については高水温(28°C)、嫌気条件で溶出量が増加することが示され、好気条件では溶出は認められなかった。以上の結果から塩分躍層に起因する底層水の貧酸素化が栄養塩の溶出量の増加させることが示唆された。

1 はじめに

鳥取県東部に位置する湖山池では様々な水質浄化対策が行われているが、環境基準は未達成の状況である。当所では湖山池の汚濁機構解明に向け内部負荷に着目した調査を継続しており、これまでに実施した底質平面分布調査において湖底の大部分が窒素、リン、有機物に富んだ底質であることを明らかにした¹⁾。また、底質の栄養塩溶出特性に関わると予想される因子(水温、溶存酸素(DO)、塩分)について、直交実験を用いて溶出速度の変化を比較し、窒素は水温、リンはDOが大きく寄与していることを明らかにした²⁾。しかし、溶出特性については直交実験のみでは全ての因子の効果を評価することが困難であった。

そこで本研究では各因子(水温、塩分、DO)をより詳細に比較し、栄養塩溶出に強い影響を与えている因子を把握することを目的とした。

2 方法

2.1 野外調査

季節による溶出特性の変化を検討するため2017年5月26日(春)、8月17日(夏)、11月9日(秋)、2018年2月9日(冬)に調査を実施した。湖山池の三津地点でエクマンバージ採泥器を用いて表面からの深さが約10~15cmの底泥を採取した(図1)。

一部は理化学分析(乾燥減量、強熱減量、全有機炭素、全窒素、全リン、硫化物)に供し、残りの底質は溶出試験用として実験室に持ち帰り実験開始まで冷暗所(4°C)で保管した。理化学分析は、いずれも底質調査方法³⁾に従って分析した。

2.2 室内実験

実験の全体像を図2に示す。

各因子(水温、塩分、DO)の栄養塩溶出に与える影響を明らかにするため、直上水の水温・DO・塩分を表1のとおりを設定した。なお、水温はそれぞれ

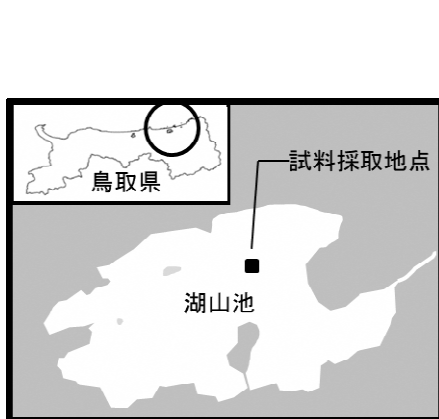


図1 調査地点図

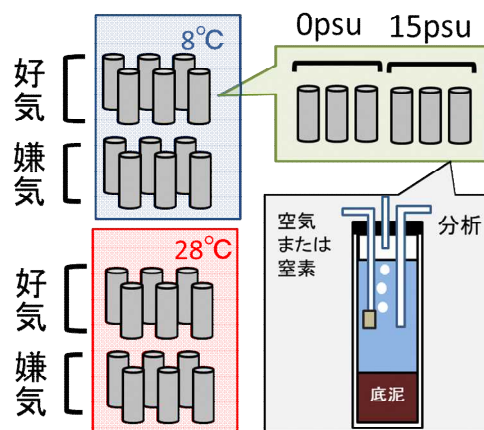


図2 溶出試験の模式図

表1 直上水の状態

水温 (°C)	塩分 (psu)	DO
8	0	嫌気
8	0	好気
8	15	嫌気
8	15	好気
28	0	嫌気
28	0	好気
28	15	嫌気
28	15	好気

1) 現 鳥取県生活環境部くらしの安心局水環境保全課

表 2 理化学分析の結果

	乾燥減量 (%)	強熱減量 (%)	全有機炭素 (mg/g)	全窒素 (mgN/g)	全リン (mgP/g)	硫化物 (mgS/g)
春 (5月)	72.5	13.9	47	3.05	0.91	3.00
夏 (8月)	74.1	15.0	30	4.64	1.09	4.24
秋 (11月)	77.9	15.6	36	4.33	0.99	4.21
冬 (2月)	74.5	14.0	33	4.19	0.91	3.12

