

第63回(2019年度) 北海道開発技術研究発表会論文

汽水湖の底層貧酸素改善に関する 試験プラントの運用

(国研) 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○杉原 幸樹
村山 雅昭

網走湖で塩水層の貧酸素水塊の解消を目的として、現地に気液溶解装置(WEP)を建設して酸素供給による水質変化について実水域で観測を行った。二ヶ月間の酸素供給を行った結果、装置周辺では溶存酸素の上昇が確認されたが、その範囲は非常に小さかった。硫化水素による酸素消費が大きく、溶存酸素として検出できないことが確認された。一方で酸素供給時に固体硫黄が析出することから、濁度をトレーサーとすると、底層水塊の流れに沿っておよそ120 m四方に酸素供給効果が波及していた。また水質分析の結果から、WEPによる酸素供給によって、任意標高の汽水性貧酸素水塊の無毒化及び栄養塩濃度の減少が可能であることが示唆された。

キーワード：汽水湖、硫化水素、WEP、底層貧酸素

1. はじめに

ダム、湖沼、海域など停滞性水域における底層貧酸素化により漁業や水質の面で多くの問題が起こっている。これまでも底層貧酸素改善を目的に現地観測やモデル化、酸素供給等による直接的な改善に関する研究も行われている¹⁾。淡水性のダム等では、散気式の酸素供給による栄養塩濃度、金属イオン濃度の低下が観測され、溶存酸素濃度の上昇を報告している。また、海域においては窪地など特殊地形に限定的に酸素供給による効果が報告されている²⁾のみである。

塩水性水塊で流動影響が無視できない区域や結氷する水域での酸素供給影響については報告がないため、実際の結氷する汽水湖沼での酸素供給効果を検証することを目的とした。我々は網走湖の貧酸素塩水に水中型気液溶解装置(WEP：特許第3849986号、松江土建(株)・土木研究所)を用いて、酸素供給時に起こる化学的変化について現地で実験を行った結果を報告³⁾し、硫化水素の酸化によって固体硫黄が析出して無害化することを明らかにした。WEPの特徴として酸素溶解させた水塊の供給は水平方向に卓越し、鉛直混合を起こさない特徴がある。汽水湖のように塩淡二層構造を有する場合には塩水と淡水を鉛直混合すると、淡水層の貧酸素化や有害物質暴露など水質課題を鉛直方向に拡大させる可能性があるため、鉛直混合を抑制しつつ酸素供給する対策が必要となる。そこで本研究は、現地にWEP酸素供給プラントを建設し、運用による水質変化について各種観測を実施し、その結果をまとめる。

2. 試験設備の建設と観測

(1) 対象水域

対象水域の網走湖(図-1参照)とした。主な流入河川は網走川と女満別川であり、網走川が流入河川水量の約97%を占めている。平均水位は標高0.39 m(国土交通省、水文水質DBより1971～2016年の網走湖観測所平均)であり、下流部では網走川を通じてオホーツク海に接続し、海水が遡上して湖内では塩水と淡水の二層構造を形成している。網走湖では内水面漁業が重要な産業であるが、一方で塩水層は湖内に局在化して貧酸素化しているため、貧酸素水塊中の硫化水素や栄養塩が高濃度に蓄積しており、強風等で淡水層に暴露されて、たびたび大規模な水質障害が生じている。また、網走湖の水位は潮位や洪水により標高-0.2～2.4 mで変動し、塩淡境界は標高4～7 mで表面水位とは独立に変動する。このため水深では高さを規定できないため、本論文では標高で統一する。

