

令和 元年 7 月 8 日現在

機関番号：15201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06874

研究課題名(和文)ダム湖における深層酸素供給技術を応用した窒素・リン除去手法の開発

研究課題名(英文)Development of nitrogen and phosphorus removal technique applying the hypolimnetic oxygenator in a reservoir

研究代表者

増木 新吾(Masaki, Shingo)

島根大学・学術研究院環境システム科学系・特任助教

研究者番号：80806894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：ダム湖での水質問題(富栄養状態)を軽減する新たな技術の開発が試みられ、その結果、富栄養状態を改善する新たな技術が開発され、富栄養化に起因する諸問題(アオコ、カビ臭等)の抜本的な解決手法が示された。

2018年～2019年にかけてダム湖深層部では溶存酸素濃度が全自動運転により任意の濃度に調整され、それに伴い硝化作用(好気環境下)および脱窒作用(嫌気環境下)が繰り返し出現した。その結果、栄養塩である無機態窒素を減少(2018年-2019年、100 μ g/L/yの減少速度)させた。このとき、リン酸態リンが底泥から再溶出することもなかった。新たな富栄養化対策技術として世界へ広く普及することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ダム湖の富栄養化やそれに起因する諸問題を解決するため、水中の栄養塩低減技術の開発を行った。実在のダムに既設された深層曝気装置を使用し、深層水の溶存酸素濃度を任意の値(溶存酸素が高い状態と低い状態)に調整した。溶存酸素濃度を任意の値に調整することで水中の有用微生物(硝化細菌や脱窒細菌)を交互に活性化させ、明確な栄養塩の低減を効果を得た。本原理は下水処理場において用いられる嫌気・硝化内生脱窒法(AOAO法)であり、本研究ではこの原理を実用レベルでダム湖の貯留段階に適用した世界初の試みである。得られた知見は、水資源の有効活用にも大きく貢献できるものとする。

研究成果の概要(英文)：In this research, development of a new technique to reduce water quality problems (like as eutrophication) in the dam lake was attempted. As a result, new techniques for improving eutrophication were developed, and drastic solution methods for various problems (blue algae, mold odor, etc.) caused by eutrophication were shown.

The dissolved oxygen concentration(DO) was adjusted to a target concentration in the deep part of the dam lake from 2018 to 2019, and the nitrification (under aerobic condition) and the denitrification (under anaerobic condition) appeared repeatedly. As a result, dissolved inorganic nitrogen(DIN) was reduced (a decrease rate of 100 μ g / L / y in 2018-2019). At this time, phosphate (P04) did not re-elute from the bottom sediment. It is expected that this technique will be widely disseminated to the world as a new eutrophication countermeasure technology.

研究分野：生態環境工学

キーワード：富栄養化 深層曝気 硝化 脱窒 ダム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ダム湖の富栄養化（窒素，リン濃度の増大）は，藍藻類の異常増殖（アオコ状態）の一因となり，それに伴い，景観の悪化や利水障害など様々な水質障害が発生している。中でも，カビ臭（ジオスミン，2-MIB）や，毒素（ミクロキスチン LR）が生じた場合には人体への影響も懸念されるなどより深刻な問題となっている。このような背景の中，貯水池においては抜本的な対策として貯留水の富栄養状態の改善が求められている。申請者は下水処理によく用いられる硝化内生脱窒法（AOAO 法）をダム湖に適用出来ないかと考えた。すなわち，恒常的または季節的に無酸素状態になるダム湖深層水に着目し，有酸素および無酸素環境を繰り返し発現させることで微生物による硝化・脱窒を促進させ，ダム湖を高度処理浄化槽として利用するという着想を得た。2011 年以降，深層酸素供給装置が導入されていた島根県布部ダムにおいて，装置を間欠的に稼働させるなど試行錯誤を繰り返しその有効性について確信を得るに至った。

