

II-74

網走湖の水環境と緩速酸素注入法による水質改善

北見工業大学 正員 海老江 邦雄
 学生員 玉村 英
 学生員 土井 克哉
 学生員 李 富生

1. ま え が き

網走湖(上層には淡水、下層には塩水が存在し密度成層を成している)では、昭和50年代から、水質の富栄養化に伴う水環境の悪化が問題となっている。水質悪化に直接関わる栄養塩の起源は、網走川を始めとする流域からの流送分と、湖内生産されたプランクトンが沈澱堆積して嫌気状態にある底部ヘドロ層からの溶出と淡水層への拡散に由来する成分とで考えられている。また、オホーツク海からの海水の流入は平均40万 m^3/d と推算されており、年間降水量の低減に伴う流域河川水の勢力減退に起因する塩、淡境界層の上昇が、無酸素状態にある下層(塩水)の湧昇流(いわゆる青潮)を引き起こし、漁業被害などの増大に拍車をかける状況となっている。したがって、網走湖底部の塩水層を多少なりとも好氣的環境に変えることができるならば、底泥からの有機物や栄養塩類を抑制できるであろう。その結果、塩水層の水質改善や塩水層から淡水層への栄養塩などの拡散も抑制され、網走湖の水質が改善されるものと期待される。

本論で採用した緩速酸素注入法は、従来、水道水源のダム湖などで使用されてきた空気揚水筒と一見類似してはいるが、塩水と淡水の混合を引き起こすことなく網走湖の下層にある無酸素状態の塩水部分に酸素を注入することができるように改善したものであり、この方法によって最終的に網走湖の水質改善を実現できるものと考えている。本論はこうした方法に関する基本的な2点、すなわち、(1)上層との混合を引き起こすことなく下層へ酸素供給する際の供給能力の評価、および(2)酸素供給に伴う栄養塩などの溶出抑制の程度などを基礎的に検討したものである。

2. 網走湖の水環境

(1) 網走湖の概況・・・網走湖は、図1に示すように、南西から北東方向への長軸をもった比較的細長い湖であり、湖の中心部にある最深部は深さ約16mで、面積が32.3 km^2 、容積が240 $\times 10^6 m^3$ で全面結氷、富栄養型に分類されている。現在は汽水湖であるが、もともとは海の一部を形成していた内湾で、いわゆる海跡湖である。尾形ら(1987)による湖底堆積物コアのボーリングによる採取や分析結果からも海湾から淡水湖へ、そして淡水湖から汽水湖へといった変遷が明かにされており、現在においても汽水化が進行している。汽水化が進んだ原因としては、降水量の減少により海水の朔上が相対的に多量になったことが主としてあげられている。

(2) 網走湖の構造的特徴・・・一般に、夏季の網走湖では水温は明確な成層状態(温度躍層)を示すが、顕著な塩分躍層も形成されている。これは、先に述べた汽水化とも関連することであるが、網走湖では水温、塩分濃度はともに水深5~10mの間で大きく変化している。夏季の表面温度は20 $^{\circ}C$ 以上あるのに対し10m程度までは0.2~0.3%から0.5%であるが、下層では2.1~2.5%台を示している。したがって、湖内で塩水と

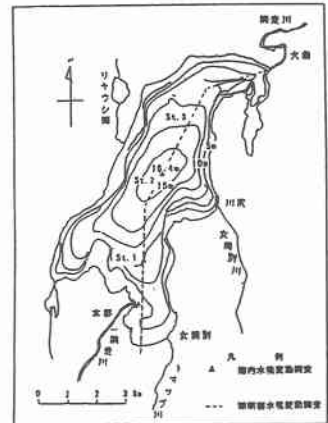


図1 網走湖の見取り図

Effect of Air-bubbling on the Improvement of Water Quality in Abashiri Lake
 by Kunio EBIE, Suguru TAMAMURA, Katsuya DOI and Fusheng LI

淡水は成層化しており、淡水層の水は循環するが塩水層の水は停滞している。このため、塩水層では無酸素状態となり、底泥からの栄養塩類の溶出が顕著に起こっており、底泥から溶出した栄養塩類は塩水層から淡水層へ拡散して水質悪化の原因となっている。溶出速度は琵琶湖や霞ヶ浦と同レベルであることが分かっている。