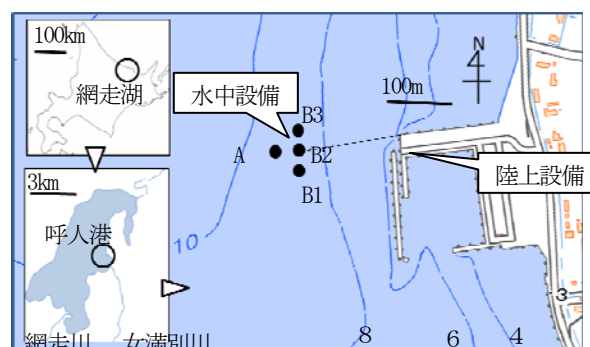


図-1 調査位置図

(2) 試験設備

網走湖内の呼人港に酸素精製機など陸上設備、および岸壁から160m湖心側(図-1中B2地点)の標高-7mの位置にWEPなど水中設備を建設・設置し、概略を図-2に示す。なお、網走湖は国定公園かつ河川管理区間であり、漁港が存在し、漁業権を有する水域である。このため公園法、河川法、港湾法、公共水面に関する必要な申請等を実施して施工・調査を行っている。水中設備は大きさ20m³、陸上重量1.2tで吐出量120m³/hのポンプを搭載し、浮力が100kgになるように浮子を取り付けた。水中設備はB2地点に図-2に示す様に係留した。500kgのアンカーで固定、吐出口が標高-7.3m、吸入口が標高-6.8mになるように係留した。設置時の塩淡水境界は標高-6.2mであったが、残気吐出口は塩水の連行が起きないように標高-3.5mに設定した。陸上設備は酸素圧送するための圧縮機や配電盤を装備し、送気管と電線を水中設備に接続させた。2017年8月28日に施工、調整完了し、2017年8月29日より24時間の連続運転を開始した。

(3) 現地観測

a) 鉛直観測

投下式水質計を用いて、図-1中B2地点で鉛直観測を実施した。一定期間毎に定期的な観測を実施し、また運転2ヶ月後にはB2を中心に300m四方内の18地点で水質鉛直分布観測を行い、空間的な水質観測を実施した。

b) 自記計観測

図-1中A地点に超音波流速計(TELEDYNE RD Instruments Workhorse sentinel 1200 kHz)と圧力式水位計(Onset Computer Corporation HOBO-U20)を標高-9mに係留した。また、B1、B2、B3の各地点の標高-7.5mに塩分水温計(JFEアドバンテック Compact-CT)、光学式溶存酸素計(JFEアドバンテック RINKO-W)、クロロフィル濁度計(JFEアドバンテック Infinity-CLW)を係留した。B1とB2間、B2とB3間は25mの距離をとって南北方向に配置した。2017年8月28日～2017年11月3日の期間中に全ての機器は1時間間隔でデータを取得した。

c) 水質分析

鉛直観測と同一日にB2地点およびA地点の標高-3m(淡水)と標高-7.5m(塩水)で採水を行い、日本工業規格に準じた水質分析を行った。分析項目は全有機炭素(TOC)、溶存態有機炭素(DOC)、全リン(T-P)、オルトリン酸態リン(PO₄-P)、全窒素(T-N)、アンモニウム態窒素(NH₄-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)である。硫化水素については、大学との共同開発中の固定法により定量した。また、北海道開発局網走開発建設部のホームページで公開されている定期水質観測結果を比較参考とした。

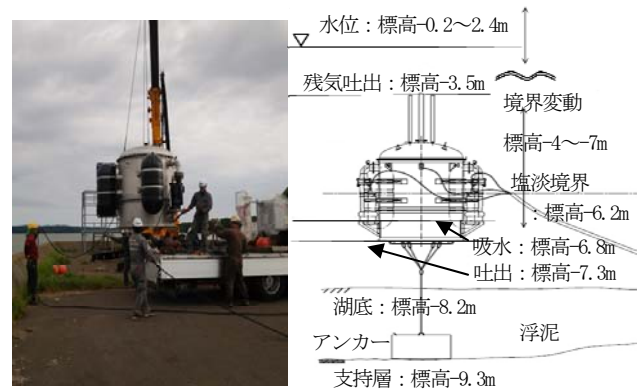


図-2 左：水中設備外観と右：水中設置概略立面図

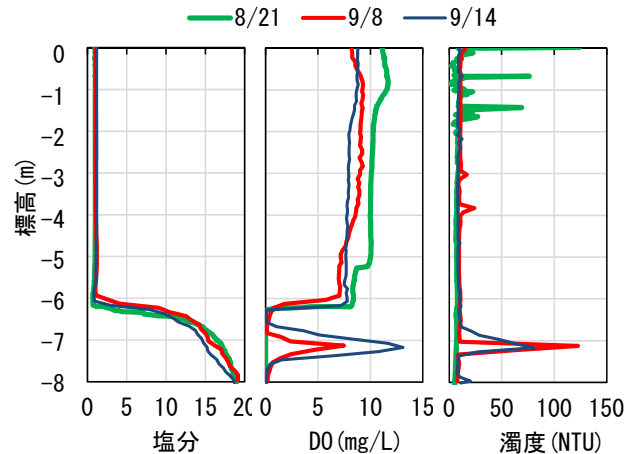


図-3 B2地点の鉛直分布の変化(左:塩分, 中:DO, 右:濁度)

