

底泥からの窒素・リンの溶出メカニズムの解明(第2報) —三方湖・久々子湖の場合—

青木啓子・加藤賢二・前田和代

Dissolution Mechanism of Nitrogen and Phosphorus in Lake Bottom Mud(2)

—The Case of Lake Mikata and Lake Kugusi—

Keiko AOKI, Kenji KATO, Kazuyo MAEDA

汽水湖の久々子湖と淡水湖の三方湖について、底泥からの窒素・リンの溶出メカニズムの解明調査を試みた。その結果、久々子湖では塩分躍層が形成され、底泥は強い還元環境にあり、窒素はアンモニア態として、リンはリン酸態として溶出曲線が得られた。一方、三方湖では躍層が形成されず、底泥には底生生物による攪乱などにより若干の酸素が供給されていた。そのため、リンは高濃度に蓄積しているものの、その溶出は抑制されていた。

1. はじめに

湖沼の富栄養化の原因となる窒素・リンは、流域からの流入の他に、底泥からの溶出が知られている^{1)~7)}。

特に浅い湖では、底泥からの溶出が水質悪化に大きく寄与していると考えられるため、三方五湖中、浅い湖である久々子湖(平均水深0.8m)と三方湖(平均水深1.3m)について、H15年~16年の2年間にわたり、底泥環境および物理的・化学的・生物学的な要因が窒素・リンの溶出に与える影響について調査し、窒素・リンの溶出メカニズムの解明を試みた。

H15年度は久々子湖について調査し、その結果を年報⁸⁾に記載した。

16年度は三方湖について、久々子湖と同じ方法で調査した。その結果を久々子湖の場合と比較検討した結果、三方湖と久々子湖の溶出メカニズムの特徴を捉えることが出来たので、その結果を16年度三方湖調査結果と併せて報告する。

2. 久々子湖と三方湖の概要

2.1 久々子湖⁹⁾

久々子湖は早瀬川を通じて若狭湾と直結しているため、表層の塩素イオン濃度 640~11,100mg/l、下層 710~15,100mg/l と変動が大きい汽水湖である。そのため、塩分躍層が形成されやすく、下層水が低酸素状態になり、窒素・リンが溶出しやすい。

湖面積 1.4Km²、平均水深 0.8m、最大水深 2.5m と浅い湖で、水質は窒素が 0.58mg/l、リンが 0.036mg/l、COD が 3.7 mg/l¹⁰⁾ を示す富栄養湖である。

2.2 三方湖

三方湖は三方五湖の最奥部に位置し、五湖中唯一の淡水湖である。鮭川をはじめとする流域からの栄養塩負荷が五湖中最大で、夏季にアオコの発生がみられる。水質は窒素が 0.74mg/l、リンが 0.051mg/l、COD が 5.1 mg/l¹¹⁾ を示す富栄養湖であり、富栄養化対策が緊急課題となっている。

湖面積 3.6Km²、平均水深 1.3m、最大水深 1.9m と久々子湖同様に浅い湖である。

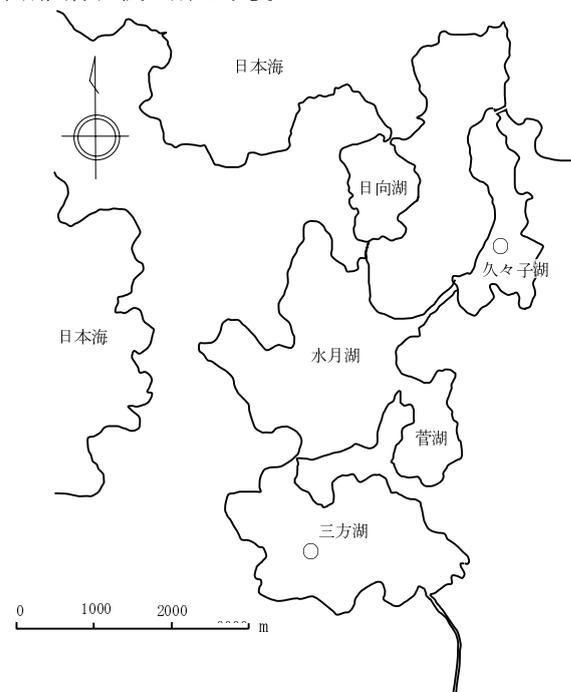


図1 調査地点(三方湖、久々子湖)

3. 調査方法

三方湖の調査方法を示した。なお、久々子湖の調査方法は、15年度の年報¹⁾²⁾に記載した。

3. 1 調査時期

平成16年4月20日、6月15日、9月16日、10月7日

3. 2 調査地点

三方湖西部：湖水(水面下0m、1m、1.5m)、直上水、間隙水(深さ0~2.0cm、2.0~5.0cm、5.0~10cm)、底泥(深さ0~2.0cm、2.0~5.0cm、5.0~10cm)

3. 3 調査項目

3. 3. 1 湖水・間隙水

水温、pH、EC、Cl、DO、ORP、T-N、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、T-P、PO₄-P、H₂S、Fe、Mn、COD

