

底層水再利用を目指した水質改善に関する研究

(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
柿沼 孝治

硫化水素を含む無酸素水の無害化対策研究のため、底層水を汲み上げる管路を造成した。管路取水は含有物質が欠損しないことを化学分析で確認した。溶存酸素供給装置を作成し、底層水に溶存酸素供給したときの経時的な水質変化を機器計測および化学分析により追跡した。その結果、酸素供給により速やかに硫化水素が酸化され、単体硫黄として析出することが確認された。その後、無酸素化することで硫酸イオンの増加挙動が確認された。

キーワード：水質改善、硫化水素、溶存酸素、水質分析

1. はじめに

淡水と塩水が混合する汽水域は、生産力の高さから、漁業など生活の場として重要な水域である。一方で、停滞性の強い汽水域の場合には、塩水と淡水が明確な密度成層構造を形成し、水域内の水質が鉛直方向に二分され、底層塩水の無酸素化によって、水質障害が顕在化している。猪鼻湖¹⁾、十三湖²⁾、矢道湖³⁾など何れも最深部で水深 10 m 未満である比較的浅い湖沼では風や潮汐によって塩水の消長が観測され、主に夏期に貧酸素水塊を形成して水質障害の原因となっている。一方で小川原湖⁴⁾や網走湖⁵⁾など最深部が 17~25 m に達する比較的深い湖沼では、塩水が局在化して恒常的に底層水質が悪化している挙動がみられる。局在化する塩水層は水質悪化し、上層の淡水層にも影響を与えており、無酸素塩水中には硫化水素が蓄積されて青潮の原因となっている。

水中の硫化水素が課題となるのは、下水など排水処理施設⁶⁾、掘削工事⁷⁾や上水道⁸⁾、内湾⁹⁾など多岐にわたる。硫化水素は物質自体が有毒であることに加え、金属腐食性を有し、様々な問題の原因となっている。下水処理場や掘削現場のように硫化水素含有水を集約でき、かつ排水を貯留できる場合には酸化剤や吸着剤の投入により対処されている。一方で内湾のように硫化水素含有水の集約が困難な場合には薬剤投入による環境影響が不明であることや費用の面から有効な対処ができていない。これら蓄積した硫化水素を削減するために、底泥の改質¹⁰⁾、酸素供給による無酸素化の解消¹¹⁾など様々な検討がなされている。いずれの方法でも溶存硫化水素の削減が確認されているが、実水域への適用を考慮すると費用面での課題、硫化水素削減後の影響評価の課題があり、検討の余地が多い。

これまで、我々は汽水湖の無酸素底層水の水質改善を目指し、環境中に残存しても影響が少なく、無酸素化も

改善できると想定して溶存酸素(DO)供給について調査、研究¹²⁾をおこなってきた。この手法は水中設置の装置で直接 DO を供給し、水塊の鉛直混合を誘発しないことが利点であった。結果として硫化水素の削減は可能であるが、酸化にともない生成する単体硫黄が固体として装置に付着することで、吸水障害を起こすことが確認された。加えて水中設置のために装置の運用、維持にかなりの費用を必要¹³⁾とすることを確認した。

そこで、含有硫化水素の完全酸化、生成硫黄の分離と回収、酸素溶解装置の運用費用の削減を目指すこととした。底層水を陸上に汲み上げて、陸上でDOを供給して、生成硫黄を分離することとした。本研究は底層水処理の前提となる、底層水汲み上げ装置の建造と性能評価および汲み上げ水へのDO供給時の水質変化の把握を目的とした。目的水深から含有物質の変化および欠損なく陸上まで汲み上げられているかを化学分析により確認し、汲み上げ水にDOを供給したときの水質変化を化学分析および機器観測によって計測を行った。

