

冬季の湖山池における海水導水に伴う水質変化

WATER QUALITY VARIATION FOLLOWED BY SEAWATER INFLOW IN LAKE KOYAMA DURING THE WINTER SEASON

矢島啓¹・早川一栄²

Hiroshi YAJIMA and Kazue HAYAKAWA

¹正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101番地)

²正会員 工修 株式会社三水コンサルタント (〒530-0005 大阪市北区中之島六丁目2-40)

Lake Koyama is a low salinity lake that is connected to the Japan Sea via Koyama River. The seawater inflow into the lake is controlled by a sluice gate set up in the river. In summer there is no seawater inflow because the lake water is used for irrigation. On the other hand, in winter, to promote the use of the lake as a fishery, there is an artificial seawater inflow around November. This paper details observations performed to see the change in water quality when seawater flowed into the lake in the winter of 2001. The following has been understood as a result.

The seawater quality was found to have already deteriorated around the mouth of Koyama River. When this water flowed into the river, it became worse, because nutrients emerged from the bottom mud and sewage was carried into the river. Moreover, when the seawater entered the lake it concentrated in the vicinity of the deepest part. As a result of this, the dissolved oxygen of the lower layer disappeared for a few days after the inflow and this made the water quality worse. This situation continued for about 20 days until destratification by a strong wind occurred.

Key Words : Lake Koyama, River Koyama, seawater inflow, water quality, salinity stratification

1. はじめに

湖山池は鳥取県の東部に位置し、かつては日本海の湾入部であったが、その後、千代川が運搬してきた砂の堆積作用や湖山砂丘の発達によってせき止められた潟湖である。その規模は、東西4km, 南北2.5km, 水表面積6.8km², 平均水深2.8m, 最大水深6.5m, 貯水量1900万m³である。また、池と呼ばれているものの中では日本最大級であり、塩素イオン濃度100~300ppmの低塩性汽水湖である。

湖山池はかつて、現在よりも塩分の高い汽水湖であった。その豊かな生態系により、伝統的な石がま漁をはじめ、様々な漁業が盛んに行われていた。しかし、昭和61年以降、唯一の流出河川である湖山川は、その合流先である千代川河口の改修に伴い、日本海に直接付け替えられた。このため、海水は、千代川の河川水で適度に薄められずに湖山池に流入することになり、湖水の塩分は上昇し、池周辺の農地では塩害が発生した。塩害は、湖山川に設置されていた水門を操作することにより防止されたものの、湖水の塩分は以前より低下し、周辺地域からの下水流入などにより富栄養化し、湖山池のかつての豊かな生態系や美しい景観は失われつつある。そこで、現在、生態系の保護等を目的として、湖山池の塩分

を高め、かつての汽水湖として再生しようという方向に進んでいる。

現在、湖山池では、灌漑期には海水の流入がないよう湖山川に設置された水門を操作するが、非灌漑期である冬季には、魚種の生育を促すことを目的として海水を導水し、湖水の塩分を高める水門操作を行っている。この際、湖内北西部のすり鉢形状をした最深部付近には海水が滞留しやすく、海水による密度(塩分)成層が形成される。これまでの湖山池を対象とした研究において、冬季の海水流入時には、長期間塩分成層が形成されるのが観測されている¹⁾。また、夏季の水温成層形成時には、湖底付近で溶存酸素が低下し、底泥から栄養塩類が溶出することも観測されている²⁾。さらに、湖山池周辺においては、下水道整備が完成していないことを考慮すると、今のように富栄養化している湖山池を汽水湖として塩分を高めることは、一年を通して海水が流入し、現在よりも長期にわたって水温と塩分による二重成層が形成され、かえって水質悪化を助長し、生態系に悪影響を与える可能性がある。そこで、本研究では、2001年冬季の湖山池への海水導水時に行った現地観測により、湖山川河口から湖山池における水質変化過程を明らかにし、海水導水における問題点について検討を加える。

2. 調査の概要

湖山川の河口にあたる鳥取港から湖山池において、調査を行った地点を図-1に示す。河口(R1の直下流)から湖山池の流出口(R9)までの距離は約3kmあり、河口から約0.4kmの地点R3に水門が設置されている。行った調査は、大きく次の4つに分けることができる。