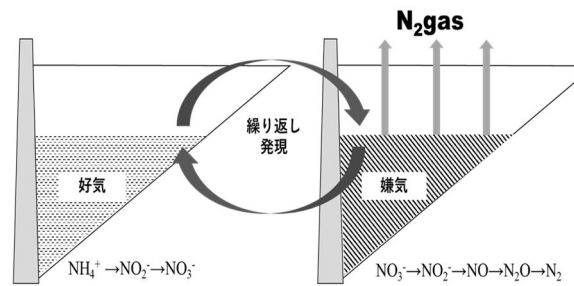


図1 ダム湖を活用した窒素除去

2. 研究の目的

申請者は，ダム湖深層水の酸素収支の解析や酸素欠損に関する研究を行う中で，深層水が無酸素化することに着目し，それを有効に利用する方法を検討してきた。そして，下水道処理施設における硝化内生脱窒法（AOAO 法）を実用レベルでダム湖に応用し，深層水中で有酸素環境と無酸素環境を繰り返し発現させることで窒素を系外へ排出し，栄養塩の減少させることで富栄養状態が改善されるとの着想を得た（図1）。既往の技術の課題であった窒素の総量削減が期待でき，また間欠的に酸素を供給することでリンの鉄との共沈による除去作用も併せて期待できる。本研究では島根県布部ダムを実験の対象とし，窒素除去を可能とする深層酸素供給装置の全自動運用方法を開発することを目的とした。また今回検討する運用方法は一時的に貧酸素状態になるため，リンの再溶出の有無についても検証を行った。

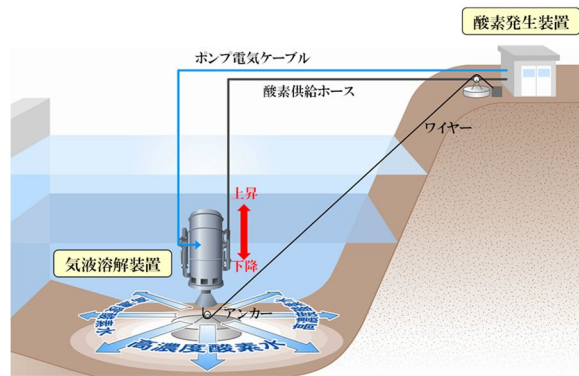


図2 深層酸素供給装置（WEP システム）

3. 研究の方法

(1) 溶存酸素濃度（D0）の調整方法

実証実験は深層酸素供給装置（松江土建株式会社：WEP システム，図2）が導入されている島根県布部ダムにおいて実施した。深層酸素供給装置は，酸素発生装置と気液溶解装置から構成されており，陸上で生成した高濃度の酸素ガス（濃度 90%）が，水中の気液溶解装置に送られる。水中に設置された気液溶解装置では供給された酸素の内，約 80% を水中に溶存させる能力を有する。申請者らは，本装置が 80% 以上の高い酸素溶解効率を有することなどの性能を事前の研究により明らかにしており，本研究では本装置の運転および停止を繰り返すことで深層水中の D0 を任意の値へと調整した。D0 は次項に示す水質自動観測装置で観測し，湖底上の 0.8 ~ 1.2m の平均 D0 を装置運転の判断指標とした。水質自

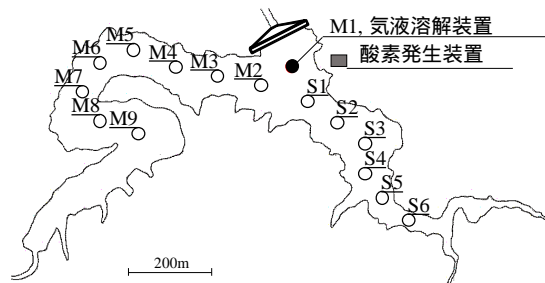


図3 布部ダム平面図



図4 水質自動観測装置

動観測装置は M2 地点の湖底され、対象とする深度の D0 が下限値 (1mg/L) に達した場合にはその 24 時間後に装置の運転が開始、上限値(2mg/L)に達した場合にはただちに運転を停止する方法とした。下限値に達した際に 24 時間の遅延を経て運転させた理由は、低 D0 環境下において脱窒による窒素除去の時間を確保するためである。これら深層酸素供給装置の停止および運転再開の操作については、集中コントロール PC から全自動の遠隔操作で行った。

(2) 水質自動観測装置

気液溶解装置から 100m 上流の M2 地点に水質自動計測装置を設置し (環境システム株式会社: マイクロプロファイラー, 図 4), 1 時間に 1 回, 水面から湖底までの範囲の D0 を計測した。得られたデータは直ちに研究室内に設置された集中コントロール PC に送信され, 線形補完により深度別の D0 へと整理し, 深層酸素供給装置の運転判断に用いた。