3. 3. 2 底泥

COD、T-N、T-P、水分含量、強熱減量、硫化物、好気性細菌、嫌気性細菌、全細菌、硝化細菌

4. 結果および考察

4. 1 塩分躍層・水温躍層の形成について

図2に示したように、平成15年10月の久々子湖の調査では、底泥上125cmから50cmに塩分躍層の形成が確認された。このため、下層水が低酸素になっていることが分かった。詳細は15年度年報¹⁾³⁾に示した。

一方、三方湖では図2に示したように表層から下層まで塩素イオン濃度が低く、塩分躍層が形成されないことが分かった。

また、三方湖の塩素イオンについて、1988年~2002年まで15年間の変動を図4に示した。表層水の塩素イオンは30~2,470mg/l(平均490mg/l)、下層水は31~2,480mg/l(平均500mg/l)の間で変動し、表層、下層ともほぼ同濃度であった。このため、過去においても躍層の形成は無いことが分かった。

なお、三方湖の塩素イオンは、1,000mg/l以上になる頻度がn=98で16%であり、2,000mg/l以上の汽水性に

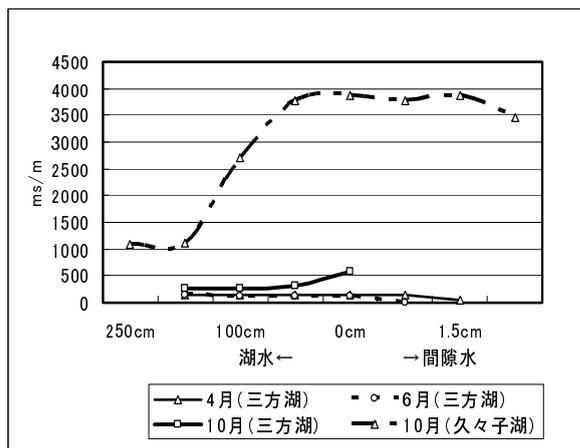


図2 三方湖、久々子湖のEC

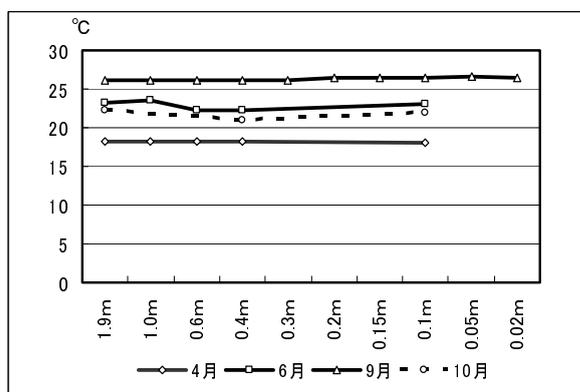


図3 三方湖の水温(深度別)

なる頻度は2%と低い。また、500mg/l以下の淡水である状態は、頻度がn=98で約70%であった。

深い湖沼では、夏季になり表層の水温が高くなり下層水との温度差ができると、比重差により上下の混合がなくなり、成層を形成して下層水が酸素不足になる。これを水温躍層の形成というが、三方湖の表層から下層までの水温を測定すると、図3に示したように、温度差がみられない。このことから、三方湖では水温躍層は形成されることがわかった。

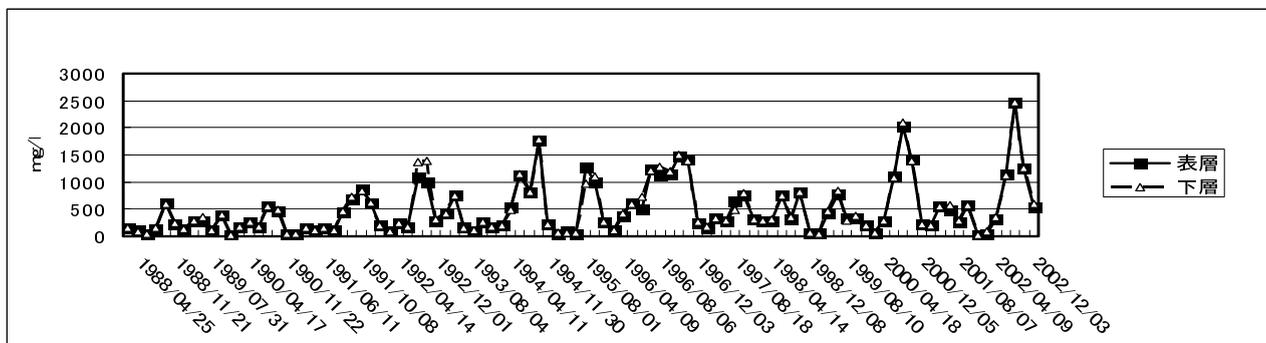


図4 三方湖の塩素イオンの変動(1988年~2002年)