(1) 長期連続観測

湖山池最深部L2に、自動観測水温計(Onset製 StowAway TidbiT)を湖底から立ち上げ式で鉛直方向に0.3mごとに吊るし観測を行った。また、池周辺における雨量(テールズ・インストルメント製7852M)、湖山川3箇所(R5, R7, R9)の河床直上における塩分・水温(アレック製ACT-16K)についても連続観測を行った。

(2) 海水流入前の観測

湖山池全体に広がるL1~L12の12地点で、海水流入前の11月13日にハイト・ラボ製MS4aを用いた水温、塩分、DO、濁度の鉛直分布調査(以下、STDT観測)を行った。また、海水が遡上あるいは流入する前の湖山川と湖山池の水質を把握するため、11月16日に湖山川(R4, R5, R6, R7, R8, R9)の6点及び湖山池L2におけるSTDT観測を行った。この際、湖山川(R7, R9)の2点及び湖山池L2の3地点では、採水し水質分析も行った。さらに、湖山池に流入する海水の水質の把握を目的として、鳥取港内のP1とP2の2点および海水が滞留している湖山水門より下流のR1, R2, R3の3点におけるSTDT観測及びR1, R2, R3における採水と水質分析を11月17日に行った。なお、鳥取港内では採水を行っていないため、鳥取県衛生研究所が行った

2000年11月~2001年1月のP0地点における水質分析値を参考とする。

なお、採水は、湖山川では河床上0.3mの1点で行い、湖山池では上層(水面から約0.5m)と下層(湖底から約0.5m)の2点で行った。

(3) 湖山川における海水遡上時の観測

湖山川において海水が遡上する際の水質変化を調べるため、海水導水のための水門操作の行われた11月25日及び11月29日に湖山川R4~R9の6点におけるSTDT観測を行った。また、R7とR9の2点(11月25日はR6も)においては、採水と水質分析も行った。

(4) 湖山池内への海水流入から成層破壊までの観測

湖山池L2において、塩分成層が形成されてから破壊されるまでのSTDT観測(海水流入から1週間程度は3時間毎、その後は1日1回程度)及び採水した湖水の水質分析(1日1回程度)を行った。また、湖山池全体の成層状態を知るため、塩分成層が形成されていた12月5日に池内L1~L12の12地点でSTDT観測を行った。

3. 海水流入前における海水流入経路の水質特性

湖山池の湖水が流出する経路にそって、まず、湖山池及び湖山水門より上流における水質について述べ、次に、海水が存在する水門より下流の湖山川及び鳥取港の水質について述べる。

