

底層貧酸素改善のための酸素溶解装置の運用

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○杉原 幸樹

停滞性水域における底層は無酸素化しやすく、水質悪化が顕著である。水質改善のため現地スケールでの溶存酸素の供給実験を行った結果、硫化水素の除去にともなう水質の改善が確認された。その際、含有物質の反応および装置の運用に係る課題も抽出され、同時に運転費用および保守費用等の知見をとりまとめた。その結果、隔離水塊による一定水量の水塊処理が最も効率的かつ運用コストを最小にできることが示唆された。

キーワード：無酸素水塊、溶存酸素、硫化水素、水質改善

1. はじめに

停滞性水域の底層貧酸素にともなう、水質障害は増加傾向にあり、貧酸素改善を目的に酸素供給に関する様々な研究や対策がなされている¹⁾。いずれも酸素供給により栄養塩濃度、金属イオン濃度の低下が観測され、底層溶存酸素濃度の上昇を報告し、嫌気溶出の抑制に効果があると報告している。しかし、社会実装を検討するために必要な維持費等については言及していない。また、海域においては報告例が非常に少なく、効果の検証も十分ではない。

これまで、最も貧酸素化が継続しやすいと想定される、結氷する汽水湖沼での酸素供給効果を検証するため水中型酸素溶解装置(WEP：特許第3849986号、松江土建(株)・土木研究所)を用いて、実水域で通年での運用試験を実施して、結氷下を含めて通年で選択した水深で溶存酸素を供給して、水質改善することを報告してきた²⁾。そこで本資料は、複数年稼働させた結果から結氷する汽水条件での維持費用や管体変化をとりまとめ、社会実装に向けた課題を抽出し、導入を計画する際の基礎情報をとりまとめる。

2. 対象水域と試験装置

(1) 対象水域

北海道北東部に位置する網走湖(図-1 参照)を対象水域とした。湖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。網走湖では塩水が湖内底層に滞留して貧酸素化するため硫化水素やアンモニアなどの有害物質によって、たびたび大規模な水質障害が発生しており、塩水層の水質改善が重要な課題となっている。なお、網走湖は例年12月～3月まで湖面が全面結氷して最大1mほどまで氷厚が成長する水域である。結氷前後も塩水密度が高いた