以上より、三方湖は浅い湖なので塩分躍層や水温躍層が形成されず、そのため、湖水の混合は年中みられるものと考えられ、通常は底泥付近が無酸素になりにくいと思われる。

4. 2 溶存酸素 について

図5より、久々子湖では、塩分躍層の形成により急激にDOが減少するが、直上水は0mg/lにはならず2mg/l存在した。しかし、底泥は無酸素状態だった。

三方湖では、表層から徐々にDOが減少するが、久々子湖のように躍層が形成されないため、直上水にDOが5mg/l以上と十分に存在している。底泥中には、2cmの深さまで酸素があり、春季には底泥10cm層まで、ゴカイなどの底生生物が存在した。なお、このゴカイは、汽水域に生息する *Neanthes japonica* (ネアンセス ジャポニカ) であった。

4. 3 酸化還元電位について

久々子湖のORPの変動を図6に示した。躍層より下に位置する底泥境界上30cmの下層水から底泥中3cmにかけてORPが急激に低下する。この場所では微生物による酸化還元反応が盛んで、有機物が分解されていると考えられる。久々子湖は躍層が形成されるため、三方湖に比べて底泥は強い還元環境になっている。

三方湖のORPの変動を図7に示した。三方湖では季節変動が見られるが、水温が高い9月に変動が大きく微生物活性が高いことが分かった。特に、底泥境界上2cmの直上水から底泥中3cmまでのごく狭い範囲でORPの変動が大きいので、この部分で微生物活性が高く有機物が分解されやすいと考えられる。

すなわち、両湖とも底泥下0~3cmのごく表層部において、微生物による還元反応が盛んであり、窒素やリンが溶出しやすい場所と考えられる。

4. 4 三方湖底泥と久々子湖底泥の特徴

久々子湖と三方湖の底泥の特徴を表1に、また分析結果を図8に示した。久々子湖の泥は、海水に含まれるSO₄イオンに由来する硫化物が多いため黒色を示し、硫化物の毒性のためか、底生生物は見られなかった。水分含量や強熱減量は、久々子湖底泥の方が三方湖底泥より高く、ヘドロ状であった。

一方、三方湖の泥は硫化物が少なく、底泥表層部には酸素があり、ゴカイ等の生物が棲息していた。それらの生物の潜入による生物攪乱のため、部分的に底泥に酸素が供給され、底泥は茶褐色と灰黒色がまだら模様になった軟粘土状であった。

図8により、久々子湖と三方湖の底泥の分析結果を比較すると、CODや窒素は同程度の値を示したが、鉄やリンに大きな違いがみられ、これが両湖の特徴を示していると思

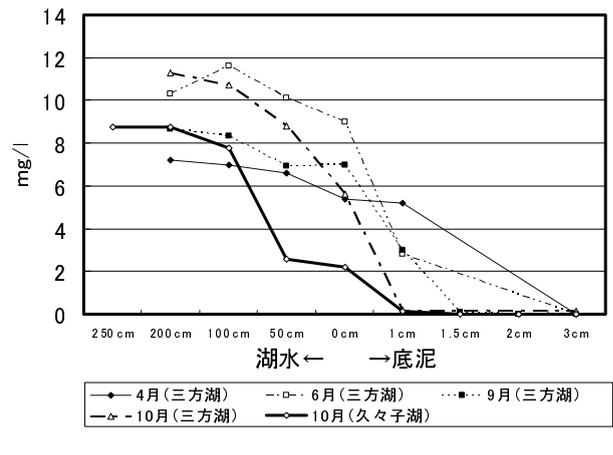


図5 三方湖、久々子湖のDO (湖水→底泥)

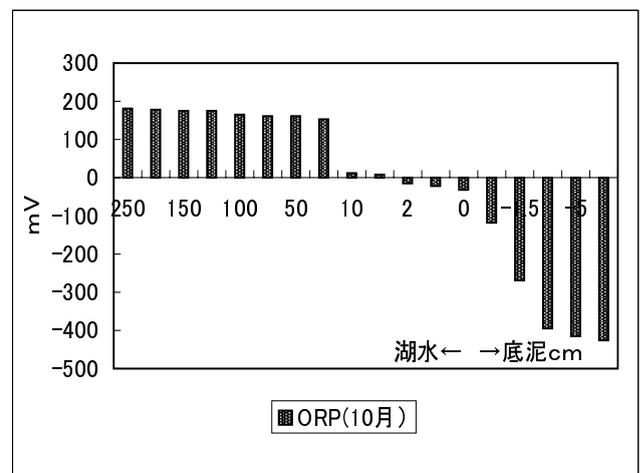


図6 久々子湖のORP (湖水→底泥)

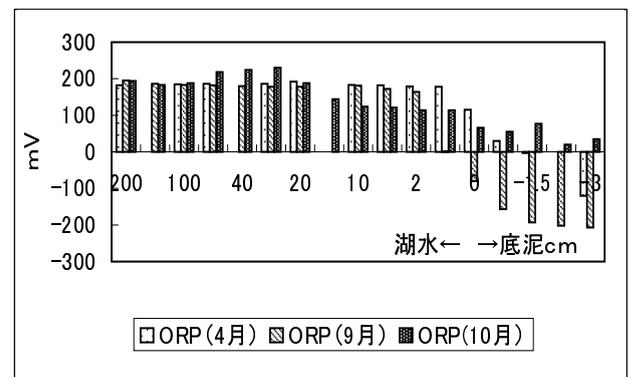


図7 三方湖のORP (湖水→底泥)