(1) 海水流入前の湖山池から湖山水門までの水質

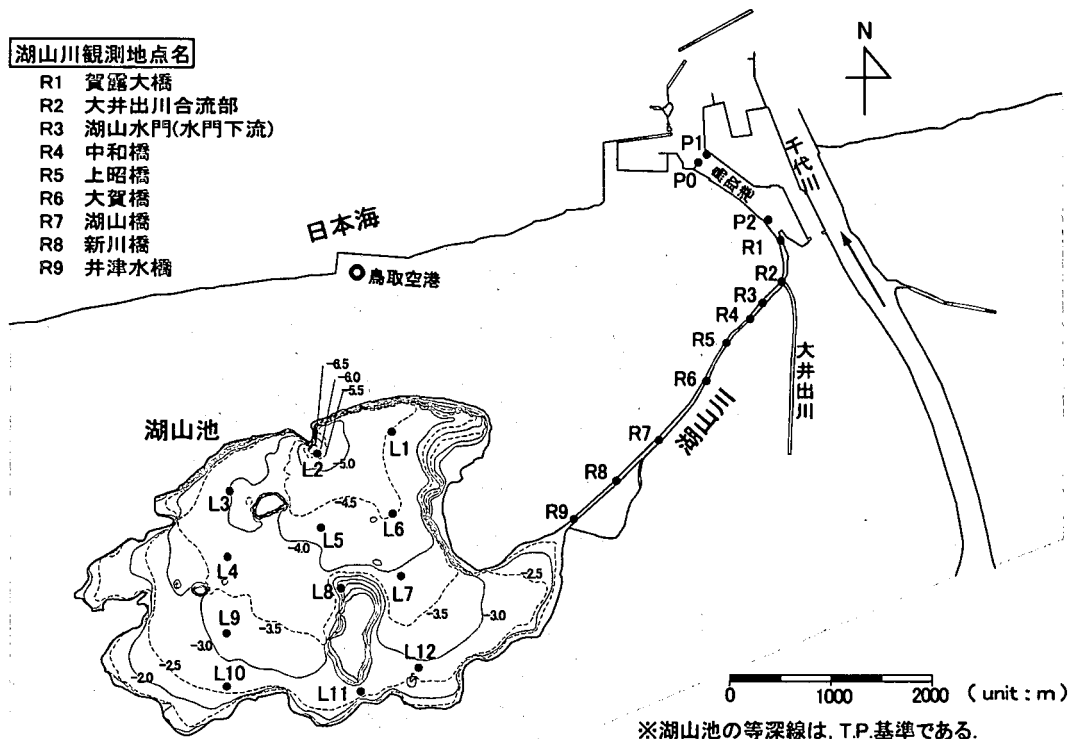


図-1 湖山池・湖山川・鳥取港における観測地点

a) 水温・塩分・DOの鉛直分布

海水の流入前は、湖山池の全体及び湖山川において、水温・塩分・DOの鉛直分布はほぼ一様であった。塩分は約0.2psu、DOは8~11mg/Lであり、最深部L2地点の湖底でもDO80%以上であった。なお、11月16日には湖山川R4, R5, R6の3地点において、最大約1psuの塩分が観測され、海水が水門の開放に伴いR6付近まで遡上していた。

b) 栄養塩濃度

11月16日の採水時に行われていたR4付近の浚渫工事の影響が少ないと考えられる、湖山川R7, R9及び湖山池L2における水質分析結果を図-2に示す。湖山池の年平均の濃度T-N=0.6mg/L及びT-P=0.06mg/L³⁾に近い値であり、冬季の平均的な水質である。ただし、湖山池L2の下層におけるP04-Pの濃度が高く、上下層ともNH4-Nが0.1mg/L以上あることから、最深部の湖底で一部嫌気化している可能性がある。

(2) 湖山川水門より下流部の水質

a) 水温・塩分・DOの鉛直分布

水門より下流の湖山川R1, R2, R3において、11月17日に行ったSTDT観測の結果を図-3に示す。水門下流では、水深が深くなるにつれて水温・塩分とも上昇し、河川水と海水が混合している様子が分かる。DOは、上層で約5mg/L(約60%)、下層で約3mg/L(約40%)と、湖山池の値よりかなり低くなっている。

b) 栄養塩濃度

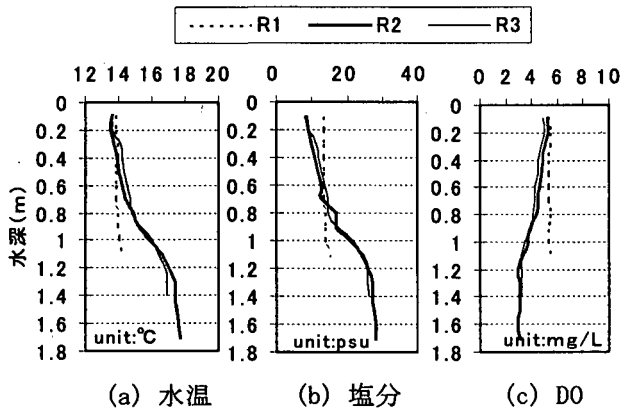


図-3 湖山水門より下流における水温・塩分・DOの鉛直分布

湖山川R1, R2, R3における水質分析結果を図-4に示す。R2地点は大井出川が合流するため、R1, R3より若干T-N, T-Pは低い、これら3地点の濃度は、水門上流であるR7地点のT-Nで約1.5倍、T-Pで約10倍と高濃度である。これは、採水を行った11月17日とその前日の水門開放により、鳥取港の海水が潮位の上昇に伴い湖山川に遡上し、その後、再び鳥取港へ戻る流れを繰り返したため、湖山川において周辺地域からの下水等の流入や底泥の巻き上げなどにより水質が悪化したと考えられる。

(3) 鳥取港の水質

a) 水温・塩分・DOの鉛直分布

鳥取港内のP1及びP2における観測結果を図-5に示す。両地点とも、水面から水深約1.5mまでの上層は、湖山川等からの河川水の流入による影響を受けて、下層より水温と塩分が低くなっている。DOは、両地点とも約4~5mg/L(50~60%)と低い値で一定し