3. 緩速酸素注入法の実験装置と実験方法

今回の実験では、網走湖の底層に無酸素状態で存在する塩水層に緩速で酸素を注入した場合の酸素供給能力の評価と、それに伴う栄養塩類などの溶出抑制の効果とを把握することにより、緩速酸素注入法の有効性を確認することが目的である。

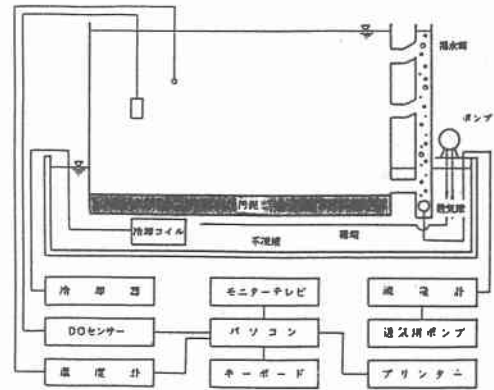


図2 実験装置の概略

この目的を達成するために、図2に示す網走湖を想定したモデル水槽を用いた。この水槽のサイズは幅45cm、深さ45cm、長さ90cmで容量は182Lである。同図右端の揚水筒と水槽を結ぶパイプは上、中、下部の3ヶ所に設けられた。上部のパイプと下部のパイプの間隔は35.5cm、中間のパイプから下部パイプまでの間隔が21cmである。

この水槽内の水に酸素を供給する方法は次のようである。まず、揚水筒下部の散気球から送気用ポンプ、流量計を経由させて空気を供給すると、気泡が揚水筒内を上昇する際のエアリフト効果によって、揚水筒内の水が押し上げられる。この際、下部パイプから水槽内の下層の水が吸引されると同時に、上部パイプから水槽内上部へ水を押し込むことで水の循環が起こる。揚水筒内では、散気球から供給される気泡が水と接触するので、その過程で、気泡の表面から酸素が水中に溶解していく。したがって、散気球から気泡を揚水筒内に放出すると、随伴流と酸素溶解が同時に起こり、水の循環に伴って水槽内水の溶存酸素が徐々に上昇していくのである。また、溶解しなかった空気については、揚水筒の水面から大気中に出る。これは揚水筒と水槽を結ぶパイプの一部を傾斜させたためであり、気泡が循環水と一緒に水槽内へ流入することはない。

散気装置の酸素供給能力の評価法には定常法と非定常法とがあるが、今回は、非定常法により総括酸素移動容量係数と酸素溶解効率を測定・計算することにより酸素供給効果を評価することとした。実験には本学水道水（深井戸水）を用いたが、これを無酸素状態にするためには適量の亜硫酸ソーダを注入した。また、実験としては、水槽内に水道水のみを入れた場合と水道水に食塩を混ぜた場合について供給空気量を変化させて実験を行った。なお、これらの実験における塩分濃度としては、網走湖の塩分濃度が2.0%から2.5%にあることから2.5%に設定した。

4. 実験結果および考察

(1) 総括酸素移動容量係数と酸素溶解効率の算出……今回の実験で採用した非定常法における総括酸素移動容量係数 K_{La} の計算式は最終的に次のように表される。

$$K_{La} = \frac{2.303}{t_1 - t_2} \log_{10} \frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t_1 および t_2 はそれぞれ測定開始と終了時刻 (hr)、 C_s は飽和DO濃度 (mg/l)、 C_1 および C_2 はそれぞれ時刻 t_1 、 t_2 における水槽内水のDO濃度 (mg/l) を表す。

また、供給空気のうち実際に水に溶解した酸素量の割合 (%) は次式で与えられる。

$$e = \frac{1.024^{20-T} \cdot V \cdot C_s \cdot K_{La}}{18 \times 10^4 \cdot Q} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V (m^3) は、タンクの容積、 T は水温 ($^{\circ}C$)、 C_s (mg/l) は、水温が T のときの飽和DO濃度、

Qは供給空気量 (m³/min)を表す。

図3と図4はそれぞれ淡水と塩水について測定された経時の水槽内水のD O濃度の上昇過程を示している。これらの図をみると、当然のことであるが、空気量が多い場合ほど酸素の上昇勾配が大きい。また、淡水と塩水を比べると、飽和D O濃度の低い塩水の場合では、淡水よりも短時間のうちにほぼ飽和状態に達していること、塩水のD O濃度の上昇勾配が淡水より著しく大きくなっている。こうした結果に基づき、上述の総括酸素移動容量係数 K_L と酸素溶解効率 e を算出すると表1のようになる。なお、 K_L の計算に当たっては、D Oの上昇過程、すなわち、 $\log (C_s - C_t)$ の直線部分を用いている。