2. 対象水域と装置建造

対象水域は網走湖(図-1 参照)とした。網走湖は遡上海水が湖内に滞留し、塩淡水二層構造を形成する汽水湖である。また例年 12 月~3 月まで湖面が全面結氷し、氷厚は 1 m ほどになる。結氷前後も塩水密度が高いため塩水と淡水が混合せず循環期は存在しないため、通年で塩水層は無酸素化している。そのため塩水層には恒常的に硫化水素が蓄積し、強風時には底層水の湧昇により青潮が発生して水生生物の斃死被害が度々起きている。水中の硫化水素は DO と即座に反応するため、硫化水素濃度が小さく、鉛直循環が起きやすい水域では硫化水素として残存する分子を検出することは非常に困難である。

そのため恒常的に硫化水素を含有する水域で、含有水を常時採取することで、環境水中の硫化水素削減効果を効率的に検証することが可能となる。

図-2 に 2022 年 9 月 1 日の取水位置（図-1 参照、呼人港岸壁から 170 m 沖で河床標高-10 m 地点）での鉛直水質分布を投げ込み式水質計（環境システム、HACH Hydrolab Datasonde 5X）で観測した結果を示す。観測項目は水温、塩分、DO である。標高-5.5 m に塩淡水境界が存在し、塩水層では無酸素化している。標高-7 m 以下の塩水層ではいずれの項目もほぼ一様に分布していた。これより無酸素塩水環境が局在化している標高-9 m より原水を引き込むこととした。なお、現地は感潮域のため水深基準では表面水位の変動で、取水高さを規定できないため、本論文では標高で統一する。

取水位置の河床から 1 m 立ち上げた標高-9 m に取水口を設置し、φ50 のサクシオンホースを岸壁まで延長して、河床に沿わせて敷設した。さらに逆流防止弁を接続して陸上に汲み上げるように 120 L/min の水中ポンプと接続した。陸上部に 1000 L 水槽を 4 基設置し、汲み上げホースを接続した。また酸素ガス発生装置（（株）IBS、ICX-005HP）とアクアミキサー（（株）松江土建、V6S5T-030L）に揚水ポンプ（（株）ニクニ、PC3-25NPD）を接続させた酸素溶解装置を作成した。最大酸素ガス分圧は 96 %、処理水量は最大 30 L/min とした。選定機種のパフォーマンス上 DO 最大値は 48 mg/L（20℃）である。水槽と酸素溶解装置をあわせ陸上装置とした。陸上装置の全景を図-3 に示す。大きさは 5 m 四方で高さは 4 m となる。汲み上げた無酸素塩水を水槽に貯水し、酸素溶解装置で DO を供給する装置とし、適時水槽より採水して化学分析を行うこととした。

3. 実験方法

(1) 取水方法による原水水質比較

船上採水と造成装置による汲上採水の水質比較を行った。船上採水は採水位置（図-1 参照、標高-9 m）における底層水をバンドーン採水器を用いて採水し、可能な限り大気非接触で化学分析試料とした。なお、参考として標高-3 m の試料を上層水とした。汲上採水は陸上装置で 700 L 汲み上げて水槽に貯水して、水面から 50 cm の位置で採水した。船上採水試料と汲上試料による含有物質の比較を行った。採水日は 2022 年 9 月 5 日である。分析項目は溶存硫化水素態硫黄（ $\text{H}_2\text{S-S}$ ）、全窒素（TN）、アンモニウム態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、全リン（TP）、オルトリン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）、溶解性総有機炭素（DOC）、硫酸態硫黄（ $\text{SO}_4\text{-S}$ ）とした。各項目の分析は日本工業規格に準拠した手法とした。なお、溶存硫化水素については大気非接触で酢酸亜鉛を用いて固定する