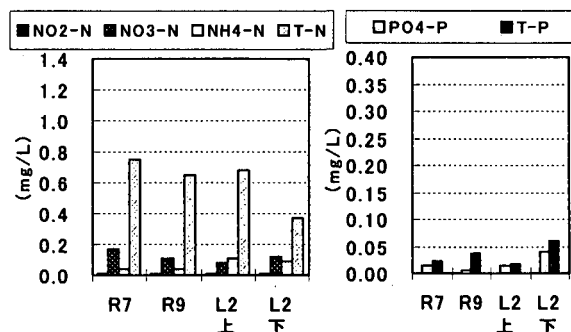


図-2 湖山水門より上流及び湖山池における水質

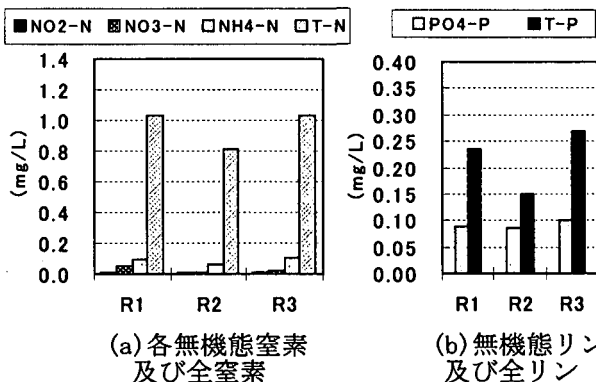


図-4 湖山水門より下流における水質

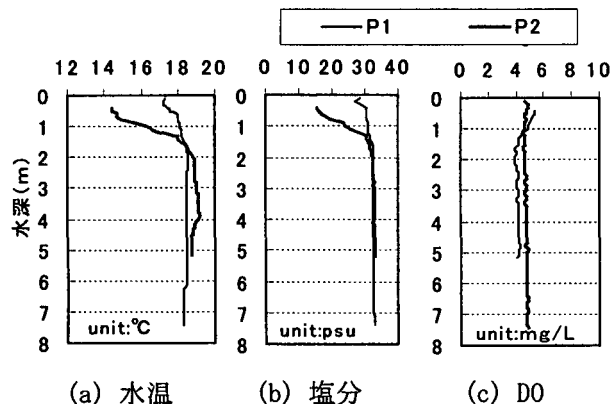


図-5 鳥取港における水温・塩分・DOの鉛直分布

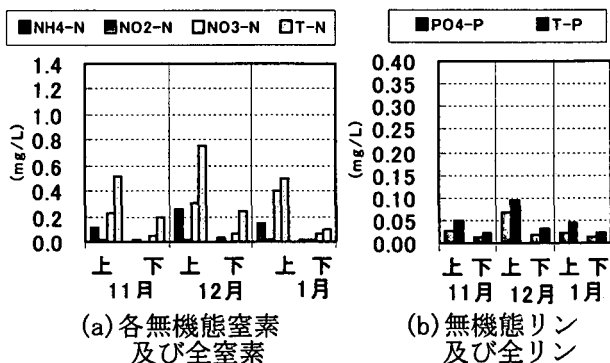


図-6 鳥取港における水質(2000/11~2001/1)

た鉛直分布を示しており、鳥取港内で海水が停滞し、日本海の海水との交換があまりなされていないことがうかがえる。

b) 栄養塩濃度

2000年11月～2001年1月における、P0地点での水質分析結果を図-6に示す。ただし、上層は水深0.5 m、下層は水深6mで採水されている。

各月とも、すべての栄養塩濃度は、下層より上層が高く、鳥取港の上層水は、富栄養化した湖山池から流出する河川水の影響を受けていると考えられる。また、各月とも、全窒素に占める無機態窒素の割合が約70%以上である。12月のようにNH₄-Nが0.2mg/L以上の高濃度を示すときもあり、湖山川に流れ込む下水等の影響と考えられる。