冬季と夏季の底層水の代表的な値 (8°Cと 28°C)、塩分は淡水 (0psu) と夏季の塩分躍層形成時の底層水の代表的な値 (15psu) を想定して設定した。DO 条件については好気条件は空気を、嫌気条件は窒素ガスを通気し、好気条件は飽和状態、嫌気条件は 1mg/L 未満に維持した。塩分条件については、0psu は蒸留水、15psu は人工海水 (日本製薬株式会社製、ダイゴ人工海水 SP) を蒸留水に溶解させて調製した。内径 5.6cm のアクリル管に 15cm 程度充填した。底泥溶出試験は現地での溶出量を推定するにあたり、底泥の鉛直構造を維持した未攪乱柱状底泥コアを使用するのが望ましいが、本研究では、サンプル間の底質の条件をそろえるために充填直前によく混合した。

各条件に調製した直上水を静かに 500mL 注水した。なお、装置を設置した時点をも 0 日目とし、実験はすべて遮光条件で行った。0 日目と 10 日目に 10mL 採水した後、0.45 μ m のフィルターで濾過した試水を栄養塩自動分析装置 (SYNCA:BLTEC 社製) にてアンモニア態窒素 (NH₄-N)、亜硝酸態窒素 (NO₂-N)、硝酸態窒素 (NO₃-N)、リン酸態リン (PO₄-P) を測定した。窒素の溶出量は溶存態無機態窒素 (DIN (NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N の総和))、リンの溶出量は溶存態無機態リン (DIP (PO₄-P)) の値から算出し、評価した。溶出量の算出は、各条件について繰り返し (n=3) を設け、その平均値を用いた。

3 結果

3.1 各季節の窒素、リンの含有量

理化学分析の結果を表 2 に示している。

春は全窒素が低く、全有機炭素が高かった。硫化物が春、冬に比べ、夏、秋に高い傾向にあった (表 2)。その他の項目については、年間で顕著な変化は

見られなかった (表 2)。

3.2 溶出実験

窒素は水温、塩分、DO で溶出量に差が見られ、水温は 28°C、塩分は 15psu、DO は嫌気条件で溶出量の増大が見られた (図 3)。ただし、好気条件では 8°C と比べ 28°C で溶出量が減少し (図 3)、塩分においても 0psu と 15psu では明瞭な差が認められなかった (図 3)。また、季節毎にサンプリングした試料間の溶出量には、明瞭な差は見られなかった (図 3)。

リンは嫌気条件でのみ、明らかな溶出量の増大が見られ、好気条件では水温・塩分にかかわらずほぼ溶出しなかった (図 3)。嫌気条件では 8°C より 28°C で溶出量が増加し、塩分では明瞭な差は認められなかった (図 3)。

4 考察

窒素については、28°C、15psu、嫌気状態が全組み合わせの中で最も溶出量が増大する条件だった (図 3)。NH₄-N は水温の上昇に伴い、底質中の有機物の分解が促進されることにより溶出量が増大することが報告されている⁽⁴⁾⁽⁶⁾。また、塩分は NH₄-N の底粒子への吸脱着の平衡反応に影響を与え、塩分濃度が高いときは NH₄-N は溶存態 NH₄-N として直上水へ拡散され、反対に塩分が低いときは溶存態 NH₄-N は泥粒子へ吸着される⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらのことは、今回の結果とよく一致する。しかし、前報⁽²⁾ では塩分による顕著な差が認められない結果が得られており、本研究の結果とは異なるものであった。明確な原因は不明ではあるが、考えられる要因として底質の混合の有無がある。前報では未攪乱柱状底泥コアを用いていた。