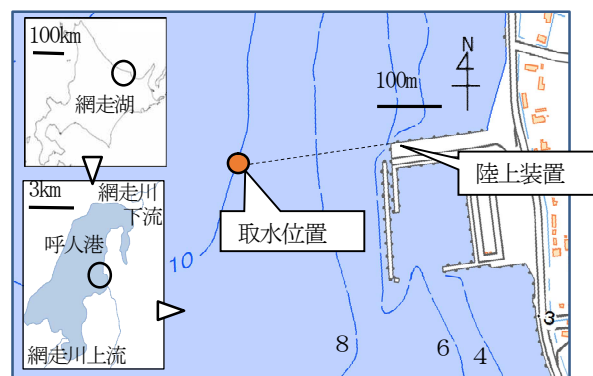


図-1 調査位置図

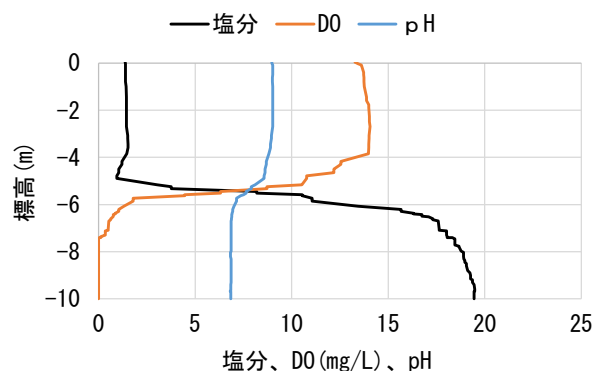


図-2 取水位置鉛直水質分布 1



図-3 陸上装置全景

管原¹⁴⁾の手法を用いた。分析結果については注目元素質量に換算した質量濃度としてまとめる。分析手法や取り扱い単位について表-1 にまとめる。加えて参考資料およびJIS K0102の引用番号を記載している。

(2) 溶存酸素供給実験

2022 年 9 月 5 日から 9 月 9 日の期間において、底層水を 700 L 汲み上げて、無処理（酸素供給を行わない）の底層水（A ケース）と DO 供給を 3 時間行った底層水（B ケース）の 2 槽を準備した。DO 供給開始時を 0 時として、0.5 時間後、1 時間後、2 時間後、4 時間後、24 時間後、48 時間後、96 時間後を目安とし、各水槽の水面下 50 cm から採水して化学分析を行った。このとき各水槽は簡易的に遮光シートで覆い、降雨混入のみを抑制した。分析項目や手法は原水水質比較と同様である。

実験時には各水槽に水質計（環境システム、InSitu

AquaTroll600)を設置し、10分間隔で連続的に計測を行った。1回の計測はワイパー起動60秒後に1秒間隔の10サンプリングの平均値として記録した。計測項目はDO、pH、濁度とした。

4. 実験結果

(1) 取水方法による原水水質比較

表-2に水質分析結果をまとめる。表中NDは定量下限値以下であることを示している。9月5日は底層水の水温11.9℃、DOゼロ、塩分19.1、汲み上げ水は水温13.1℃、DOゼロ、塩分19.1であり汲上水はやや水温の上昇が確認されたが、DOと塩分に変化はなかった。なお、汲上時の気温が23℃であったこと、気温が10℃のときの汲上時に水温上昇がないことから、汲上時にポンプによる加温は起こらず、気温の影響が強いことが確認された。加えて淡水混入も起こらずに底層水を陸上に汲み上げられていることが確認された。分析結果から全ての項目で汲上水の含有物質量がバンドーン式採水器による底層水より5～12%高い結果となった。バンドーン式採水器は目的標高で3Lほど採取した後、水面まで引き上げる必要がある。本対象水域のように明瞭な密度躍層がある場合には、上層と底層の水質物質量が極端に異なることも珍しくはない。本ケースでは採水器が上層の水塊を通過することになる。さらに船上に採水器を引き上げた後に、船上で水質固定操作や分取操作を行う必要がある。この間採水器の外壁は上層水で濡れている状態である。船上作業の場合、風や波によって安定した化学操作が困難な場合も発生する。表中より上層の物質量は底層に比べて希薄であるため、このような採水操作中に希釈される可能性が考えられる。逆に汲上水は陸上で水質固定操作や分取操作が可能のため、操作が安定しやすいことが考えられる。また設置した管路が目的標高水塊を物質の欠損、変質なく揚水が可能であることを示している。