4. 海水流入時の湖山川の水質特性

(1) 水門の操作状況

湖山水門の開閉状況と湖山川R5, R7, R9の3地点での塩分変化を図-7に示す。これより、水門の開閉は頻繁に行われていることが分かる。11月15日以降で初めてR9地点まで海水が遡上したのは、16日17時30分～17日11時まで水門が開放された間であった。しかしながら、湖山池の水位が日本海の潮位より高かったため、池内への海水の侵入はなかった。海水の導水を意図した1回目の水門開放は、11月25日20時～26日3時である。この開放により海水は池内に流入したが、水門の運用規則で決められている（池全体で一様化した後の）塩素イオン濃度330ppmになる海水量には不足していた。そのため、再び日本海の潮位が高くなることが予想された29日21時5分～30日3時まで水門が開放された。この2回目の開放時には、湖山池の水位低下を目的として28日23時55分まで水門を開放した時に水門上流に遡上し滞留していた海水があり、その海水を鳥取港から新たに遡上してきた海水が押し流す形で湖山池に流入した。

(2) 湖山川の海水遡上状況

ここでは、より多くの海水が池内に流入した海水導水を意図した2回目の水門操作時の海水遡上状況

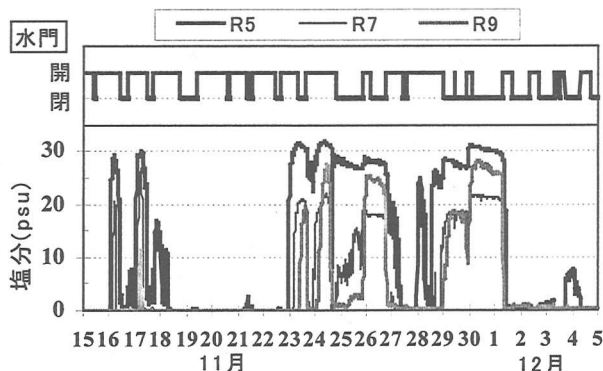


図-7 湖山川における塩分変化と水門操作状況

について述べる。また、海水遡上時の水質変化についても同じ時を対象とする。

海水の遡上状況を把握するため、湖山川R4～R9の6点において、下流から上流に向かう形で合計4回行ったSTDT観測より得られた湖山川の塩分縦断分布を図-8に示す。1回目の観測である(a)は、水門の開放前である。R4からR9の間で、水深約0.8m以深に海水が滞留していることが分かる。(b)は、21時5分の水門開放直後の観測である。湖山池に向かって海水が低層から侵入している。(c)及び(d)では、30日1時の満潮の潮位上昇にあわせて、高塩分の海水が強混合の形で遡上してきていることが分かる。また、濁度、D0の測定結果から、濁度は海水が遡上するに従い、若干であるが徐々に増加傾向であり、特に河床付近での増加が顕著であった。D0の場所的変化はあまりみられないが、R8からR9にかけて3、4回目の観測で減少していた。

(3) 海水遡上時の湖山川の水質変化

海水遡上時の湖山川R7及びR9の2地点における水質分析結果を図-9に示す。水門開放前である1回目の測定では、両地点とも海水が滞留している。図-2に示した海水流入前の栄養塩濃度と比較してかなり水質が悪化していることが分かる。特に下流側のR7地点のP04-P濃度が高くなっている。水門開放直後の2回目の測定では、R7よりR9におけるT-N・T-Pが低くなっているが、3、4回目の測定では、すべての栄養塩濃度について、上流であるR9の方が高濃度となっている。これは、海水が遡上してくる際に、