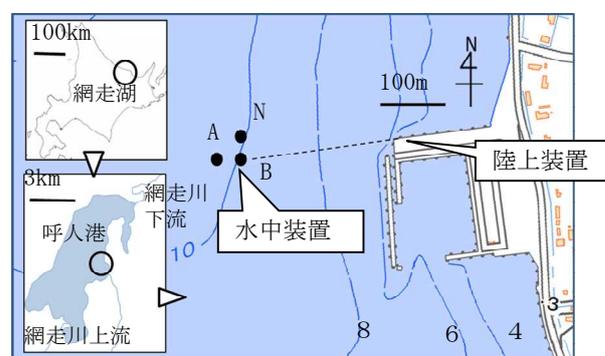


図-1 調査位置図

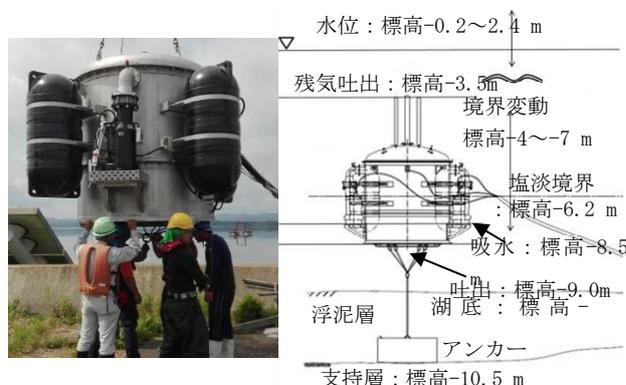


図-2 左：水中装置外観と右：水中設置概略

めに塩水と淡水が混合せず全層での循環期は存在しない。さらに氷板により水面からの酸素供給が遮断されるため、湖水全体の酸素濃度が低下する挙動を示す。

(2) 試験装置

網走湖内の呼人港に酸素濃縮器など陸上装置、および岸壁から180m湖心側(図-1中B地点)の湖底標高-10mの位置に酸素溶解装置など水中装置を設置した。水中装置概略を図-2に、構成規格等の概要を表-1に示す。水中装置は大きさ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。B 地点に図-2 に示す様に水中立上で係留設置した。500 kg のアンカーで支持層に固定し、吸吐水口が目的標高になるように係留した。ここで、陸上で濃縮された酸素ガス(濃度 92 %)は水中装置に圧送し、圧送総量の 80 %が水中溶解する。そのため余剰酸素を残気体排気口から排気する必要がある。塩淡水境界は標高-4.0 m~-7.0 m で変動するため、気泡上昇による塩水の連行が起きないように残気体吐出口は標高-3.5 m に設定した。また、水中装置は陸上装置から電源と酸素供給を受ける構造である。このとき電気ケーブル長による電圧降下を考慮し、水中ポンプの起電圧を確保できるように陸上での受電圧を設定している。現地は水面が潮位や降雨によって変動し、かつ冬期には結氷し、氷厚は 1 m 程まで成長する。そのため水面での断線の可能性があるため、鋼製の保護板を作成、設置している。加えて設置水塊は無酸素塩水のため、金属性筐体を設置するには防蝕対策が必要であり、亜鉛板を接続させている。次に陸上装置は酸素濃縮器、酸素圧送するためのコンプレッサー(水深 10 m 適用容量で設定)や制御盤等を装備し、送気管と電気ケーブルを水中設備に接続させた。冬期の運用を想定し、給気管およびドレーンの凍結閉塞対策のためにヒーターを付設している。さらに港部は洪水時に冠水することが度々観測されている。そのため、既往最高水位の標高 2.4 m 以上に装置を設置し、冠水対策として港先端より棚上げする構造とした(写真-1 参照)。

なお、設置位置は国定公園内で河川区域であり、港湾区域である。そのため、公園管理者、河川管理者、港湾管理者の三者に許可および申請が必要な箇所であり、適切に対応している。以上のように、設置にあたり電力計画および防蝕対策、冬期対策等の不具合要因の抽出と適切な対応には留意する必要がある。加えて水域や土地の占用・使用手続き等も適切に行う必要がある。

3. 酸素供給時の水質変化

本稿の対象水域である網走湖の無酸素水塊中には高濃度の硫化水素が蓄積している。硫化水素は毒性を有すると同時に強力な還元剤であるため水中の溶存酸素を消費する。さらに現地は塩水が滞留するうえに、結氷により水面閉塞するため、無酸素水塊が局在化しやすい。そのため対象水域の水質改善においては硫化水素の除去が不可欠となる。

ここでは酸素供給時の水質変化を抜粋して紹介する。詳細については既往報告³⁾⁴⁾を参照されたい。図-3 に現地標高-9 m の水塊を水槽に採取して、溶存酸素(DO)を連続的に供給したときの溶存硫化水素濃度の変化を示す。図に示すように約 1 時間 DO 供給することで、硫化水素が無害な単体硫黄へと酸化されたことが確認された。次に図-4 に実水域において WEP を運用したときの水中装置近傍の鉛直水質分布を示す。WEP の吐

表-1 装置構成概要

区分	名称	備考
水中装置	酸素溶解装置	φ 3m x H2.5m
	水中ポンプ	120m ³ /h(7.5kW)
	電気ケーブル	200m
	送気管	200m
	残気体排気管	3m
陸上装置	酸素濃縮器	6Nm ³ /h(0.3kW)
	コンプレッサー	1.63Nm ³ /min,0.83MPa(11kW)
	制御盤	
	凍結防止ヒーター	0.2kW
	電気ケーブル	400m
	建屋	5m x 4m x 3m
	トランス盤	

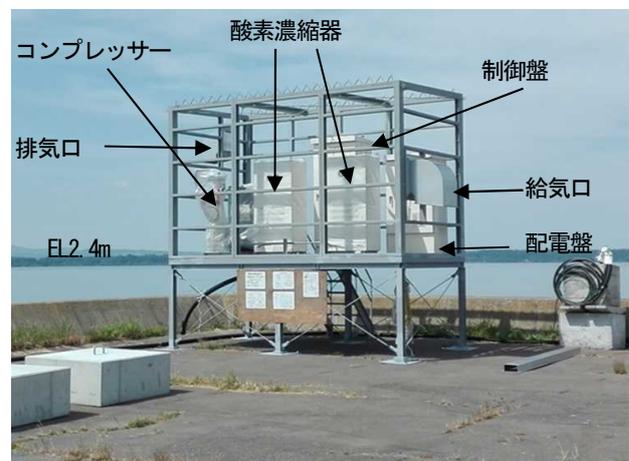


写真-1 陸上装置外観 (外壁設置前)