(2) 溶存酸素供給実験

図-4に水質計による計測結果を示す。DOをみるとAケース（無処理底層水）では実験期間の5日間ではDOはゼロのまま推移していた。Bケース（3時間DO供給）は43mg/Lまで上昇したところでDO供給装置を停止している。その後緩やかに減少していたが、40時間で急激なDO減少がみられ、その後ゼロを維持していた。

図-5にpHの変化を示す。Aケースでは時間とともに値が漸次増加していた。BケースはDO供給時にアルカリ化して、DOの急減と同期して40時間後に酸性化した後に漸次増加していた。

図-6に濁度の結果を示す。Aケースは5NTUから徐々に増加し実験終了時には50NTUとなっていた。B

表-1 分析項目と手法一覧

項 目	単位	JIS規格 K-0102
溶存硫化水素態硫黄 (H ₂ S-S)	mg-S/L	参考14)
全窒素 (TN)	mg-N/L	45.4
アンモニウム態窒素 (NH ₄ -N)	mg-N/L	42.2
亜硝酸態窒素 (NO ₂ -N)	mg-N/L	43.1
硝酸態窒素 (NO ₃ -N)	mg-N/L	43.2
全リン (TP)	mg-P/L	46.1, 3
オルトリン酸態リン (PO ₄ -P)	mg-P/L	46.1
溶解性総有機態炭素 (DOC)	mg-C/L	22.2
硫酸態硫黄 (SO ₄ -S)	mg-S/L	41.3

表-2 原水比較分析結果

mg/L	9月5日		9月5日
	底層水 (EL-9m)	汲上水	上層水 (EL-3m)
H ₂ S-S	46.4	51.8	ND
TN	18.1	19.1	1.14
NH ₄ -N	17.3	18.9	ND
NO ₂ -N	ND	ND	ND
NO ₃ -N	ND	ND	0.38
TP	3.32	3.64	0.06
PO ₄ -P	3.31	3.62	0.004
DOC	4.34	4.51	3.9
SO ₄ -S	369.2	387.6	37.81

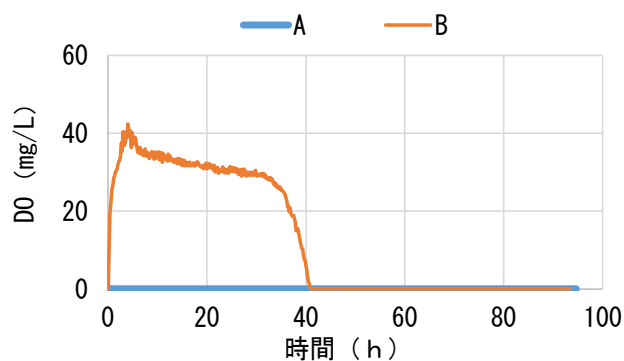


図-4 DOの経時変化

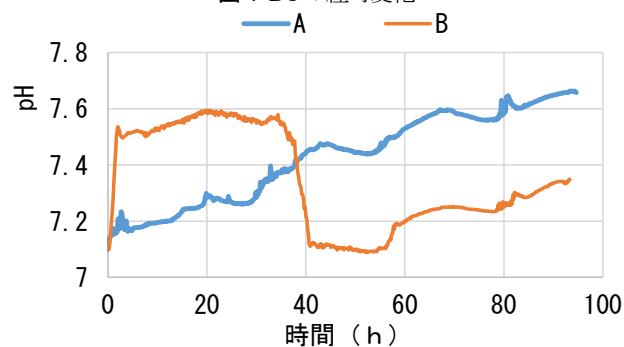


図-5 pHの経時変化

ケースは DO 供給により濁度が上昇し、1600 NTU を維持した後、時間とともに減少し、実験終了時には 150 NTU となる挙動となった。

図-7 に $\text{H}_2\text{S-S}$ 、図-8 に $\text{SO}_4\text{-S}$ の分析結果をまとめる。 $\text{H}_2\text{S-S}$ をみると、A ケースでは漸次減少挙動を示し、実験終了時で 23 mg/L となり、5 日後でも硫化水素が残存する結果であった。B ケースは DO 供給 3 時間で急激に濃度が低下し、24 時間後にはゼロとなっていた。 $\text{SO}_4\text{-S}$ は A ケースではやや漸次減少挙動を示していた。B ケースでは 48 時間目から増加する挙動が確認された。