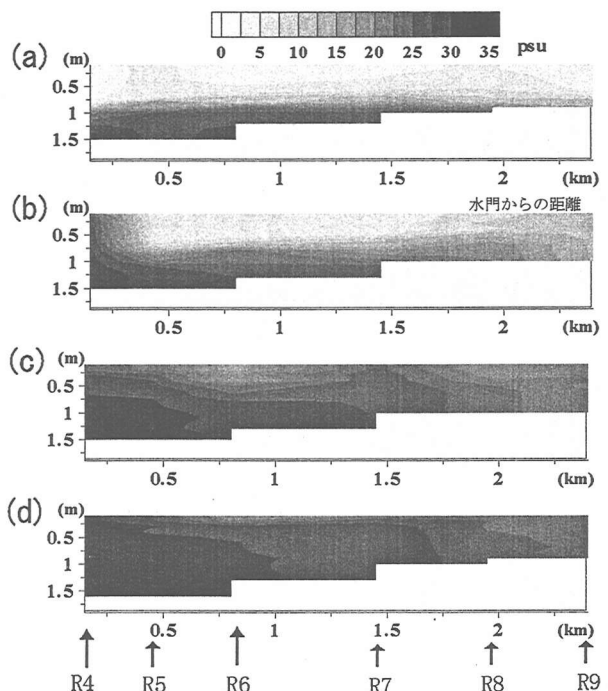


図-8 海水遡上時の湖山川塩分縦断分布

- (a) 第1回観測 R4:29日20:04～R9:29日20:53
- (b) 第2回観測 R4:29日21:26～R9:29日22:16
- (c) 第3回観測 R4:29日23:17～R9:30日0:26
- (d) 第4回観測 R4:30日0:49～R9:30日1:30

下水等の流入や底泥の巻上げが起こり、水質が悪化していくことによると考えられる。

以上より、水門より上流の湖山川に海水が滞留すると、底泥からの栄養塩の溶出や下水等の流入により水質が悪化し、海水の遡上する際にも下水等の流入や底泥の巻上げにより、水質が悪化していると考えられる。

5. 湖山池への海水流入による密度成層形成時の水質変化

(1) 海水の流入及び滞留状況

湖山池最深部L2に設置したサミスターチェインの測定結果から、11月26日9時に水深4.5m以深の水温が上昇し、水門が開放されて13時間後に海水が最深部に到達していることが分かった。また、11月30日の13時頃、水深4.5m付近で再び昇温しており、11月29日の水門開放後約16時間で海水が流入していた。

海水流入後の12月5日に池内のL1~L12で行ったSTDT観測により、L1, L2, L5, L6の4地点では水深約4m以深で水温・塩分が上昇し、水深の浅い他の観測点では、概ね様な水温及び塩分の鉛直分布を示すことが分かった。これより、海水は水深4m以下全体に滞留していることが明らかとなった。

(2) 最深部における塩分・濁度・D0の変化

最深部L2地点における塩分・濁度・D0の測定結果を図-10に示す。最深部に到達した湖底付近の海水の塩分は、11月28日12時で約12psu、11月30日15時で約13psuであった。湖山川R9地点で測定した海水の塩分は約25psuであることから、池内に侵入した海水は、最終的には同量の湖水を連行しながら最深部に到達していることになる。鳥取空港における風況によると、12月1日から5日までの風速は5m/s以下のことが多く、その間の海水層は水深4.5m以深で安定している。12月6日の午後は、風速10m/sを超えることも多く、この強風により塩分層が数10cm減少

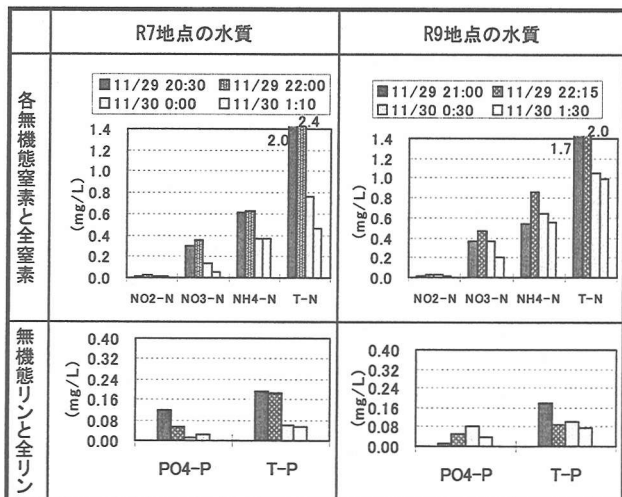


図-9 海水遡上時の湖山川の水質変化

している。その後、12月13日12時の測定まで約10psu以上の塩分層は水深約4.8m以下で安定していたが、12月13日13時頃から12月15日23時頃までの風速約5.0~19.5m/sの主に南西風により、12月15日3時頃に水温は鉛直方向に一樣となり、塩分層は破壊された。