3. 観測結果

(1) 鉛直観測

図-3にB2地点での鉛直分布の変化を示す。塩分は塩淡水境界位置が10cmほど変動するが、鉛直分布に大きな差は見られない。DOは標高-6.2m以上の淡水部は、ほぼ鉛直均一に分布し、8~12mg/Lとなっていた。塩水部は標高-7.3mにピークを有する分布となり、底層方向にも濃度の拡散が確認された。濁度は標高-7.3mに特異的にピークを有する分布となっていた。この結果から試験プラントの運用により現地スケールにおいても、設定標高に選択的に酸素供給を行い、硫化水素の酸化によって固体硫黄が生成して濁度上昇⁶⁾となっていることが確認された。塩分の分布からも塩淡水境界を破壊することなく水平方向卓越で酸素供給できていることが確認された。

(2) 自記計観測結果

WEP運転期間中の気象庁網走観測所の降雨量と風速のデータ、国土交通省網走潮位データ、湖水位は本研究の観測データを図-4にまとめる。運転開始から9月14日までは降雨も無く、湖水位も安定して風が継続していた。9月20日に風速が14m/s以上となり、その後は断続的に強風や降雨がみられる。なお、強風発生時の風向は

ほぼ南南西であった。一方で湖水位は降雨時を含めてもほぼ標高 0.2~0.4 m で変動しており、例年同時期と比較すると極めて水位変動が小さい年であった。さらに湖水位と潮位が逆転する時が散見され、2017 年は例年に比べ降雨流入が少なく、海水の逆流頻度が高い年であった。

次に A 地点の超音波流速計の観測結果より標高-7.5 m を抽出して北方成分と東方成分を図-5 に示す。強風に対応して流速が増加するような挙動がみられるが、おおよそ±5 cm/s の間で変動していた。2ヶ月間の平均流速は北方成分 0.47 cm/s、東方成分-0.32 cm/s であり、北北西方向に 0.57 cm/s であり、時間あたり 20 m ほどの移動に相当する。なお、鉛直方向の流速は±1 cm/s 以下で変動し、平均は 0.03 cm/s であった。次に水塊の移動を確認するため、図-5 の結果を各成分毎の流速を加算して軌跡として図-6 に示す。積算期間は2017年8月29日15:00~11月2日12:00である。この軌跡は約2ヶ月間の定性的な水塊移動を示す。運転開始直後は原点付近に水塊が固まり最大限に酸素供給効果が現れると推察される。9月4日に、おおよそ7 m/s の風の発生にともない北北西方向に水塊が移動しはじめ、強風発生時に対応して流向に変化がみられ、おおまかに強風時に南向きに流向が変化する挙動を繰り返すことが確認された。この結果から B2 地点で酸素供給した水塊は南北方向にゆらぎながら、北北西に移動すると推察される。これは B2 地点には常に新たな無酸素水塊が供給されることを示している。なお、淡水層（標高-6 m 以上）では南向きに卓越する流れが観測され、その流速は塩水層の 10 倍ほどであった。よって塩水層の流れは、降雨や風波による淡水層流速による摩擦や水面変動に伴う動水勾配の発生に起因すると考えられる。

次に B1、B2、B3 における DO の観測値を図-7 に、濁度の観測値を図-8 に示す。B1 は酸素供給点(B2) の南側、B3 は北側に位置している。DO は B2 で最も濃度が高く、0~25 mg/L で変動している。次いで B3 で 0~15 mg/L の濃度が検出されているが、10月20日以降は DO が検出されなかった。B1 では、ほぼ DO が検出されないが、強風発生時に対応して DO が増加していた。流速の観測結果ともよく一致しており、北向きに流れが卓越して、強風時に南向きに変わる水塊の挙動を反映している。なお、風波による塩水層の鉛直混合や酸素供給は網走湖では確認されていない⁷⁸⁾ため、これら DO 上昇は酸素供給に由来する現象である。また現地底層水に一時的に酸素供給を行った水槽実験の結果から、現状硫化水素濃度では、20 mg/L で DO を供給しても約 30 分でゼロとなる。さらに流動によって多量の硫化水素を含む無酸素水塊が新たに供給されるため、供給した DO は速やかに消費されて変動が大きくなっていると考えられる。次に濁