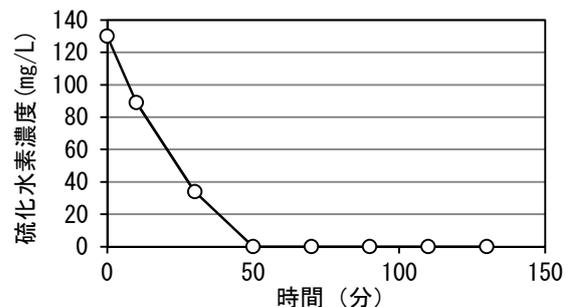


図-3 酸素供給時の硫化水素濃度変化

出口標高を-9 m、-7.5 m と変化させても標高選択的に DO の供給ができており、酸化反応が進行した痕跡である単体硫黄による濁度の上昇が確認された。このように DO を供給することで硫化水素の酸化無害化、余剰 DO による水塊 DO の上昇が起こることが確認された。このとき DO 供給層の栄養塩なども濃度の減少を示して水質が改善することが確認された。

硫化水素の酸化反応式から硫化水素と酸素は同物質量で反応する。つまり硫化水素と DO はほぼ同じ質量濃度で反応することを意味している。このことは供給した DO と同質量の硫化水素が無害化されることを示してお

り、実際に現地においても供給酸素量と同質量の硫化水素が削減されていた。

さらに吐出口標高を変更して装置を2ヶ月運転後に鉛直観測を平面的に実施し、標高-7.5mと標高-9.0mの濁度を抽出してコンター図として図-5に示す。標高-7.5mでは装置の北西の範囲が優先して水中装置を中心とした円状に濁度の上昇が確認された。標高-9.0mでは装置から北側に600mの距離まで濁度上昇が確認された。観測範囲内の濁度上昇は幅300mで南北方向700mの210,000m²に広がり、酸素供給影響が確認された。DO供給して生成した固体硫黄は水塊の移動に追従して広がっていた。なお塩淡水界面から深いほど流向の変化および流速が小さくなることを観測しており、塩淡水界面近傍では水平面の水塊の混合や往復移動が大きいと、濁度の広がりが小さいと考えられる。

次に各標高の湖心とB地点の硫化水素濃度を時系列の変化として図-6に示す。ここで標高-7.5m吐出時は酸素溶解装置を24時間の連続運転しており、標高-9.0m時は2時間おきの間欠運転としている。標高-7.5mの湖心では時間の経過とともに60mg/Lから90mg/Lに濃度が上昇していた。B地点では24時間連続運転を継続し、湖心に比べて約45mg/L濃度が低下しながら、時間軸方向では増加傾向を示していた。この時、湖心の硫化水素の増加率を便宜的に直線回帰によって見積もると日当たり0.071mg/Lとなった。同様にB地点の増加率を見積もると0.077mg/Lとほぼ一致していた。ここで、酸素供給により反応する硫化水素量を推定すると、反応式³⁾より原子質量比は硫黄原子：酸素原子=1.06：1となる。水質分析による結果は硫化水素は硫黄原子換算、DOは酸素原子換算の質量濃度であるので同一体積内の反応を考慮するとほぼ同質量が反応して硫化水素が酸化され、DOが消費されることになる。B地点で供給される吐出DOは40~50mg/L(平均43.6mg/L)で、時間あたりの吐出量が120m³/hである。B地点で連続してDOを供給し、沖合から連続して硫化水素がB地点に流入する場合には、B地点での硫化水素低下量は供給したDOとほぼ等しくなると考えられる。湖心と比較した硫化水素の低下量は46.2mg/Lとなり、吐出DOの観測結果の1.06倍とほぼ一致した。間欠運転時には硫化水素の低下量は23.3mg/Lとなった。この結果から、硫化水素濃度が供給DOより高い場合には供給したDOはすべて硫化水素の酸化のために消費されることがわかる。このとき原水の硫化水素濃度が経時的に増加する場合、供給DOはほぼ一定であるため、供給DOよりも硫化水素濃度が高いと、酸化後の残存する硫化水素濃度が経時的に増加する挙動となると考えられる。