図-9 に DOC の分析結果をまとめる。両ケースともに漸次減少する傾向を示した。なお、実験期間中は TN の 93~98 %が $\text{NH}_4\text{-N}$ であり、 $\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ は検出されなかった、TP の 95~99 %が $\text{PO}_4\text{-P}$ であった。これら栄養塩項目も DOC と類似した漸次減少する示しており、本論文では割愛する。これらの項目は全て実験終了時には約 5~7 %の濃度低下となっていた。

図-10 に汲み上げ原水と DO 供給 3 時間後の試験水の外観変化を示す。原水は黒色透明で硫化水素臭がしているが、DO 供給 3 時間後は白濁して無臭となった。DO 供給実験後に水槽から白濁物質である生成固体を回収し、蛍光 X 線分析 (XRF)、X 線回折分析 (XRD) を行った。XRF の結果から、白色固体は硫黄 94%、リン 2%、カルシウム 0.5%、鉄 0.1 %、その他 3.4 %で構成されていることが確認された。XRD の結果から、白色固体は斜方晶硫黄と立方晶硫黄、立方晶の塩化ナトリウムが確認された。よって DO 供給時に生成する白色固体は、ほぼ単体硫黄であり、不純物として塩化ナトリウムやリン成分を含有していることを確認した。このときケイ酸や鉄がほぼ検出されないことから、汲み上げによって底泥の引き込みも発生していないことが確認された。

実験終了時の白濁試験水 (浮遊粒子) および容器底面の沈殿を分散させた水 (沈殿粒子) を採取し、動的分散法粒径計測 (DLS) を行った。粒子を球状近似として流体力学的直径を出力した。計測結果を図-11 に示す。浮遊粒子は粒径 307 nm をピークとし、粒径 160 nm ~640 nm に分布する散乱強度を示した。このとき流体力学的直径は 307 nm であった。沈殿粒子は 1800 nm をピークとし、粒径 240 nm ~3000 nm に分布する散乱強度を示した。このとき流体力学的直径は 1130 nm であった。この結果から生成した単体硫黄は粒径 300 nm 程で分散し、凝集等で成長、沈殿することが推察される。本実験における 5 日間では浮遊粒子は完全には沈殿しなかった。