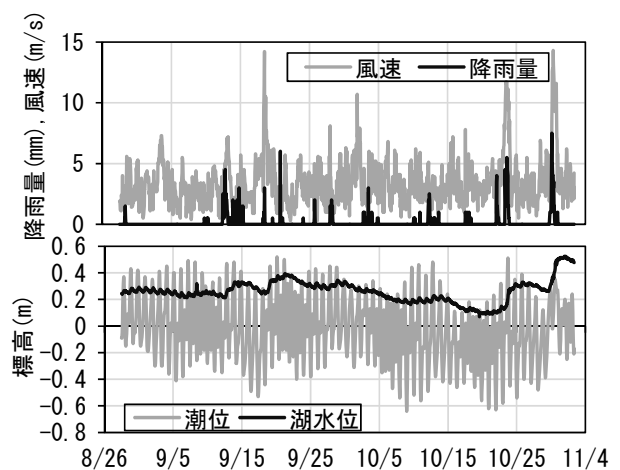


図-4 気象、水文状況

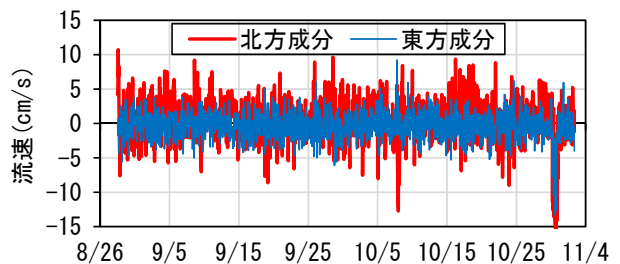


図-5 流速観測結果(A地点標高-7.5m抽出)

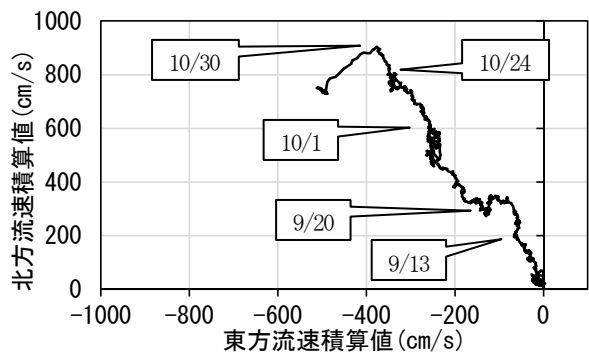


図-6 水塊の相対軌跡

(A地点標高-7.5m, 起算8/29, 期間64日)

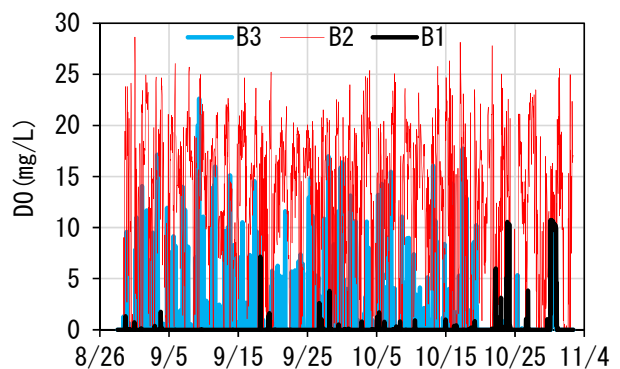


図-7 各地点 DO の連続観測結果

度の観測結果をみると、B3ではB2よりも平均的に高い濁度で推移し、強風速発生時に対応してB1の濁度上昇が顕著となっていた。硫化水素が酸化され、DOが消費

されることで固体硫黄が水中に分散し、濁度が上昇する⁹挙動が現地スケールで明確に発現していると推定される。固体硫黄は移流輸送と沈降が同時進行するために観測データが一定値とならずに変動が大きくなると考えられる。しかしながら塩水性貧酸素水塊において、硫化水素が高濃度の場合には DO を検出することは困難であり、濁度をトレーサーとして活用することで、酸素供給影響を把握できることを示唆している。表-1 に各観測データの統計値をまとめると、B2 で酸素供給と硫黄生成し、流動にそって移動する。下流側の B3 で DO は検出できないが、濁度が増加傾向を示して硫化水素の反応が進行しながら硫黄が輸送されることが推察される。