4. 運用費用と課題

(1) 電力量と料金

SUGIHARA Koki

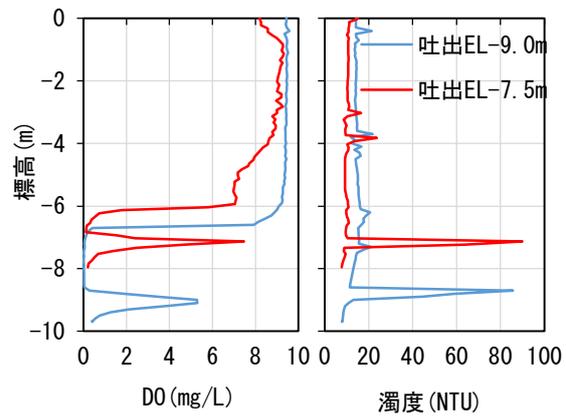


図-4 酸素供給時のDOと濁度の鉛直分布

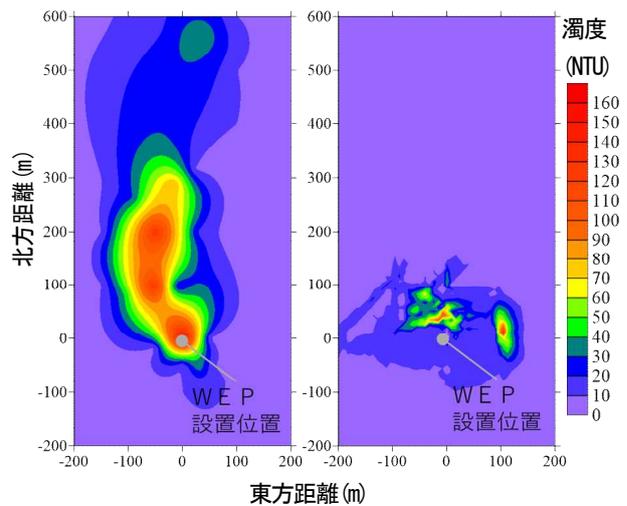


図-5 運転2カ月後の平面濁度分布
(左：EL-9.0m；右：EL-7.5m)

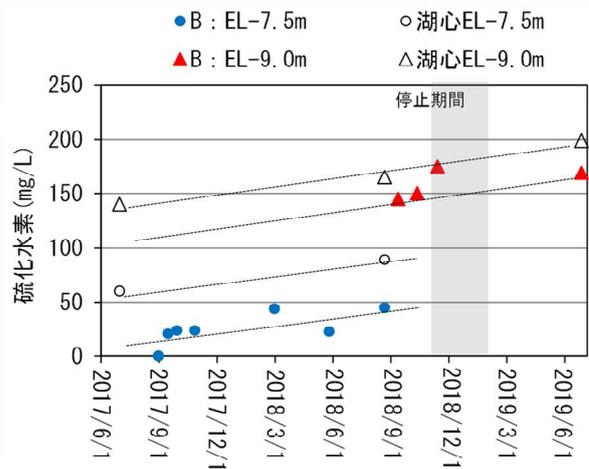


図-6 硫化水素濃度の経時変化

複数年にわたる現地での試験プラント運用を実施した結果、運転費用や保守費用、筐体の耐久性や点検頻度などの知見を以下にまとめる。

陸上装置は大気から酸素を濃縮して水深10mまで圧送する構成となっている。このため、酸素濃縮器やコンプレッサー等の運転に電力を用いており、本試験におい

ては、電力のすべては電気供給会社との契約により使用している。表-1 に電力量の内訳を記載しているが、実際の使用電力量は 24 時間の連続運転時には冬期を含む日平均で 516 kWh を使用していた。運転時間を日 12 時間（2 時間間隔の間欠運転）とした場合には使用電力が 272 kWh となり、使用量は 6 割弱となった。このときの料金の換算すると、24 時間運転では 1 日あたり 11,000 円、12 時間運転で 6,600 円となった（北海道電力の 2017～2020 年基準）。

本試験では水深 10 m に酸素圧送するためコンプレッサーは 11.4 kW/h の電気容量のものを使用している。コンプレッサーの電気容量に対する圧送可能水深を図-7 に示す。20 kW/h にすると水深 18 m まで対応可能となるが、使用電力量は約 2 倍となる。コンプレッサーを 40 kW/h とすると水深 37 m まで対応できるが、使用電力量は 10 m と比べ 4 倍となる。次に目標水深毎の 1 年間の電気料金の概算を図-8 に示す。24 時間運転で 365 日運転した場合の電力量から、北海道電力の 2020 年時点での料金より算出した結果である。水深 10 m で約 400 万円、水深 37 m で約 940 万円の電気料金が必要となる試算となった。現在 2022 年においては 10%ほど料金が上昇しており、運転を計画される場合の参考とされたい。