5. 水質挙動の考察

本実験における水質挙動は底質が介在しない条件での水塊のみの反応となる。実験上、過剰の DO を供給しているが、現象としては実水域での青潮発生時の水質変化

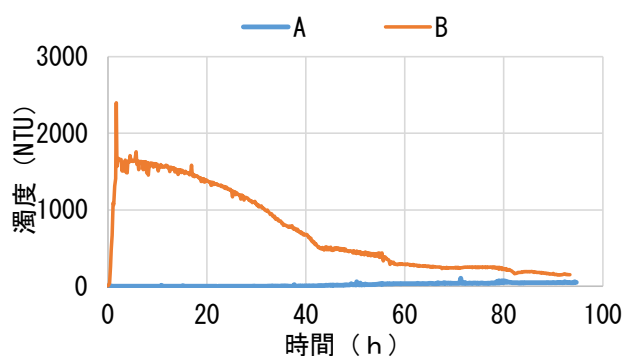


図-6 濁度の経時変化

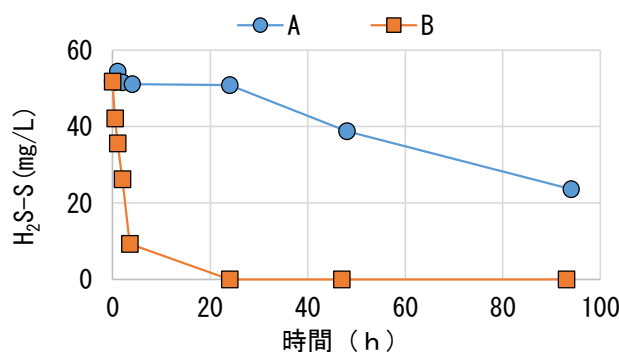


図-7 硫化水素の経時変化

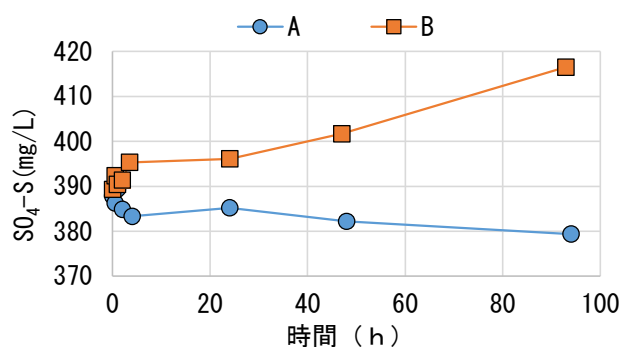


図-8 硫酸イオンの経時変化

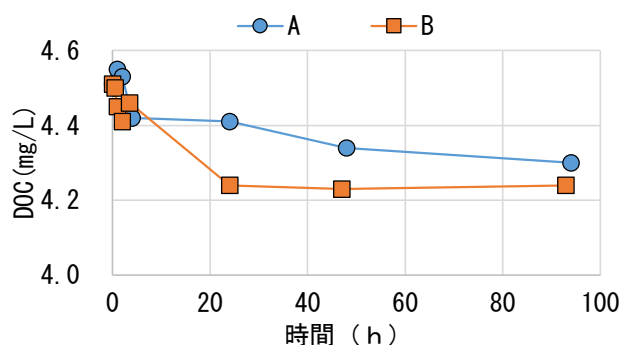


図-9 DOC の経時変化

と同等と考えられる。機器計測と化学分析から DO 供給直後から硫化水素が最も早く反応し、酸化され単体硫黄に変化して濁度の上昇とともに白濁水色を呈している。図-4 の DO 変化から約 8 時間で酸素消費ゆるやかになっており、残存硫化水素の酸化が完了したことが確認される。同じく図-5 の pH より、硫化水素の酸化時に pH の

増加も確認された。このことは(1)式に示すように、硫化水素の酸化反応は単体硫黄生成時に水や水素イオンが生成されずに水酸化物イオンが生成されることが考えられる。



B ケースでは DO の急減と同調して pH が急激に減少（図-4、5 参照）しており、(1)式の水酸化物イオンから酸素が消費されて水素イオンが放出され、pH の減少要因となっていることが推察された。pH は全てのケースで実験全体で微増する挙動がみられ、増加速度も同一であった。通常、環境水でのアルカリ化は好気微生物による光合成にともなう、炭酸イオンの減少により説明される。本実験では嫌気化かつ遮光条件であり光合成影響は小さいと考えられるが、二酸化炭素の脱気が継続的に起きており、pH の漸次増加となっていると推察される。

再び図-4 の DO をみると、B ケースでは 40 時間後に急激に DO が消費されているが、今回化学分析を行った項目では DO の急変時に対応する変化を示すものは確認できなかった。DOC も漸次減少挙動（図-9）であることから有機物の酸化分解によるものではない。現段階ではこの DO 消費の要因は不明であるが、硫化水素が除去されたことから菌類等の呼吸や代謝反応と考えている。