次に WEP 運転 58 日後に WEP 設置位置を中心として、面的に鉛直観測を行い標高-7.5 m の DO と濁度を抽出したコンター図を図-9、図-10 に示す。図-9 の DO は中心付近に 20 mg/L の高濃度がみられるが、5 m ほどの距離で 3 mg/L 以下となっていた。北北西方向および南方向に有酸素がみられるが、DO 濃度は低く、溶存酸素の上昇は 40 m 四方の範囲であった。図-10 に濁度の分布を示す。濁度は中心から北側に広く分布し、その範囲は 120 m 四方に及んでいる。また、東側 100 m ほどの地点にも高濁度帯がみられ、酸素供給の影響とも考えられるが、ほぼ湖底に位置する地点であり、底泥の巻き上げ等の観測影響も考えられる。今回の観測では濁度成分の分離（底泥土粒子か固体硫黄）ができないため、詳細は不明であるが、酸素供給による硫化水素の酸化は水塊の移動に添って北北西方向に拡大していることが確認された。このとき、水中の硫化水素濃度が高いために、供給した溶存酸素は速やかに消費されるために、小さな範囲でしか検出できない。一方で硫化水素と反応した痕跡は濁度として拡散するため、酸素供給による硫化水素の改善は運転を 58 日継続した時点で、湖水の自流に流されながら 120m 四方に影響していることが確認された。

(3) 水質分析結果

水質分析結果について B2、A(B2 からの距離 40 m)、湖心(B2 から距離 1.7 km)の 3 地点で淡水(標高-3 m)と塩水(標高-7.5 m)の 2 層の比較を行う。図-11 に T-P の時系列変化を示す。淡水層では B2、湖心ともにほぼ同様の単一増加する挙動を示し、水平方向の水質が均一に分布していることが推察される。湖心の塩水層では淡水に比べ 40 倍ほど濃度が高く、ほぼ 3~4 mg/L の間で大きな変動なく推移している。B2 は WEP 運転前は湖心と同程度であったが、運転後は濃度が低下していた。A 地点では湖心と B2 の間の地点となり、時間とともに湖心濃度に漸近する挙動であった。開発局の分析は無機態リンを計測していないため、本研究で分析した B2 地点と A 地点に

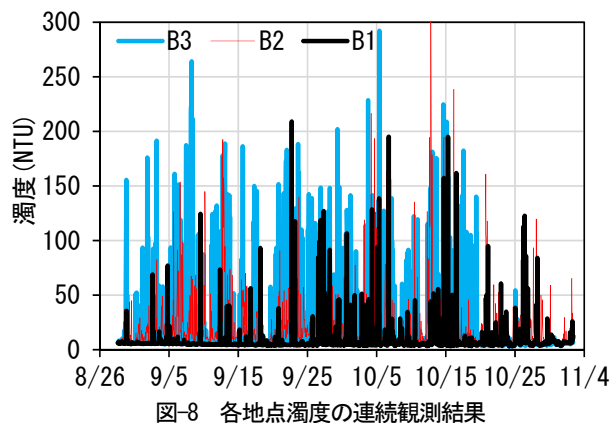


図-8 各地点濁度の連続観測結果

表-1 DO と濁度観測値の統計値

観測	項目	B1	B2	B3
DO	平均	0.18	11.69	1.11
	標準偏差	1.23	7.61	3.01
濁度	平均	9.03	21.35	25.91
	標準偏差	16.68	28.61	41.59

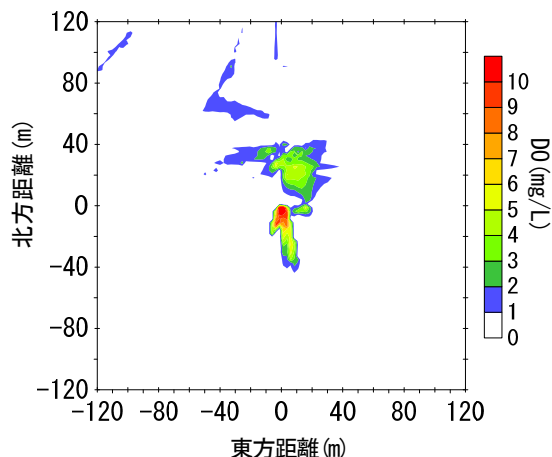


図-9 標高-7.5mのDO平面分布(運転58日後)

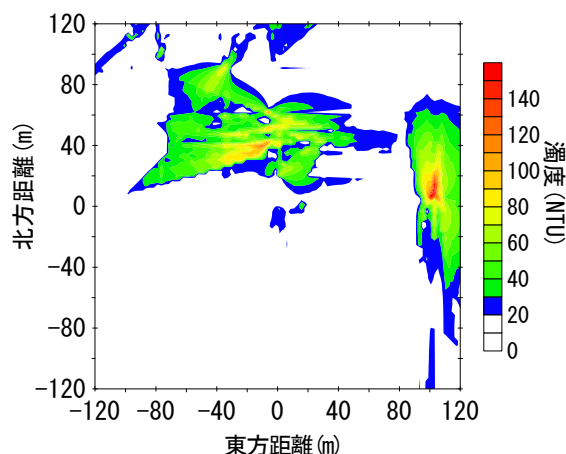


図-10 標高-7.5mの濁度平面分布(運転58日後)