(2) 水中装置維持費用

酸素供給を継続すると、水中硫化水素が酸化されて固体硫黄として析出する²⁾。このため、水中ポンプの吸水口に硫黄が固着する挙動が確認された。写真-2 に 1 年間の 12 時間運転による、吸水口の状況を示す。ポンプはロータリー式のため、枝などが混入しないように保護具を装着している(写真-2 右写真参照)。左の写真から明らかのように、保護具に硫黄が固着し、通水阻害となっていた。固着する硫黄量は原水の硫化水素濃度に依存すると考えられ、現地の濃度分布から標高が低い（水深が深い）ほど高濃度であり、実際に固着する硫黄量は低標高ほど多かった。通水阻害が継続すると水中ポンプに負荷がかかり、ポンプの故障等が発生する。実際に運転試験 3 年目に回転軸の欠損、防水機能低下にともなう漏電が発生して水中ポンプの交換が必要となった。

また、塩水に金属製管体を設置することから、電気防食のため亜鉛板を接合させている。写真-3 に示すように約 2 年の設置で、2 kg の亜鉛板がほぼ消失していた。管体重量から水中装置合計で 8 kg の亜鉛板を使用した。2 年でほぼ消失していた。加えて金属部品の耐久試験のため、ボルトなどに鉄、ステンレス、チタンなど様々な材質を用いて、劣化確認も行ったが、防蝕機能が維持されており、いずれの材質においても重大な欠損は確認されなかった。

これらの挙動から水中装置においては少なくとも 2 年に 1 度の点検、補修が必要であることが明らかとなった。水中装置の陸揚げや再設置には、用船や部材費を含めて

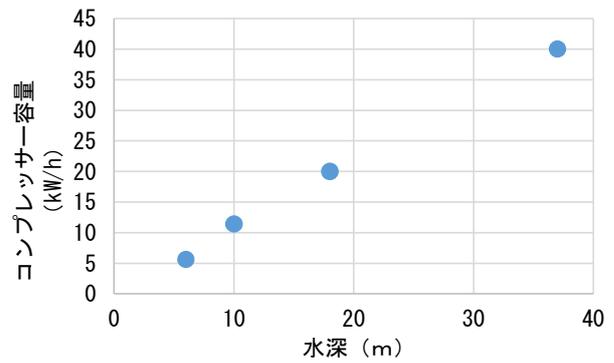


図-7 コンプレッサー容量と圧送可能水深の関係

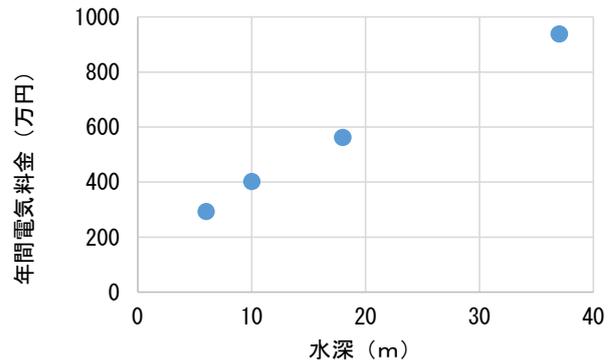


図-8 装置 24 時間運転時の電気料金と目標水深の関係



写真-2 吸水口の閉塞状況
(左：EL-9.0m で 1 年稼働後、右：設置時)



写真-3 電気防食のための亜鉛板状況
(左：2 年稼働後、右：設置時)

200 万円ほどの維持費が必要であった。

(3) 陸上装置維持費用

陸上装置における消耗品は酸素濃縮器やコンプレッサー

一の電磁弁やパッキン、フィルターなどがある。これらは年数もしくは動作回数で交換目安が設定されている。本試験における陸上装置では2年で交換が必要となり、およそ100万円の費用が発生した。

一方で、想定外の故障による支出が発生する場合もある。2018年10月28日に装置が緊急停止し、酸素濃縮器の異常警報があった。開放用電磁弁のバネが折損して弁に噛み込み(写真-4参照)、閉塞しないことが原因であったが、原因が判明して修理するまでに2カ月を要し、その間は酸素供給を停止することとなった。このとき電磁弁は交換目安の範囲内であったが、故障が発生する結果となっていた。この故障は陸上装置であったため、比較的容易に調査、修理が可能であったが、水中装置の機械的故障については、水中装置を陸上に回収しなければならず、水中作業を含めた対応が必要となる。