この DO 消費により無酸素化すると、硫化水素は増加しないが、硫酸イオンの増加（図-8）が確認された。A ケースでは硫酸イオンは微減少を示し、大気からの溶解ではないことが明らかである。加えて、硫酸イオンの原料となりうるものを考慮すると、硫黄源は固体硫黄であり、酸素源として酸素を供給できる物質は DO、水およびリン酸イオンまたは炭酸イオンと推察される。無酸素化していること、硝酸・亜硝酸イオンは ND であることから、DO による酸化の可能性は低い。リン酸イオンの変化量は 0.1 mg/L であることから、硫酸イオンの増加分の約 20 mg/L に相当する酸素を供給できないため、酸素供給源となりうるのは、水および炭酸イオンの可能性が高い。炭酸イオンを酸素源とする場合は菌類の嫌気代謝による単体硫黄酸化が起こることになる。硫酸の代謝は好気細菌による硫化水素の酸化、単体硫黄の酸化および光合成硫黄細菌による硫黄不均化反応が報告されているが、本実験結果からは嫌気細菌による単体硫黄の酸化が起こる可能性を示唆している。本実験結果からは硫化水素の酸化は化学的におこり単体硫黄となる。つまり硫酸イオンまでの酸化は起こらないことを確認した。その後、要因不明であるが酸素消費され嫌気化すると単体硫黄が硫酸イオンに変換される、このとき硫化水素への還元は起こらないことを確認した。なお、このときに硝酸態窒素が検出されないことから、アンモニウム態窒素の酸化反応はおこっていない。本実験結果は環境中では硫化水素の硫酸イオンまでの酸化において嫌気的代謝が必要であること、硫化水素による酸素消費以外に酸素消費する



図-10 試験水の外観変化
(上：原水、下：DO 供給後)

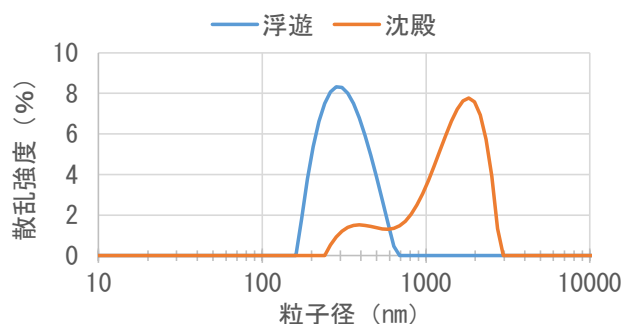


図-11 散乱強度分布

何らかの反応が存在することが確認された。実水域での青潮発生時を想定すると、このことは硫化水素含有水によって DO 消費と白濁化が発現した後、40 時間から 75 時間の間にさらに DO 消費する反応が起こり、無酸素化が長期化しやすいことを示唆している。

一方で、DO 調整により硫黄の還元体、単体、酸化体の制御可能性をも示唆している。B ケースでは実験期間平均水温 23°C、初期硫化水素 52 mg/L が単体硫黄となり、実験終了時には 26 mg/L の硫酸イオン増加が確認され、単体硫黄の 50% が溶解することがわかる。加えて、濁度の結果（図-6）、粒径の結果（図-11）のように固体硫黄の沈降と硫酸イオン化による溶解によって濁度が減少しており、青潮発生時にあえて無酸素化させることで白濁粒子を溶解させる可能性があることを示唆している。一方では加熱することなく、常温での単体硫黄から硫酸を生成できる可能性をも示唆している。

次に DOC、TN、TP は漸次減少となり、DO 条件に影響されずに有機炭素の増加がないことが確認された。本実験は 5 日間の暗条件での経時変化を追跡しており、本

条件中では硝酸生成やプランクトン増殖は起こらないことが確認された。このことは青潮発生初期には栄養塩は維持され、窒素源はアンモニウム態であることを示唆している。アンモニアは生物毒性を有することから、底層水が湧昇して青潮が発現したときには高濃度のアンモニアも含まれ、硫化水素が無毒化されてもアンモニアが残存し続けることを意味している。実験結果から $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ や DOC は単体硫黄の生成、凝集時に吸蔵されていることが XRD や XRF の結果からも示唆され、沈降等で除去される可能性も考えられるが、アンモニアの残存対応が課題となる。