淡水の実験において、供給空気量が320ml/minの場合と70ml/minの場合を比較すると前者の方が大きい K_L の値をとっている。これは、供給空気量が多いほど気泡の総表面積が大きく酸素の移動量が増加したためと考えられる。それに対し酸素溶解効率については、70ml/minの方が大きい値をとっている。これは、気泡量が少ないほど単位供給空気量当りの気泡の総表面積が大きくなることを意味する。つぎに塩水を用いた実験において同じ供給空気量における淡水と塩水の K_L を比較すると、塩水の方が大きな値となっている。この理由としては、次の2つが挙げられる。その1つは、 K_L の計算式において塩水の飽和D O濃度が淡水の場合より低くなり、したがって、 \log 項の値が相対的に大きくなること、また、淡水中に空気を供給すると主に会合により気泡径が増大して気泡の総表面積は減少する。また、塩水の塩分濃度が高いことから密度が大きくなった分だけ塩水の方が気泡径が小さくなり会合し難くなる。このように、いずれにしても、揚水筒中を上昇するに伴って気泡の総表面積は減少するが、塩水の方が相対的にその減少量が少なくなることが、2つ目の理由と考えられる。

以上の結果、緩速酸素注入法によって気泡を随伴させることなく溶存酸素を水槽内水に供給できること、および、その程度を把握できた。

(2) 底泥からの栄養塩類の溶出抑制に関する実験……栄養塩類の溶出抑制の評価実験では、基本的な構造が図2と同様で深さ65cm、幅30cm、長さ65cmの寸法の水槽を2槽使用した。水槽の底部には網走湖の最深部近傍で採取した底泥を16L(厚さ約7cm)敷きならし、この底泥の直上水としては、本学水道水に食塩を添加して塩分濃度を2.5%にした後、亜硫酸ソーダを加えて無酸素状態に調整して用いた。こうした状態の水槽を2槽用意し、一方には一定量(165 ml/min)の空気を供給し、もう一方には空気を供給しない、すなわち、静置状態(無酸素)に維持して、水槽内の水を経時に採水し、それらのCOD、D O、pH、アンモニア性窒素、リン酸態リンなどの濃度の変化を追跡した。

このような状況に設定した両水槽の底泥からの栄養塩類の溶出状況については、図5～図8に示す通りで

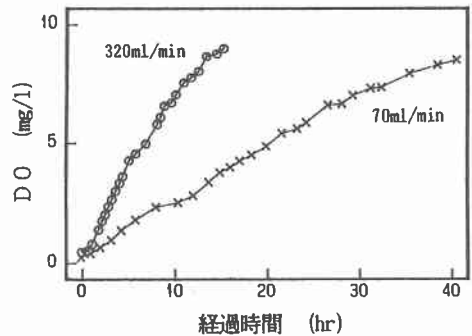


図3 D Oの経時変化(淡水)

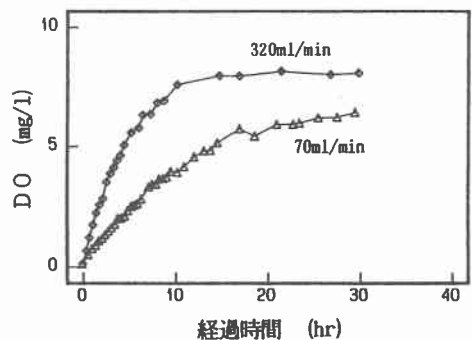


図4 D Oの経時変化(塩水)

表1 K_L と e の値

空気供給量 (ml/min)	K_L (hr ⁻¹)	e (%)
70 (淡水)	2.8×10^{-2}	5.7
70 (塩水)	5.9×10^{-2}	8.3
320 (淡水)	8.8×10^{-2}	3.6
320 (塩水)	18.8×10^{-2}	6.2