表1 三方湖と久々子湖の底泥の特徴

	色	状態	底生生物
三方湖底泥	茶褐色 灰黒色	軟粘土状 まだら模様	ゴカイ・イトミミズなど多い
久々子湖底泥	黒色	ヘドロ状	生物いない

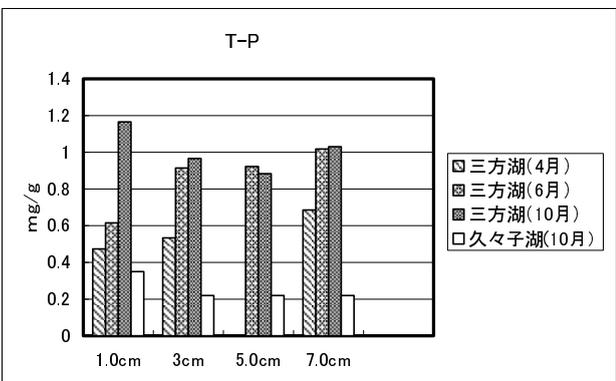
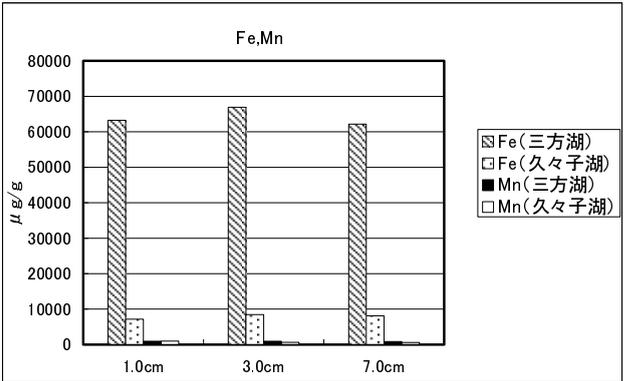
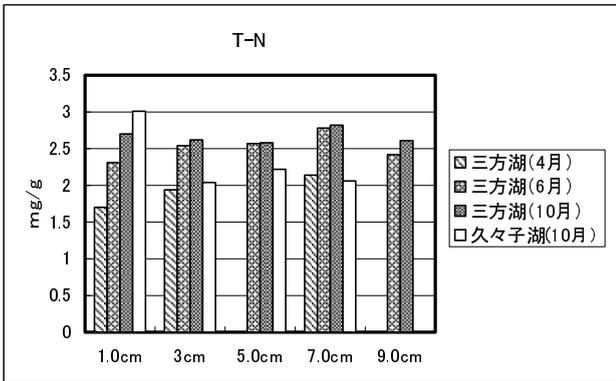
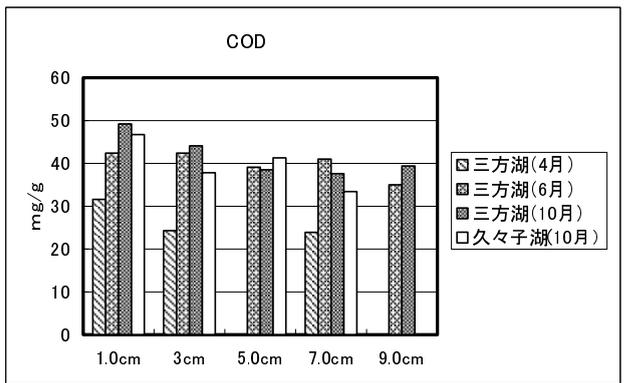
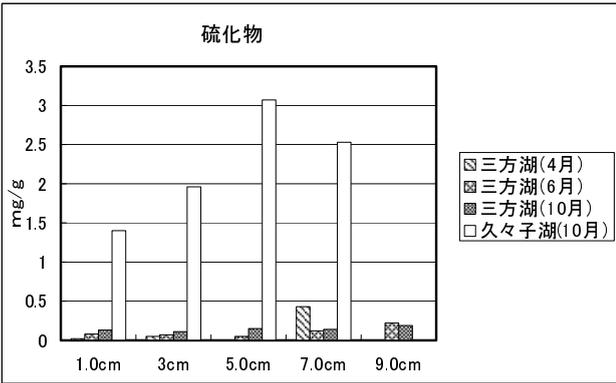
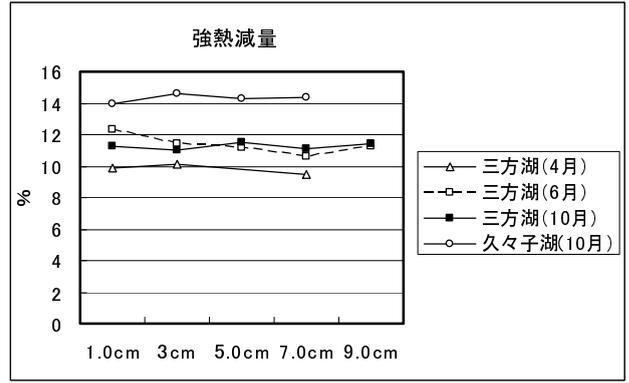
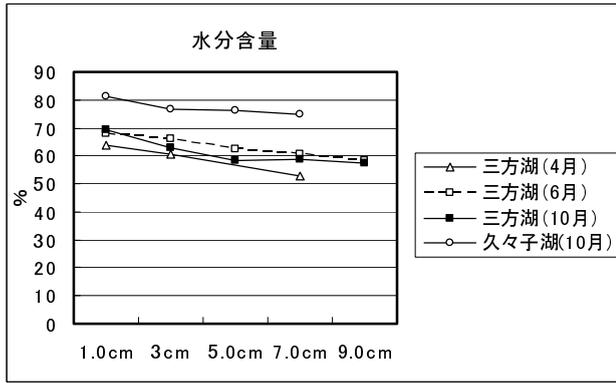