(4) 維持費用の総額

これらの結果から水深10m圧送で1日12時間～24時間の運転で電気料金は年間240～400万円、また2年に1度の頻度で保守点検や部品交換で300万円が必要となる。このことから年平均として390～550万円の維持費用が発生することが確認された。このうち電気料金で62～73%を占めており、節電対策や効率的運用手法などを工夫することで、維持費用を削減出来る余地は大きい。この他にも想定外の支出は起こりうるが、保守点検を厳守することで、発生頻度は抑制できると思われる。フィージビリストアディーでは、便益、費用、効果を把握して初めて検討が可能となる。本稿により費用と効果は明らかとなったため、運用計画立案の基礎資料となるものと思われる。また維持費用に見合う明確な便益が設定できるならば、実装への検討も可能となる。

(5) 課題

本稿から得られた課題を以下に示す。当該システムと同等規模の装置を新造して導入する場合には約5,000万円の初期投資(水中装置、陸上装置含む)が必要である。本試験では中古やレンタルを援用して、初期費用を2,000万円で実装した。目標の水深と水量によって陸上装置のコンプレッサーおよび水中装置の水中ポンプの吐出量が決まり、必要とする電気容量によって使用電力が概算される。目標水深が深く、大量の吐出を行うほど運転費用は増大し、本試験機を基準に10m深くなるごとに運転費用は2倍となる。つまり20m深くなると4倍となる。また、対象水塊が解放水塊で流れがある場合は本試験の装置仕様の範囲では、平均水塊流速が0.5cm/s以上で一定方向に卓越するときは、DO供給効果は流れに沿って流下する。また流れのある場合に無害化できる硫化水素濃度は供給DOに依存して、最大でも45mg/L程度である。冬季の観測結果⁹⁾から水塊流速が遅い場合には、DO供給効果は流出せずに吐出口から同心円に拡

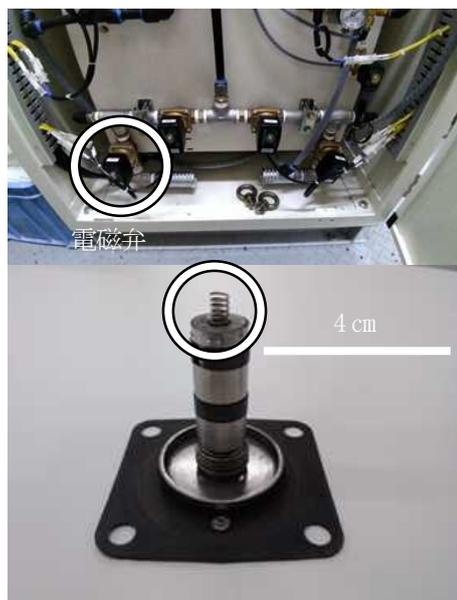


写真-4 酸素濃縮器の故障箇所
(上: 装置内部, 下: バネの折損)

大し、DOも残存することを確認している。このことから、対象水塊の流況と原水の含有硫化水素濃度によって、DOとして残存する効果の発現および発現範囲が変化すると考えられる。この場合も供給したDO分は硫化水素の削減となっている。一方で、冬季には氷によるケーブル等の損傷、陸上装置の保温が必要であることなど、低温対策も必要となる。本稿の維持費にはこれら低温対策費用も含まれており、本仕様の陸上装置の維持費としては、ほぼ上限である。

参考文献

- 1) Singleton, V.L., Little, J.C.: Designing Hypolimnetic Aeration and Oxygenation Systems-A Review, Environ.Sci.Technol., Vol.40, pp.7512-7520, 2006.
- 2) 杉原幸樹, 管原庄吾, 増木新吾: 塩淡二層汽水湖の貧酸素改善を目指した酸素溶解装置の運用検証, 土木学会論文集 G(環境), Vol.76, No.7, III_261-III_267, 2020.
- 3) 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.
- 4) 杉原幸樹, 増木新吾, 管原庄吾, 新目竜一: 汽水湖の底層貧酸素改善に関する現地試験, 土木学会論文集 G(環境), Vol.74, No.7, III_35-III_41, 2018.
- 5) 杉原幸樹, 増木新吾, 管原庄吾, 村山雅昭: 酸素溶解装置の結氷期を含む連続運用による汽水湖の貧酸素改善の検証, 土木学会論文集 G(環境), Vol.75, No.7, III_299-III_307, 2019.