4. 研究成果

(1) 全自動運転による深層水中の溶存酸素濃度の調整

8 月 9 日から 8 月 25 日にかけての湖底上 0.8~1.2m の平均 D0 を示す (図 5)。8 月 9 日 10 時に深層酸素供給装置 (以下, 装置と呼ぶ) が稼働し, 8 月 10 日 0 時には, D0 が上昇を始め, その後, 停止トリガ値 (2mg/L) に達し, 装置の運転が停止された。その 3 時間後, 同日 4 時には運転トリガ値 (1mg/L) まで D0 が急激に低下しており, 停止トリガ値に到達した 24 時間後にあたる 8 月 11 日 4 時に装置の運転が再び開始された (脱窒の時間を確保するための遅延タイマーの作動)。この 24 時間の遅延期間の間, 装置が停止しているにもかかわらず, D0 が 4mg/L 程度まで上昇, または 1mg/L 程度まで低下するなど比較的短時間の内に D0 が急激に変化した。これらの理由は, 装置から吐出されている高 D0 水が拡散する際, その濃度が一定ではないことや, 深層水の内部波による湖水の揺らぎなどが要因と考えられた。

8 月 11 日 4 時の運転開始の 2 時間後には D0 は 2mg/L を超え酸素供給が直ちに停止された。その後, 時間差はあるものの D0 は 5mg/L まで増加した。この後, D0 は緩やかに減少し, 8 月 12 日 0 時には再び運転トリガ値に達した。これにより 24 時間後の 8 月 13 日 0 時に酸素供給が開始された。この時, 直ちに D0 は増加せず, 8 月 14 日 12 時まで D0 の減少が続き, D0 は 0.2mg/L まで低下した。8 月 14 日 13 時以降は D0 が緩やかに増加し, 8 月 17 日 23 時には装置の停止トリガ値に達した。

ダム湖深層を模した事前の室内実験における硝化脱窒の培養実験から, 脱窒は D0 が 1mg/L 未満の時, 硝化は 1mg/L 以上の時に見られることを明らかにしている (投稿中)。しかしながら, 深層水中の D0 を任意の値へ調整することは前例が無く大きな課題であった。本研究では水質自動観測装置と深層酸素供給装置を連結させ, 運転の可否を判断するプログラムを作成した。そして, 全自動で制御された深層酸素供給装置の運用により一定の成果を得ることができた。後述するが深層水中の無機態窒素 (DIN) の濃度が低下していたことから, D0 が 1mg/L 以上の時には NH_4^+ から NO_3^- への硝化反応が進み, そして D0 が 1mg/L 未満の時は NO_3^- から N_2 ガスへの脱窒反応が繰り返した結果であると推測された。今後は, 現地の水中や底泥中に存在する硝化細菌および脱窒細菌の存在や種, その他, 硝化や脱窒に関わる遺伝子の活性状況について遺伝学的研究手法を取り入れつつ一層の研究を推進する予定である。

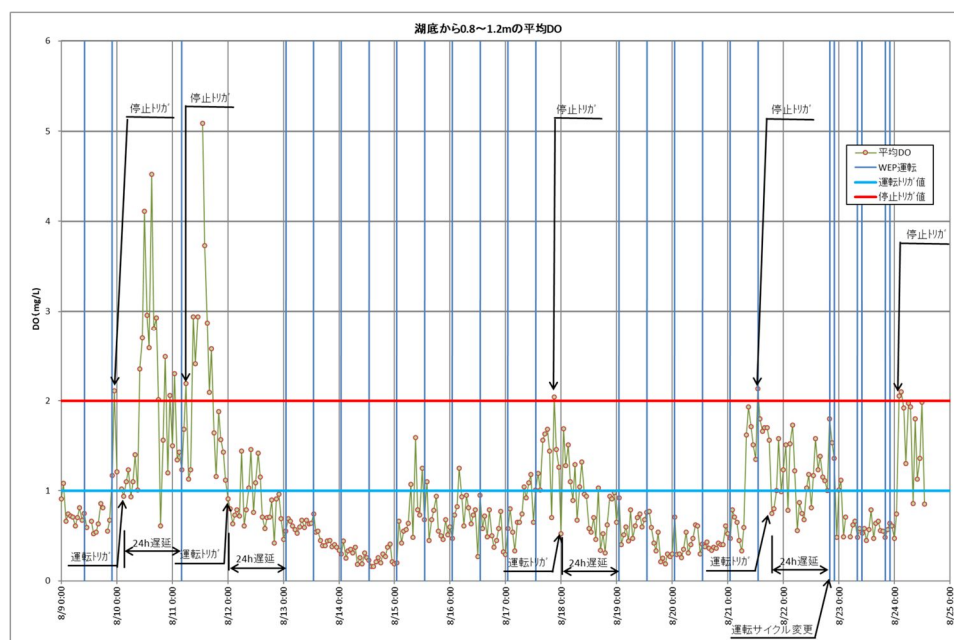


図 5 湖底上の溶存酸素濃度の長期的な変化 (8 月)