濁度についてみると、11月30日12時に表層で約27psuと非常に高濃度であった。また、12月5日の湖内L1~L12のSTDT観測では、L1, L2, L3の3点の表層の濁度が高かった。この3点は海水の侵入経路となっており、海水は池内へ流入する時に、多量の懸濁物も運んでいると考えられる。11月30日15時~12月1日9時までの湖底付近の濁度は高く約5~8NTUである。これは、海水によりもたらされた懸濁物が沈降したためと考えられる。その後、12月6日から13日にかけて、水深4m付近の濁度が約4~5NTUと上層の約2.5NTUや塩分層の約1.5NTUより高くなっている。これは、12月3日以降の降雨による濁水が、塩分層の直上に流れ込んだためである。

次に、D0の測定結果をみる。塩分層が形成されていた11月28日12時の測定では、海水層で約2.7mg/L(30%)と海水遡上時のR9地点での測定値の約4~5mg/L(40~60%)と比較して既に減少している。その翌日の11月29日12時の湖底付近では1.7mg/L(18%)になり、1日で約1mg/Lも減少している。新たに海水が流入していた30日15時では3.6mg/L(35%)まで増加し、D0の供給がなされた。それ以降、湖底付近は、

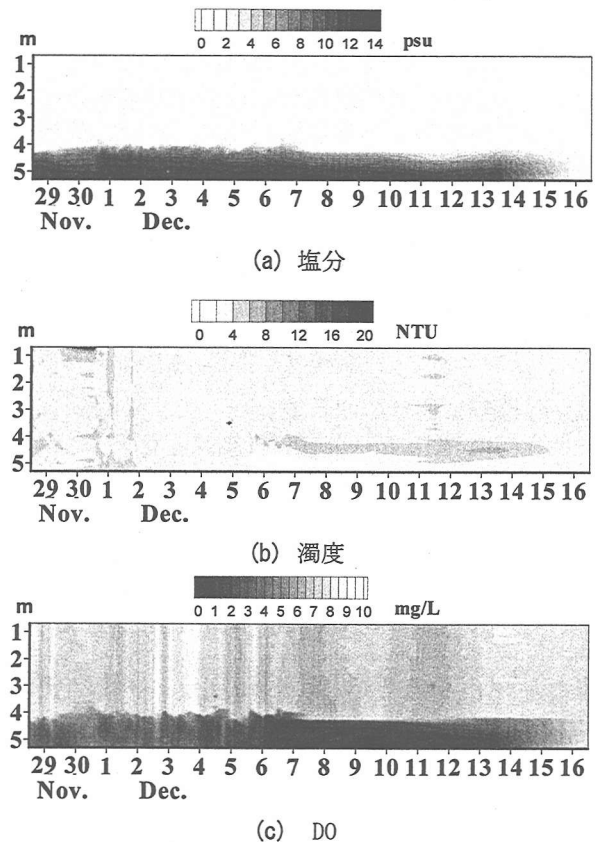
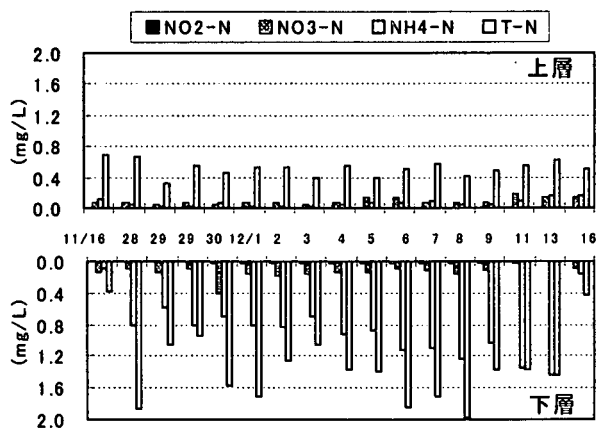
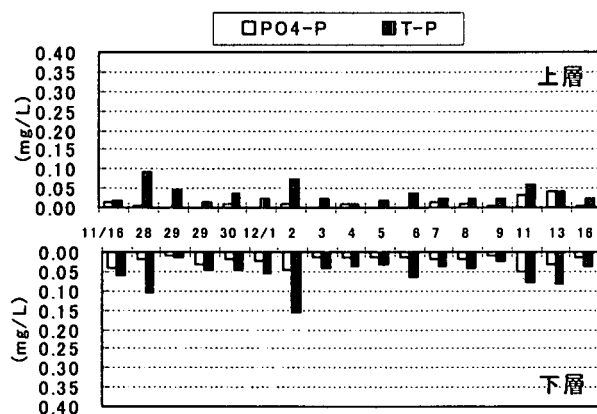