今後は DO 処理水の再利用を考慮して、プランクトンによるアンモニア除去等を検証するため、光合成条件での実験を予定している。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。本研究は底質が関与しない水塊のみの反応を明らかにした。

- ・底層水汲み上げ装置、 DO 供給装置を建造した。
- ・大容量の水質実験および高濃度 DO 供給が可能となった。
- ・ DO 供給で硫化水素が単体硫黄に酸化される。
- ・ DO 供給を継続しても硫酸までは酸化されない。
- ・無酸素状態を継続しても硫化水素の増加は見られない。
- ・硫化水素を完全に単体硫黄とし、無酸素化すると硫酸イオンが生成する。
- ・窒素、リン、有機態炭素は DO 供給による影響がみられない。

本実験において溶存硫化水素除去および青潮発生時の水質挙動について様々な知見が得られた。一方で大気影響や採水方法など実験上の課題も明らかとなった。今後、実験操作を見直し、再検証を行うことで、現象の再現性確認と精度向上することで、青潮対策や底層水の無害化における有効な手法の提案を目指す。

参考文献

- 1) 青木伸一, 水野亮, 岡本光雄: 猪鼻湖における貧酸素水塊の消長に及ぼす気象擾乱の影響, 海岸工学論文集, Vol.49,

pp. 1036-1040, 2002.

- 2) 松根駿太郎, 梅田信, 田中仁, 佐々木幹夫: 十三湖における汽水環境の長期的な変化要因の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_1507-I_1512, 2013.
- 3) 溝山勇, 大屋敬之, 福岡捷二: 連結系汽水湖における流動機構と長期流動シミュレーション, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 67, No. 3, pp. 101-120, 2011.
- 4) 小泉祐二, 藤原広和, 松尾悠佑, 沼山天馬: 近年の小川原湖における水質変化の特徴, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 70, No. 4, pp. I_1579-I_1584, 2014.
- 5) 杉原幸樹, 平井康幸: 塩淡水境界を持つ汽水湖の結氷下の水質挙動, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 72, No. 4, pp. I_655-I_660, 2016.
- 6) Zhang, L., De Schryver, P., De Gussem, B., De Muynck, W., Boon, N. and Verstraete, W.: Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review, Water Research, Vol. 42, Issues 1-2, pp. 1-12, 2008.
- 7) 川又養市: シールド工事における硫化水素対策の技術, におい・かおり環境学会誌, Vol. 47, No. 3, pp. 182-188, 2016.
- 8) 上田祥久, 村中一尋, 伊藤八十男, 内野栄治, 高野敬志, 都築俊文: 沼田ダムを水源とする上水道において発生した硫化水素臭について, 北海道立衛生研究所所報, 第 43 集, pp. 36-40, 1993.
- 9) 梶山誠: 東京湾における青潮の発生と漁業被害の状況, 千葉県水産総合研究センター研究報告, 13 号, pp. 61-76, 2019.
- 10) 宮田康人, 林明夫, 桑山道弘, 山本民次, 谷敷多穂, 卜部憲登: 製鋼スラグによる底泥中硫化水素抑制の実海域試験, 鉄と鋼, Vol. 100, No. 11, pp. 80-86, 2014.
- 11) 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, pp. III_351-III_356, 2017.
- 12) 杉原幸樹, 菅原庄吾, 増木新吾: 塩淡水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, pp. III_261-III_267, 2020.
- 13) 杉原幸樹: 水質改善のための酸素溶解装置運用に関する費用と課題, 寒地土木研究所月報, No. 839, pp. 34-39, 2023.
- 14) Sugahara, S., Kamiya, H., Suyama, Y., Senga, Y., Ayukawa, K., Okumura, M. and Seike, Y.: Influence of supersaturated dissolved oxygenated water on the elution of hydrogen sulfide and methane from sediment in the dredged area in polyhaline Lake Nakaumi, Landscape Ecol. Eng., Vol. 11, pp. 269-282, 2015.