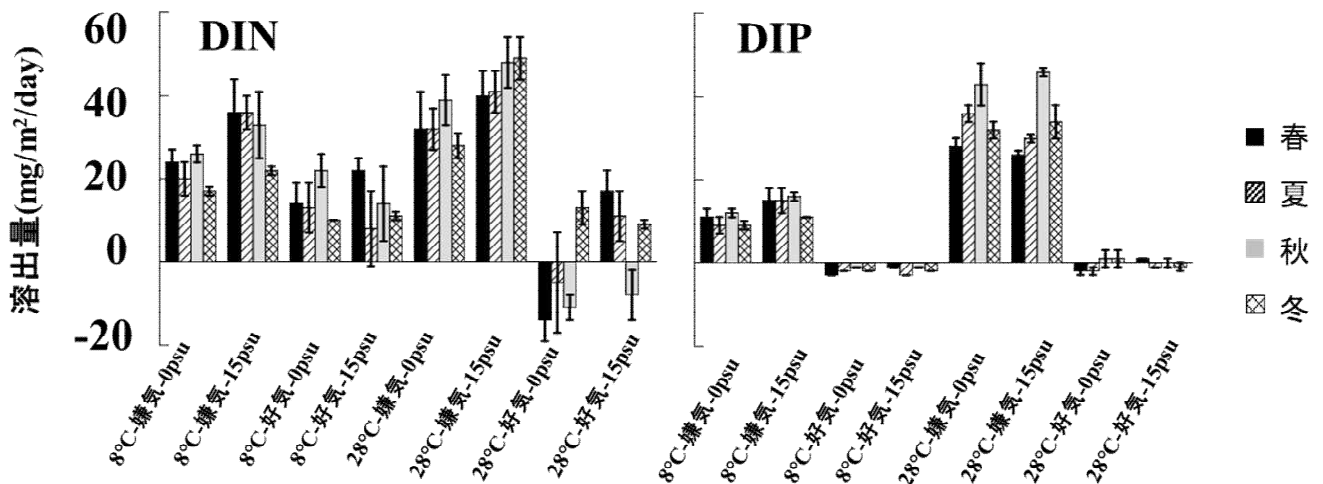


図3 各条件の溶出量 (図中のエラーバーは標準偏差を示す)

表層の底質は汽水化後の塩分の高い湖水に常時触れていたため吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ が減少しており、塩分による $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の差が少なかったと考えられる。しかし、本実験では深さ 10~15cm 程度の底質を混合しているため、普段湖水に触れていない吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ が豊富な泥粒子が底層水の表面に露出したことにより、未攪乱柱状コアの実験よりも吸着態アンモニアの拡散による影響を大きく受けたことは十分に考えられる。塩分と吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸脱着の関係については詳細な検討が必要である。

好気条件では 8°C より 28°C の溶出量が減少していた (図 3)。清家ら (1986) の報告⁽⁸⁾では、好気条件の溶出試験において $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出量が 5°C より 25°C で減少すると、今回得られた結果と一致する報告をしており、この DIN の消失の原因を硝化・脱窒作用によるものと考察している。有機物に富んだ底質では、直上水の DO が豊富に存在する場合、泥表面の好氣的雰囲気と泥粒子内の微細局所的な嫌氣的雰囲気の影響により、硝化と脱窒の両方の作用を受けると言われている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また脱窒速度は温度の影響を受け、高水温ほど脱窒活性が高くなる⁽¹²⁾。したがって、好気条件において 8°C の時よりも 28°C で脱窒の影響を大きく受けたため DIN が減少したと考えられる。

季節毎にサンプリングした試料間の溶出量には、明瞭な差は見られなかった。一般に底質の堆積速度は、水域でばらつきがあるものの、おおむね 1 年間あたり 1 cm 未満であり⁽¹³⁾、底質に季節的な変化が生じるとすれば、ごく表層に限られると考えられる。本研究では底質を表層から 10~15cm 程度まで採取

し、混合して試験に供した。したがって、本研究の手法では季節性を正しく評価できなかったと考えられる。この点については検討の余地が残る。

リンについては DO による影響が支配的であった (図 3)。好気条件では底泥表層に水酸化鉄 (III) を含む酸化層が形成され、底泥内部から発生したリンはこの水酸化鉄 (III) に吸着され、ほとんど水中へは溶出しないことが知られている⁽¹⁴⁾。また、水温についても高水温時に増大する報告があり⁽⁴⁾、今回の結果ともよく一致する。