図8 三方湖、久々子湖の底泥の分析結果

われる。

久々子湖底泥の鉄は、クラーク数よりかなり低値であるので、河川など流域からの堆積物が少なく、湖で生産されたプランクトン由来の泥であることを示している。三方湖底泥の鉄は、クラーク数と同濃度であるので、鮎川など流域からの堆積物を主体とする泥であることを示している。また、海水の影響を受けないので、硫化物が少なく、生物が住みやすい環境と考えられる。

しかし、三方湖の底泥には流域から運ばれた多量のリンが蓄積していて、底泥中のリン濃度は約1 mg/gであり、これは久々子湖底泥の5倍に相当する量である。このことは、今後、三方湖の環境が悪化して底泥が無酸素状態になり強い還元環境になったり、底生

生物がいなくなり、底泥への酸素供給がなくなった場合には、多量のリンが溶出するおそれがあることを示している。

4.5 三方湖と久々子湖の鉄・マンガンについて

鉄、マンガンは酸化・還元環境を知るための指標となる金属であり、鉄の酸化還元状態とリンの溶出速度は密接に関係すると言われている。そこで、三方湖と久々子湖の湖水と間隙水における鉄・マンガン进行分析して、両湖の特徴を検討し、その結果を図9と図10に示した。

久々子湖の間隙水にはリンが溶出しているも2価の鉄の溶存が非常に少ない。これは富栄養化した汽水湖の特徴と思われ、2価の鉄が硫化鉄として沈降除去されているためと考えられる。マンガンは鉄より酸化還元電位が高く、底泥中の溶存酸素が0になると、間隙

水中へ2価のマンガンがすみやかに溶出してくる。久々子湖は底泥下1cmに2価のマンガンのピークがみられ、底泥が還元環境になった指標となっている。

三方湖は海水の影響が少ないので、図8に示すように底泥中に硫化物が少なく、そのため、間隙水中に2価、3価の鉄が多く存在していた。リンの溶出速度は、鉄の酸化還元状態と密接に関係し、無酸素状態になると、3価の鉄が2価の鉄に還元されると同時に、吸着していたリンが溶出することが知られている。4月と10月を比較すると、2価の鉄は明らかに10月が多く、これはリンの溶出傾向と一致した結果であった。一方、マンガンは、久々子湖に比べて間隙水への溶出が少ない。これは、三方湖の底泥中に2cm層まで若干の酸素があり、ゴカイなどの底生生物による生物攪乱が10cm層までおきているため、久々子湖のような強い還元環境になっていないためと考えられる。

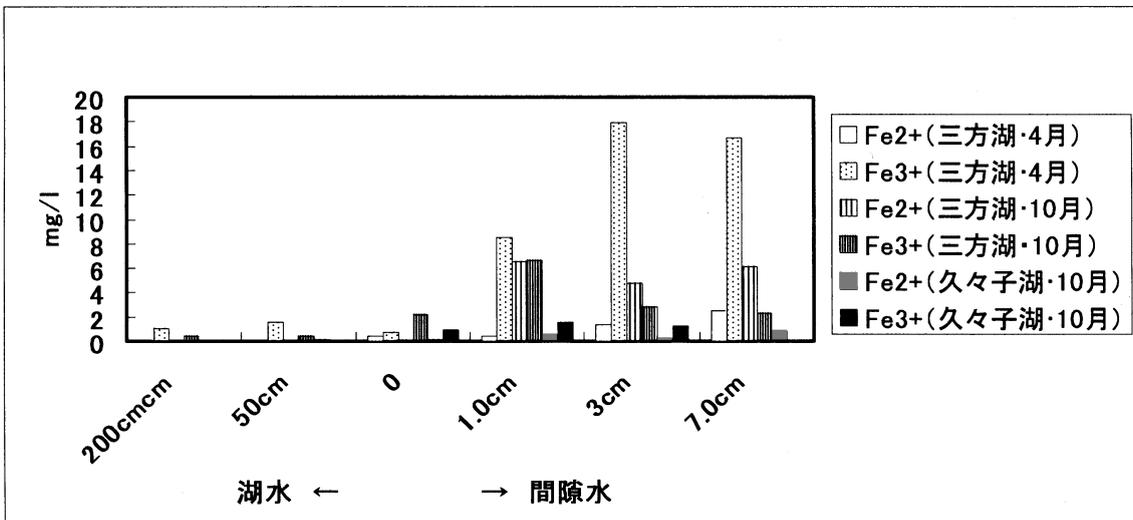


図9 三方湖、久々子湖の鉄 (湖水→間隙水)