ある。まず最初にDOについては、実験開始後の2度目の測定(16時間後)には、既に酸素供給した水槽内で11mg/l程度まで上昇し、過飽和状態となっていた。底泥が酸素を消費しているにも関わらず、比較的短時間のうちにDO濃度が過飽和になったことは、底泥の酸素消費がそれほど多くなかったことを示している。水槽の底泥表面は、いずれの槽においても当初は真黒であったが、酸素供給した水槽では徐々に薄茶色に変色し、3日後には厚さは3mm程度まで全体が薄茶色に変色していた。それに対し、空気供給しなかった水槽では、DOは殆ど0の状態が続き、汚泥の色も不変であった。

図5のpHに関しては、酸素注入を行っていない方はほぼ6.9と一定であったが、酸素注入を行った方は時間とともに上昇し、6日頃には7.9程度となっている。このようなpH下におけるCODの挙動は、図6でみられるように酸素注入の有無に関わらず類似しており、当初30~40mg/lであったが、3日頃から28~29mg/lで安定状態になった。図7に掲げたアンモニア性窒素に関しては、数十時間以降は、若干の抑制傾向が認められるようである。最後にリン酸態リンに関しては、酸素注入を行った方ではリン濃度が時間とともに明かに減少している。このように窒素、リンについては、水槽内水が好気環境になったため、溶出が抑制されたものと考えられる。

以上の結果、酸素供給の有無による底泥からの溶出に関しては、pHの上昇とリン酸態リンとの抑制が明確になったがCODとアンモニア性窒素の挙動についてはいまだ不明の点が残っており、今後さらに検討が必要のようである。

5. あとがき

今回の実験的検討によって、次の結論が得られた。

(1) 酸素供給能に関しては、いずれの空気供給量においても、塩水の場合は淡水の場合より高い K_{1a} と e を示しており、淡水層より塩水層への酸素供給が容易であることを明らかにした。

(2) 緩速酸素注入法による栄養塩類などの抑制に関しては、酸素供給に伴い、pHが徐々に上昇し、十分な酸素の存在下で特にリン酸態リンの抑制が明確に認められた。

今後はこうした成果を踏まえて、実施施設規模の実験に移って行きたいと考えている。

【文 献】

- 1) 鷹野 洋・吉岡敏行 他: 児島湖底泥の含有汚濁物質の濃度分布とその特性, 水環境学会誌, 第17巻, 第6号, pp. 397-402, '94.6.
- 2) 中村由行: 底質の酸素消費過程における濃度境界層の役割, 水環境学会誌, 第16巻, 第10号, pp. 732-741, '93.10.

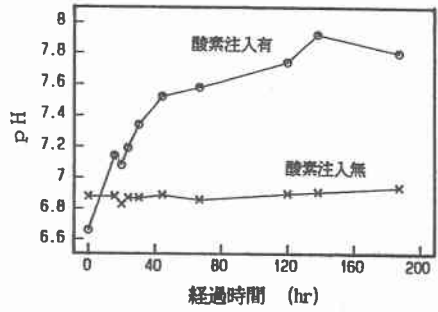


図5 pHの経時変化

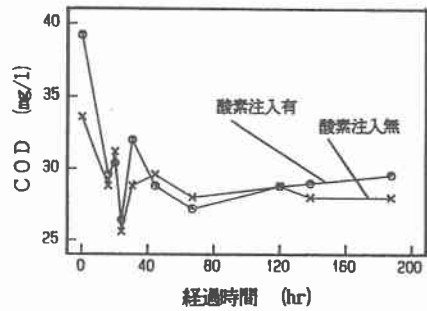


図6 CODの経時変化

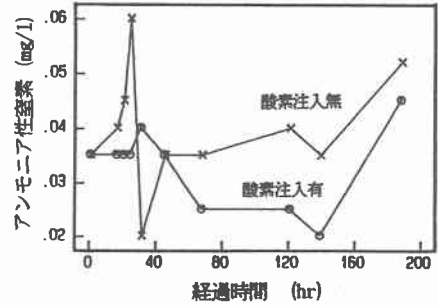


図7 アンモニア性窒素の経時変化

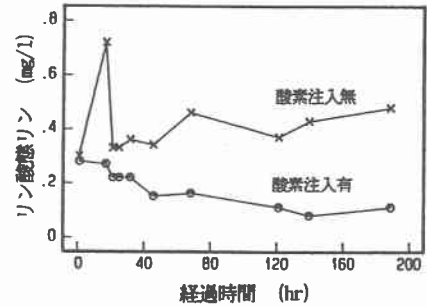


図8 リン酸態リンの経時変化