これに対して、塩分間では顕著な差は見られなかった。海水中の硫酸イオンは、嫌気性条件下で硫化物イオン (S^{2-}) に還元されると $\text{PO}_4\text{-P}$ と吸着している水酸化鉄 (III) と結合し、硫化鉄を形成することで、 $\text{PO}_4\text{-P}$ を水中への放出を促す⁽¹⁵⁾。このことから嫌気性条件下において、塩分 (海水流入) の増加は硫化物イオンの増加という形で間接的にリンの溶出を促進させることは十分に考えられる。通常、水酸化鉄 (III) は直上水が酸化的環境であるときに底質の表面に存在するが、底質内部では還元状態が維持されるため、鉄は 2 価の状態が存在することが予想される。本研究に供した底泥は表層から 10~15cm 程度まで採取し混合している。そのため実験に供した底質の大部分が還元状態であり、水酸化鉄 (III) に吸着された形態の $\text{PO}_4\text{-P}$ がほとんど存在していなかった。そのため塩分 (硫化物イオン) に起因するリンの溶出量の差がでなかったと考えられるが明確な原因は不明である。

5 結論

本研究により、湖山池底泥の栄養塩溶出には窒素 (DIN) は水温・DO・塩分が関与していることが示され、それぞれ高水温 (28°C)・嫌気・高塩分 (15psu) 条件で溶出が大きいことが示された。また好気条件では高水温 (28°C) で DIN の減少が見られ、硝化・脱窒が関与していることが疑われた。リン (DIP) は DO の影響が支配的であると同時に水温についても高水温条件で溶出量が増大することが示された。

このことから塩分躍層形成に起因する底層水の貧酸素化が栄養塩溶出量の増加を促進させることが示唆された。

6 引用文献

- (1) 岡本将揮, 森明寛, 前田晃宏, 増川正敏, 奥田益算, 木下博登: 鳥取県衛生環境研究所報, 56, 26-32, (2015).
- (2) 岡本将揮, 森明寛, 前田晃宏, 増川正敏, 盛山哲郎: 鳥取県衛生環境研究所報, 56, 26-29, (2016).
- (3) 環境省: 底質調査方法 (2012).
- (4) 白柳康夫, 大矢正代: 横浜市公害研究所報, 15, 57-66, (1991).
- (5) 細川恭史, 三好英一, 堀江 毅: 港湾技研資料, (1981).
- (6) 余湖典昭, 那須義和: 水質汚濁研究, 5, 73-82, (1982)
- (7) 徳永貴久, 高橋篤, 松永信博: 水工学論文集, 51, 1309-1314, (2007)
- (8) 清家泰, 近藤邦男, 伊達善夫, 石田祐三郎: 陸水学雑誌, 47, 269-278, (1986)
- (9) Enoksson, V., F. Sörensson, W. Graneli: *Ambio*, 19, pp.159-166, (1990)
- (10) 和田英太郎, 上原洋一: 化学と生物, 15, 98-110, (1977)
- (11) 菅井隆吉, 伊藤健, 西尾正博, 溝山勇, 菅原庄吾, 清家泰: 陸水学会誌, 76, 35-44 (2015)
- (12) 清家泰, 近藤 邦男, 伊達 善夫, 石田祐三郎: 陸水学雑誌, 47, 133-141, (1986)
- (13) 金井豊, 井内美郎, 山室真澄, 徳岡隆夫: 地球化学, 32, 71-85, (1997)
- (14) 小林節子, 西村肇: 水質汚濁研究, 14, 253-260, (1991).
- (15) Rozan, T. F., Taillefert, M., Trouwborst, R. E., Glazer, B. T., Ma, S., Herszage, J., Valdes, L. M., Price, K. S. and Luther III, G. W. : *Limnol. Oceanogr.*, 47, 1346-1354.

Factor of Nutrients Diffusion of Bottom Sediment in Lake Koyama-ike (second report)

Masaki OKAMOTO, Akihiro MORI, Akihiro MAEDA,
Masatoshi MASUKAWA, Tetsuro SEIYAMA

Abstract

In order to reveal the characteristics of nutrient diffusion in Lake Koyama-ike, we examined the influence that overlying water conditions have on nutrient diffusion.

Dissolved inorganic nitrogen diffusion increased due to high water temperature, high salinity, and anaerobic conditions. An increase in dissolved inorganic phosphorus diffusion was also caused by high water temperature and anaerobic conditions.

These results suggest that anoxia of bottom water due to halocline contributed to the increase in the amount of released nutrients.