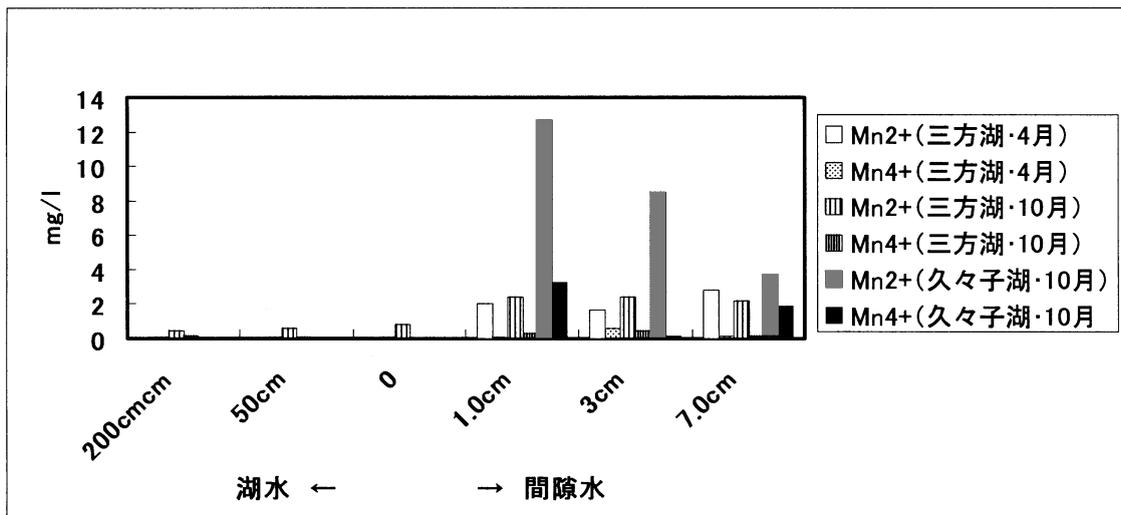


図10 三方湖、久々子湖のマンガン (湖水→間隙水)

4. 6 三方湖と久々子湖の間隙水からの

窒素・リンの溶出

久々子湖の底泥は強い還元環境になっているので、窒素はアンモニア態として、リンはリン酸態として、図11-3に示したように直上水へ、ほぼ直線的な濃度勾配による溶出曲線が得られた。このことは、窒素やリンがアンモニアやリン酸として、底泥から間隙水へ、間隙水から直上水へ溶出していることを示している。

一方、三方湖では、久々子湖のような直線的な溶出曲線は得られず、間隙水中の窒素・リンは一定の値を示した。

昭和59年に金沢大学の小村らが Pb-210 法による三方五湖の堆積速度調査を実施しているが、その結果、

三方湖の堆積速度は 1.5 cm/年、久々子湖の堆積速度は 1.0 cm/年であった。しかし、三方湖の場合、表層から 10 cm の深さまで何らかの理由で攪乱が起き、Pb-210 濃度が一定だったと記載している¹⁴⁾。

今回の窒素・リンの調査でも図12に示したように、10cmの深さまでほぼ一定の濃度であり昭和59年の調査と一致した結果であった。

今回の調査で、三方湖底泥にはゴカイなどの底生生物が約10cm層まで潜っているのが観察された。このことから、小村らが述べている「何らかの理由による攪乱」は、生物攪乱であることが分かった。