ついて PO₄-P の結果をみると、T-P 中の PO₄-P の割合は、いずれの分析日についても淡水層では 50%前後、塩水層では 90%以上であった。このことは酸素供給によっ

て塩水層の $PO_4\text{-P}$ が減少し、淡水層には供給されないことを示唆しており、塩水層内で土粒子や硫化物などに吸着されて濃度の減少が観測されていると推察される。

次に図-12 に T-N の時系列変化を示す。淡水層では湖心と B2 地点はほぼ同様の 9 月前半に最低値となる谷状の変化挙動を示した。湖心の塩水層では淡水層の 15 倍ほどの T-N 濃度で 14~18 mg/L でほぼ横ばいで推移した。B2 地点や A 地点では酸素供給後に濃度が低下し、吐出点から離れるほど湖心濃度に漸近する挙動を示し、T-P と同様の挙動となった。無機態窒素について分析した結果は、淡水層では $NO_3\text{-N}$ のみが検出され、T-N に占める割合は 10~40% で冬に近づくほど割合が高くなった。水温の低下にともない有機態窒素が減少して無機態窒素が余剰することに起因していると思われる。一方で塩水層での無機態窒素は $NH_4\text{-N}$ のみが検出された。

B2 地点の塩水層 (標高-7.5 m) と淡水層 (標高-3 m) および A 地点の塩水層 (標高-7.5 m) における TOC の変化を図-13 に示す。B2 淡水層の TOC はほぼ一定値で推移し、塩水層では酸素供給によって濃度が低下していた。なお、TOC のほぼ 100% が DOC であった。網走湖の水質分布は同一標高で平面的に均一に分布し、無氷期には塩分分布が躍層構造を維持することから塩水と淡水はほとんど混合しない特徴⁹⁾がある。そのため有機物の減少は水平移流や鉛直混合希釈ではなく、底層である塩水層でのみ減少することを示している。また硫酸化物や金属硫化物の存在下では有機物の分解や分子吸着、窒素化合物の脱窒や分子吸着^{9), 10)}などが報告されており、底泥の金属硫化物の酸化によってリン酸の吸着が助長される¹¹⁾ことから、T-P や T-N および TOC の変化は塩水層内で何らかの形態で分解や吸着・沈降除去によって濃度低下にいたると推察される。ここで、形態別窒素の変化を図-14 にまとめる。無機態窒素は $NH_4\text{-N}$ 、 $NO_2\text{-N}$ 、 $NO_3\text{-N}$ の合算と考えられるが、無酸素塩水中では $NH_4\text{-N}$ のみが検出されているため、 $NH_4\text{-N}$ 濃度のみを図中に示す。差分は T-N から $NH_4\text{-N}$ を減じた値である。図より酸素供給前は T-N は 95% が $NH_4\text{-N}$ であったが、酸素供給後には $NH_4\text{-N}$ が減少すると同時に T-N も減少した、 $NH_4\text{-N}$ は T-N の 50% ほどとなり、差分が増加する挙動となった。通常において差分は有機態窒素として考察されるが、図-13 の挙動と一致しないことから、差分に分類される成分は本研究で分析した形態以外であることが示唆される。詳細は不明であるが、アンモニアや炭素が減少することから尿素などの影響を想定している。以上から酸素供給によってリン、炭素、窒素の濃度低下が観測された。これらは上層の淡水層との混合による拡散希釈ではなく、塩水層のみで進行する反応である。現状ではリン、炭素、窒素のいずれも、析出する硫黄に由来する物質や底泥に吸着され、沈降しているものと推察される。