(2) 水質改善効果（無機態窒素およびリン酸態リン）

布部ダム（M2 地点）の底上 1.0m における無機態窒素（DIN）の長期的な変化を示す（図 6）。DIN のデータは年間で最も濃度が高くなる 8 月の平均値を用い比較した。布部ダムでは 2011 年以降、手動制御（船舶による DO 観測と装置の運転操作）により様々な DO 環境を創出し、水質の変化について調べてきている（表 1）。その中で、2011 年から 2013 年にかけて、深層水中の DIN が減少することを明らかにした。また、2014 年以降も DIN の低下が見られたことから酸素の供給量を年々減じていくよう運用方法を変化させてきた。これは、余剰な酸素供給を避けることで運用コストを低減する目的である。2016 および 2017 年については DO の下限値が 1.0mg/L，上限値が 5.0mg/L とし、いずれも深層水中の DIN の減少に成功して

た。
リン酸態リンについては、DO の一時的な低下に伴い底泥から溶出する可能性があったものの、2018 年の 8 月における濃度は 3.9 $\mu\text{gP/L}$ と比較的 low 濃度で推移し、また前年以前と比較した場合も大きな変化見られなかった。

科研費を使用した 2018 年の現地実証実験では DO 供給量のさらなる減少と、従来手動で制御していた深層酸素供給装置の運転を全自動化することを試み、DIN の減少については手動での運転時とほぼ同等の効果が得られた。また 2018 年の深層酸素供給装置の運転に要した電力費用はおよそ 30 万円であり、2011 年時と比較すると 1/4 程度まで大幅に減少している。また、全自動化することにより観測や装置の運転操作など人的な労力についても大幅に減少した。

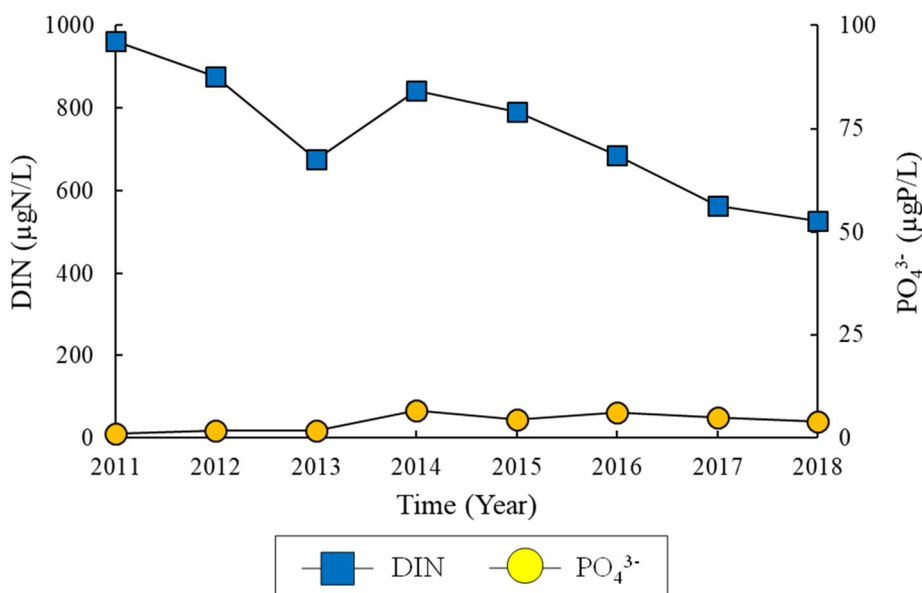


図 6 湖底上の無機態窒素（ NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ ）とリン酸（ PO_4^{3-} ）の長期的な変化

表 1 2011～2018年の深層酸素供給方法と任意のDO値

年	運転方法	DO観測方法	下限DO(mg/L)	上限DO(mg/L)
2011	手動	船舶調査	8	12
2012	手動	船舶調査	8	10
2013	手動	船舶調査	0	5
2014	手動	船舶調査	0	10
2015	手動	船舶調査	2	10
2016	手動	水質自動観測装置	1	5
2017	手動	水質自動観測装置	1	5
2018	自動	水質自動観測装置	1	2

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

Shingo Masuki, Aiko Hikino, Syogo Sugahara, Minami Yoshimura, Toshikuni Kato, Yuuki Saga, Michiko Egawa, Hiroshi Kamiya, Yasushi Seike, Nitrogen removal from a reservoir by biological nitrification-denitrification using intermittent operation of a hypolimnetic oxygenator, *Journal of Lake and Reservoir Management* (投稿中)

[産業財産権]

なし

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：清家 泰

ローマ字氏名：(SEIKE, Yasushi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。