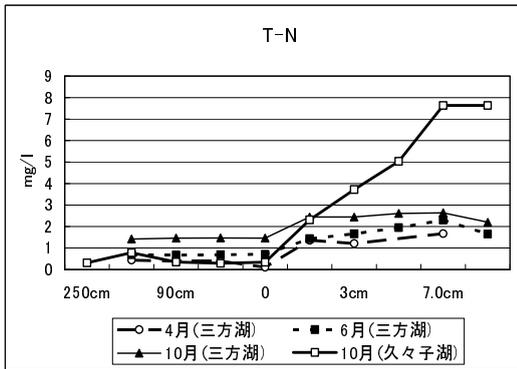


図11-1 湖水、間隙水中の窒素

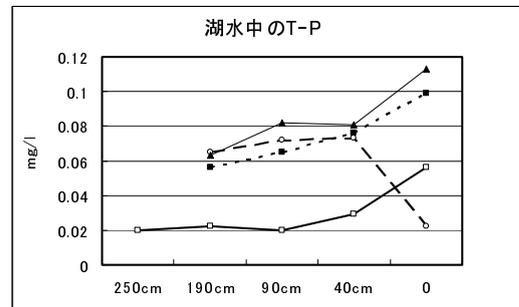
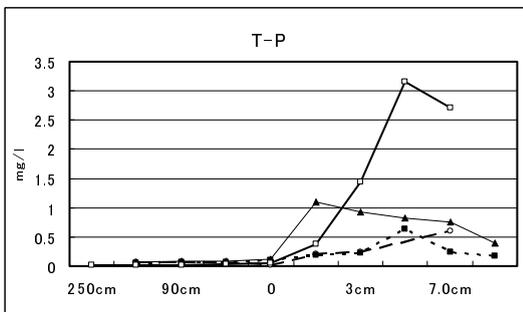
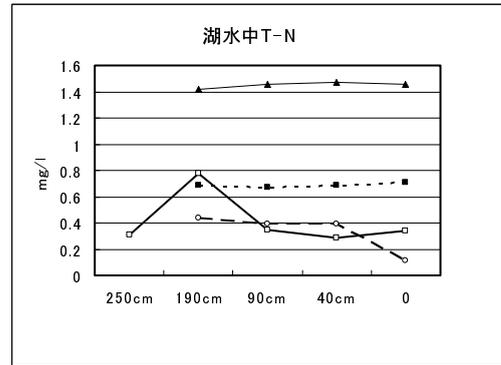


図11-2 湖水、間隙水中のリン

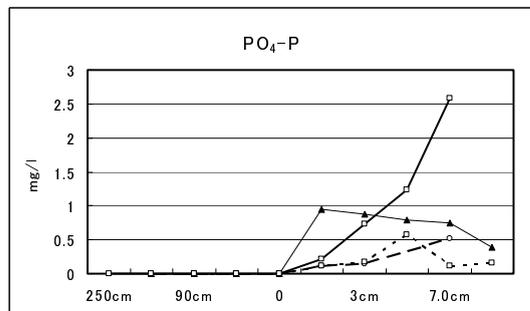
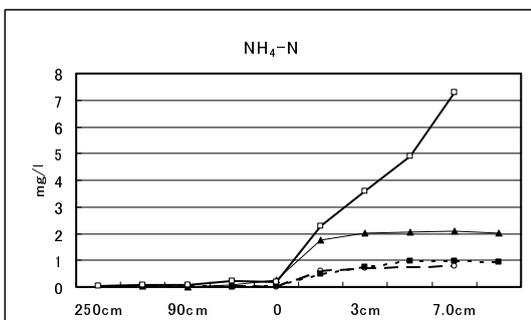


図11-3 湖水、間隙水中の NH₄-N, PO₄-P

三方湖、久々子湖の底泥を使い、窒素・リンの溶出を室内実験で行った結果を本報¹⁵⁾に記載したが、その結果は、水温が20℃を超えると、窒素・リンの溶出速度が上昇し、特に、リンは久々子湖の約8倍と非常に高い溶出がみられた。

しかし、実際の環境中では、間隙水中への窒素・リンの溶出は久々子湖とほぼ同程度に収まっている。これは、三方湖の底泥が生物攪乱により酸素が供給され、若干の酸素があるためと考えられるが、今後何らかの理由で底泥環境が悪化すると、室内実験で示されたように蓄積したリンが一度に溶出するおそれがあると考えられる。

4.7 底泥からの窒素・リンの溶出量

久々子湖では、底泥中の窒素・リン濃度は下層に進むと急激に減少するが、3cm以深ではほぼ一定となっている。減少分が溶出したとして、底泥の堆積速度、水分含量、底泥の比重等を加味して溶出量を計算すると、窒素が3.40トン/年、リンが0.46トン/年となった。

しかし、三方湖底泥では、攪乱のため、久々子湖のような栄養塩の減少曲線が得られず、実測値から溶出量を計算することが出来なかった。

そこで、前川らが行った底泥回帰量調査結果¹⁶⁾と室内実験結果¹⁷⁾から、三方湖底泥からの溶出量を推定し、その結果を表2に示した。リンについては、1年間に底泥が無酸素になる状態が最大に見積もって夏季1~2ヶ月間として計算した。

その結果、三方湖の底泥からの栄養塩の溶出量は、窒素が3トン/年、リンが2~3トン/年となり、久々子湖に比べて、リンの溶出量が特に多い特徴を示した。

5 まとめ

久々子湖と三方湖の底泥環境調査と窒素・リンの溶出メカニズムの調査を行った結果を以下にまとめた。

(1) 久々子湖について

4月から12月に塩分躍層が形成されやすく、躍層が形成されると底泥は無酸素で強い還元環境になり、底泥から窒素・リンの溶出が観察された。湖水-底泥境界面下3cmまでが微生物による酸化還元反応が盛んな場所で、窒素・リンが溶出しやすい環境と判明した。