図-10 最深部L2における塩分・濁度・D0



(a) 無機態窒素・全窒素



(b) 無機態リン・全リン

図-11 最深部L2における水質変化

12月2日にDOが2mg/L(20%)以下となり、12月5日6時には0.4mg/L(4.5%)とほぼ無酸素の状態となった。その後、海水層である水深4.5m以下には、成層が破壊されるまでDOの供給はなく、約1mg/Lの嫌気状態が続いた。そして、成層破壊後の12月16日に、DOは全層で約7.8mg/Lと回復した。このように、湖山池に流入する時点ですでにDOの低下している海水は、最深部付近で成層形成後、数日で無酸素状態となり、成層の破壊までその状態が継続した。

(3) 最深部における水質変化

最深部L2地点での水質分析結果を図-11に示す。採水は11月29日のみ0時と12時の2回行い、その他は12時のみ行った。なお、海水流入前の11月16日の測定結果も示している。

a) 窒素類栄養塩濃度

測定期間中を通じて、上層の窒素類の栄養塩濃度は、ほぼ一定である。これに対し、下層では、海水層の存在する11月28日から12月13日まで高濃度となっている。特に下層の無機態窒素のほとんどはNH₄-Nであり、嫌気状態の影響を受けている。28日における下層のT-Nは1.87mg/L、NH₄-Nは0.8mg/Lであった。この海水は11月25日に湖山川を遡上し流入したものであり、その滞留していた容量から、その多くが鳥取港から流入したものである。また、鳥取

港からの海水が湖山池に流入する直前の栄養塩濃度は、R9地点における11月26日2時30分のT-N=0.9mg/L、NH₄-N=0.3mg/L程度である。よって、海水は湖山池に流入後、最深部に達するまでに底泥の巻上げや底泥からの栄養塩溶出により水質が悪化していると考えられる。また、11月29日から30日にかけて下層のT-N及び無機態窒素が増加している。これは、海水が流入した影響によるものと考えられる。

b) リン類栄養塩濃度

リンに関しては、上層と下層とでは大きな違いはみられなかった。また、海水が滞留している期間も大きな濃度変化はみられない。11月28日、12月2日のT-Pの増加は有機態リンの増加であり、海水流入による影響と思われる。また、最深部付近に到達した海水は、徐々に懸濁物が沈降し、それに伴いリン類の栄養塩濃度も低下し、成層形成後の海水層のDOは2mg/L以下に減少しているが、水温が低いため底泥からのPO₄-Pの溶出が顕著でなかったと考えられる⁴⁾。

6. おわりに

湖山池に流入する海水の存在する鳥取港は、外界との海水交換が活発でないためDOが低下していた。そして、水門操作により湖山川に海水が遡上あるいは滞留する時には、周辺地域からの下水の流入等により水質が大きく悪化していた。さらに、海水の湖山池内への流入時には、その侵入過程で水質が悪化していた。また、海水が最深部付近に滞留した後は、強固な塩分層の形成と海水層の嫌気状態が長期にわたって維持され、さらに水質が悪化していた。今後、湖山池を汽水湖として再生させるためには、本観測データをもとにした湖山池の水質変動予測モデルを構築し、その予測結果を踏まえ、海水導水の方法について十分議論し、対策を考える必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、鳥取県環境学術研究振興事業の補助を受けた。また、鳥取県鳥取土木事務所、鳥取県衛生研究所及び鳥取地方気象台鳥取空港出張所からは貴重なデータの提供を受けた。観測にあたっては、修士課程1年蓬萊敦司君をはじめ水工学研究室諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 早川一栄ほか：湖山池における水温・塩分層特性、土木学会中国支部研究発表概要集、pp.255-256、2000。
- 2) 道上正規・檜谷治・矢島啓：浅い汽水湖における密度成層の破壊特性、水工学論文集、第43巻、pp.1067-1072、1999。
- 3) 鳥取県：平成10年版鳥取県の環境白書、pp.34-36、1999。
- 4) 細川恭史・三好英一・堀江毅：栄養塩溶出速度の温度、DO依存性について、港湾技研資料、p.405、1981。