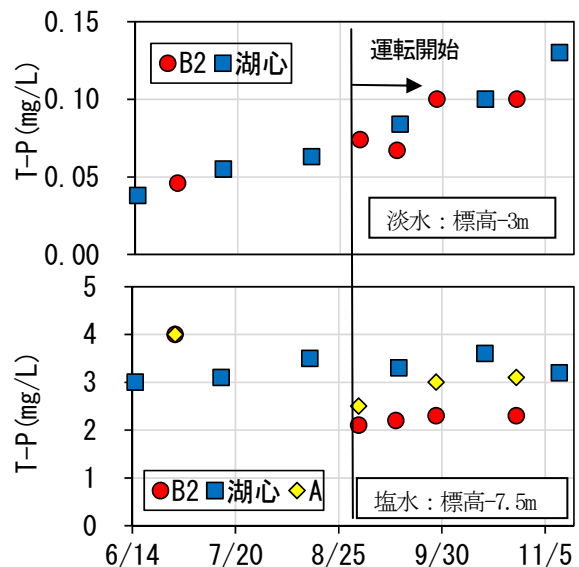


図-11 T-P の変化

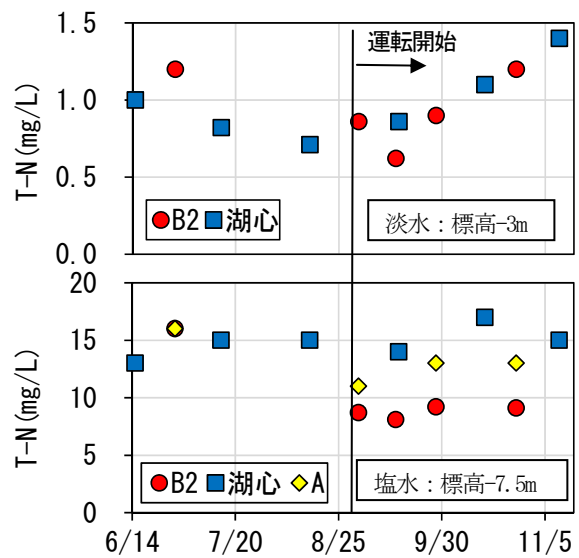


図-12 T-N の変化

質や底泥に吸着され、沈降しているものと推察される。

次に B2 地点における、硫化水素の鉛直分布の変化を図-15 に示す。WEP 運転前の 6 月 30 日には塩水層(標高-6.5m)以深で濃度が急増し、深いほど濃度が高く、B2 地点の湖底付近では 112 mg/L となっている。WEP の吐出点である標高-7.5 m 付近では 57 mg/L となっていた。WEP 運転を開始して 1 日後の 8 月 30 日には塩淡水境界は標高-6.2 m であり、標高-6.2 m~-7.5 m は塩水層であるが、硫化水素がゼロとなっていた。さらに湖底付近も 56 mg/L まで濃度が低下していた。その後は湖水の流動によって沖合の硫化水素が供給されることで、濃度が上昇する挙動となった。標高-7.5 m では継続的に 24 mg/L となっており、湖水が循環するなかで約 60% の硫化水素削減が持続される結果となった。残留濃度としては高い値を維持しているが、B2 地点の標高-7.3m からの酸素供給によって B2 地点では湖底におよぶまでの塩水層内

(標高-6.2m~-8.2m) 全体で、約 50%の硫化水素の濃度低下が確認された。

4. まとめ

網走湖の底層貧酸素改善のため、現地に酸素供給装置を建設し、現地スケールでの運用試験を実施した。

純度90%の酸素を精製・圧送して水塊中で酸素を溶解させ、吐出量120 m³/hのポンプでDOを供給した結果、吐出点近傍ではDOが20 mg/Lまで上昇した。しかし無酸素塩水中の硫化水素による酸素消費が大きく、DOとして検出できる範囲は非常に小さかった。一方で硫化水素の酸化によって生成する固体硫黄を濁度として追跡することで、影響範囲を検出可能となった。湖水流動にそって、影響範囲が拡大し、24時間の2ヶ月稼働で約120 m²の範囲で酸化反応の影響が確認され、リン、窒素、有機態炭素、硫化水素の濃度低下が確認された。硫化水素については吐出標高が最も酸化が進行するが、塩水層内の鉛直方向にも影響が波及し、吐出地点では継続的に硫化水素の50%削減となっていた。今後はより長期の運用を行い、詳細を観測する予定である。