底泥は水分含量、強熱減量が多いへドロ状であり、硫化鉄などの硫化物が多いため黒色を示し、ベントスや貝類などの生物はいない。

底泥からの栄養塩の溶出量は窒素が3.40トン/年、リンが0.46トン/年と算出された。

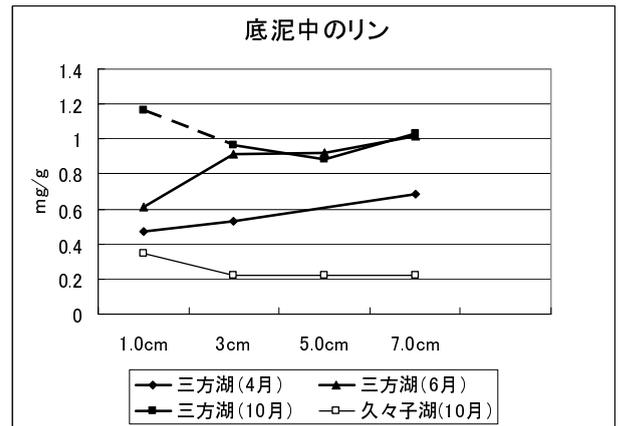
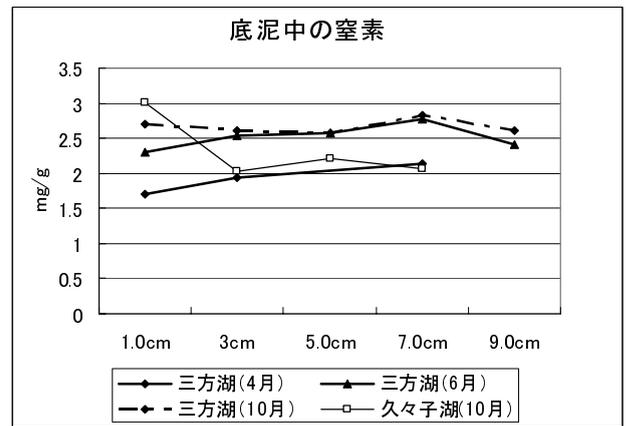


図12 底泥中の窒素・リン (三方湖、久々子湖)

表2 底泥からの窒素・リンの溶出量

	三方湖		久々子湖	
	窒素	リン	窒素	リン
面積	3.6 Km ²		1.4 Km ²	
COD	5.1 mg/l		3.7 mg/l	
T-N	0.74 mg/l		0.58 mg/l	
T-P	0.051 mg/l		0.036 mg/l	
N/P	14		16	
窒素・リンの溶出量	窒素	リン	窒素	リン
室内実験	2.35	11.4	0.83	0.61
底泥回帰量調査注1	2.65	1.29	3.94	1.44
底泥溶出量調査注2	攪乱による均一化層のため、計算不能		3.4	0.46
推定値	3	2~3	4	0.5
河川からの負荷量	95	6.4	20	2.5

注1 ; S59年調査¹⁶⁾ 注2 ; H15~16年調査 トン/年

(2) 三方湖について

水温躍層や塩分躍層は形成されず、湖水の上下方向の混合は年中見られるものと考えられる。そのため、溶存酸素は底層水に5mg/l以上と十分に存在する。底層水の溶存酸素や酸化還元電位は季節変動を示し、春季・秋季は高いが、夏季に低くなる傾向を示した。

底泥にはゴカイ (*Neanthes japonica*) 等の生物が棲息し、それらによる生物攪乱により、底泥にも若干の酸素供給が認められた。

底泥中には久々子湖に比較して約5倍の多量のリンが存在しているが、底泥環境が久々子湖のように強い還元環境でないため、間隙水への窒素・リンの溶出量は抑制されていた。

しかし、将来的に環境が変化して下層水や底泥が無酸素状態になった場合には、間隙水中へ多量のリンが溶出するおそれがあると考えられる。

以前に前川らが行った調査¹⁶⁾や室内実験結果¹⁷⁾から三方湖底泥からの溶出量を推定した結果、溶出量は窒素が3トン/年、リンが2～3トン/年となった。

参考文献

- 1) 細見正明・須藤隆一：湖沼底泥からのリン溶出に関する研究, Vol. 2, No3, 157-162 (1979)
- 2) 細見正明・須藤隆一：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, 191-217(1984)
- 3) 小林節子：湖沼底泥からのリンの溶出機構, 資料 55 号, 千葉県水質保全研究所(1991)
- 4) 河合崇欣他：底泥からの栄養塩類の回帰, 国立公害研究所研究報告, 22, 59-67(1982)
- 5) 大垣真一郎他：底質中のリン存在形態とリンの溶出, 国立公害研究所研究報告, 22, 68-76(1982)
- 6) 中嶋光敏：底泥界面における栄養塩の移動, 国立公害研究所研究報告, 22, 77-90(1982)
- 7) 小池勲夫他：海底境界層における窒素循環の解析手法とその実際, 産業環境管理協会
- 8)9)12)13) 青木啓子他：底泥からの窒素・リンの溶出メカニズムの解明 (第1報), 福井県衛生環境研究センター年報, 2, 120-124 (2003)
- 10)11) 公共用水域および地下水の水質の測定結果報告書(平成15年度), 福井県
- 14) 小村和久：Pb-210 法による三方湖、久々子湖、日向湖の堆積速度測定, 福井県公害センター年報, 14, 169-175(1984)
- 15) 17)加藤賢二他：底泥からの窒素・リンの室内での溶出試験, 福井県衛生環境研究センター年報, 3, 168-170 (2004)
- 16) 前川勉他：三方五湖の富栄養化に関する研究 (第7報), 福井県公害センター年報, 11, 159-168 (1984)