参考文献

- 1) Paul E. B.: Total Phosphorus and Dissolved Oxygen Trends in the Central Basin of Lake Erie, 1970-1991, Journal of Great Lakes Research, Vol.19, No.2, pp.224-236, 1993.40, pp.97-105, 1983.
- 2) Antonopoulos, V.Z., Gianniou, S.K. : Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece, Ecological Modelling, Vol. 160, No. 1, pp. 39-53, 2003.
- 3) Zackary, W. M., Cayelan, C.C., Alexandra, B.G., Kathleen, D. H., Jonathan, P.D., Spencer, D.K., Ryan, P.M., Madeline, E.S.: Effectiveness of hypolimnetic oxygenation for preventing accumulation of Fe and Mn in a drinking water reservoir, Water Research, Vol. 106, pp. 1-14, 2016.
- 4) Beutel, M.W., Horne, A.J. : A review of the effect of hypolimnetic oxygenation on lake and reservoir water quality, Lake and Reservoir Management, Vol. 15, No. 4, pp. 285-297, 1999.
- 5) 増木新吾, 矢島啓, 清家泰: WEP を用いた中海 (米子湾) 浚渫窪地底層への高濃度酸素水導入実験, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 67, No. 4, I_1525-I_1530, 2011.
- 6) 杉原 幸樹, 新目 竜一: 汽水湖の貧酸素改善手法に関する実験的研究, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 73, No. 7, III_351-III_356, 2017.
- 7) 池永均, 山田正, 向山公人, 大島伸介, 内島邦秀: 網走湖の塩水化の機構と塩淡二成層の長期変動特性に関する

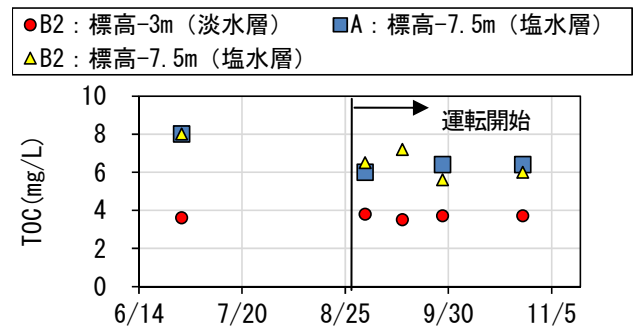


図-13 TOCの変化

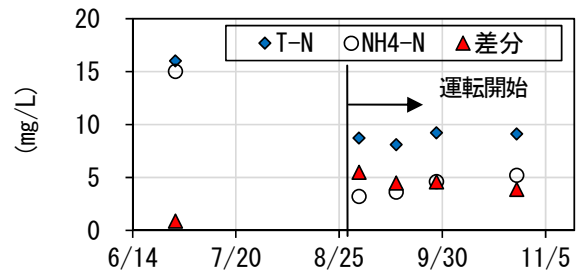


図-14 形態別窒素の変化 (B2 地点標高-7.5m)

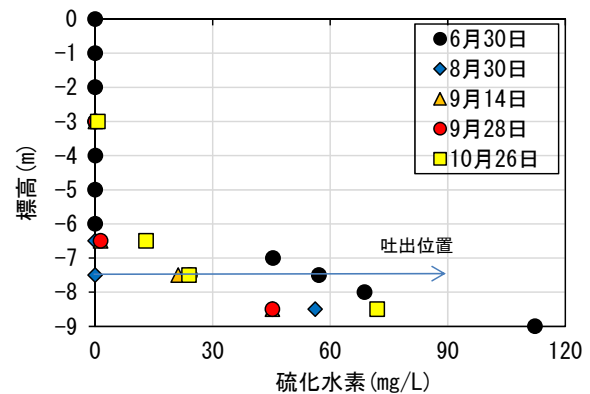


図-15 硫化水素の変化 (B2 地点)

- 研究, 土木学会論文集, No. 600/II-44, pp. 85-104, 1998.
- 8) 杉原幸樹, 平井康幸: 塩淡境界を持つ汽水湖の結水下的水質挙動, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 72, No. 4, pp. I_655-I_660, 2016.
 - 9) Tian-wei Hao, Peng-yu Xiang, Hamish, R. M., Kun Chi, Hui Lu, Ho-kwong Chui, Mark, C. M. V., Guang-Hao Chen: A review of biological sulfate conversions in wastewater treatment, Water Research, No. 65, pp. 1-21, 2014.
 - 10) Anastasiia, K., Stefano, P., Luigi, F., Maria, R. M., Estefania, P., Gavin, C., Piet, N. L.L., Giovanni, E.: Elemental sulfur-based autotrophic denitrification and microbially catalyzed sulfur hydrolysis and nitrogen conversions, Journal of Environmental Management, No. 211, pp. 313-322, 2018.
 - 11) 篠原隆一郎, 古里栄一: 湖沼におけるリンの動態研究に関する近年の動向, 地球環境, No. 51, pp. 159-170, 2017.