

プロペラ式湖水浄化装置吐出口付近の湖水拡散特性

Lake water diffusion characteristics near the discharge outlet of
propeller-type cyanobacteria eliminator

研究第二部 水質技術開発室長 木村文宣
前 研究第二部 首席主任研究員 丸尾慶樹
前 研究第二部 研究員 朝倉加連

当財団が主催する「プロペラ式湖水浄化装置応用技術研究会」では、本装置によるアオコ抑制効果の発現メカニズムの解明と標準的な設計論の確立へ向けて調査研究を進めている。その研究の一環として、本装置吐出口付近における表層水の移流拡散状況とガス胞の加圧破壊によるアオコ沈降状況を把握するため、本装置が設置されている三春ダムにおいて AUV と多項目水質計を用いた水質分布の立体的計測を行った。その結果、水深約 20m に送水された表層水が吐出後直ちに数 m 浮上した後に拡散する様子が水温や pH、DO の計測から確認された。その一方で、アオコの挙動を表す指標である Chl-a 及びフィコシアニン (PCY) については、吐出後速やかに湖底付近に沈降する様子が確認された。これらの観測結果より、アオコを含む表層水は、本装置を用いて水深 20m 付近へ移送されると、湖水自体は吐出後に等水温層へ浮上した後に移流拡散するが、アオコは水圧によるガス胞破壊によって速やかに吐出口付近の湖底に沈降するものと推察された。これにより、本装置によるアオコ抑制効果の一端が明らかとなった。

キーワード：水質改善，アオコ，プロペラ式湖水浄化装置，移流拡散，自律型無人潜水機 (AUV)

We are conducting research on propeller-type cyanobacteria eliminators. This research group is engaged in various studies to elucidate the mechanisms underlying the cyanobacteria suppression effects of this device and to establish standardized design methods. As part of our investigation, we conducted field measurements to assess the convection and diffusion of lake water near the device's outlet, as well as the diffusion of cyanobacteria following the aerotopes' destruction due to pressurization. The field measurements were carried out at Miharu Dam, where the device is installed, utilizing an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) and multiple water quality meters. Our analysis of water temperature, pH, and dissolved oxygen (DO) revealed that the pumped surface water rose several meters immediately after discharge before undergoing diffusion. In contrast, chlorophyll and phycocyanin—indicators of cyanobacterial behavior—were observed to settle near the lake bottom shortly after discharge. From these observations, we inferred that when surface water containing cyanobacteria is transferred to a depth of approximately 20 meters using this device, the lake water itself is advected and diffused within the isothermal layer after discharge. In contrast, cyanobacteria rapidly settle to the lake bottom near the discharge outlet due to the aerotopes' destruction caused by water pressure. This finding clarifies a significant aspect of the cyanobacteria suppression effects of the device.

Key words : Water quality survey, Cyanobacteria, Propeller-type cyanobacteria eliminator, Advection-Diffusion, Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

1. はじめに

ダム貯水池は、洪水調節・利水補給（上水・農業用水・工業用水・発電等）・流水の正常な機能の維持といった多様な目的で利用されており、我々が安心・安全な社会生活を継続的に営むうえで非常に重要な役割を果たしている。こういったダムによるメリットがある一方で、従前はなかった湛水面が創出されることに伴って水質面での変化や問題が生じる場合がある。ダム貯

水池の水質変化現象には、冷温水、濁水長期化、富栄養化、底層貧酸素化等があり、それぞれ利水や景観、水利用に大きな影響や問題を引き起こす場合もある。

冷温水現象は、ダム貯水池からの放流水温が流入河川水温と比べて大きく差がある現象を指す。これにより水稻の生育不良といった農業利用へ影響のほか、下流河川の生態系にも影響を及ぼす場合があるが、多くのケースは選択取水設備の機能的な運用で問題の軽減・解消が図られている。濁水長期化現象は、出水後

や貯水位低下時に貯水池内に濁水が滞留することで、流入河川が清澄であるにも拘わらず貯水池内或いは下流河川の濁度が高い状態が継続する現象を指す。これにより、主に下流河川における水利用への影響や景観阻害が問題となることが多い。こういった問題が発生した場合には、前述の選択取水設備の運用や貯水池上中流部への流動制御フェンス（濁水フェンス）の設置、清水バイパスの運用等により対応する場合が多く、その対策効果は大規模出水で貯水池全層が濁水化しない限りは比較的安定して発現されているようである。底層貧酸素化に起因する水質問題は、底層で消費される酸素量を上回る酸素を供給することで多くの場合問題が解消・軽減することから、様々なタイプの深層曝気装置やそれに類する装置の稼働によって概ね問題が解消されているようである。

これらに対して、富栄養化現象に関しては、アオコやカビ臭に代表される藻類の異常増殖に起因するものが多く、その要因は表層水の滞留や高水温状態の維持、藻類増殖を支える栄養塩類の補給等多岐に渡ることから、気泡式循環装置の稼働による循環混合の促進や流入水浄化施設による流入栄養塩類の削減等の対策が多く行われているものの、問題の軽減には苦勞している事例が多いようである。

平成14年及び平成27年に国交省・水資源機構が管理するダムの管理者を対象に実施されたアンケート調査結果をみると、富栄養化現象に係る水質問題があると回答したダム管理者は何れの調査年でも多く、そのダムの多くで既に水質改善対策が実施されている¹⁾²⁾。このことから富栄養化現象に係る水質問題の解消・軽減の困難さが窺える。

特に、アオコやカビ臭の原因となる藍藻類の発生源が貯水池内の浅水域が中心である場合や貯水池水深が全般的に浅い場合には、前述の気泡式循環装置による水質改善効果は限定的であり、こういった特性を有する貯水池での対策には決定打が示されていなかった。アオコやカビ臭の原因となる藍藻類の多くは、細胞内に持つガス胞で得られる浮力と細胞自体の重さとのバランスを利用して浮沈を繰り返す生活史を有しており、この浮沈運動が他の藻類にはない特徴的な生存戦略として夏季に表層付近での寡占的増殖を可能ならしめている一因と言われている。

本報の対象であるプロペラ式湖水浄化装置は、このガス胞に着目した対策装置である。

本装置による水質改善メカニズムは、光制限効果・低水温効果・水圧効果の3つの効果により発現していると考えられている。この中でも特に水圧効果に関し

ては、従前の水質改善対策では機能させることが難しかったものである。表層に浮遊する藍藻類は、プロペラの駆動によって約数十秒という短時間のうちに水深分の水圧がかかる環境に放出されることから、急激にガス胞が圧縮・圧壊されて沈降に至るものと想定されている³⁾⁴⁾。

しかし、本装置を稼働することによってこの変化が生じているかについては、これまで観測された事例がない。このため、「この装置は単に湖水をかき混ぜているだけではないのか」という問いに対して回答するデータがなく、本装置による効果を立証するにあたっての課題となっていた。

本報は、上記の課題に着目し、令和5年夏季に本装置が設置されている三春ダムにおいて自律型無人潜水機（AUV）と多項目水質計を用いて装置吐出口付近の水質分布を3次元的に計測した結果を報告するとともに、そこから明らかとなった本装置の吐出口付近の湖水拡散特性及びアオコ沈降特性について取りまとめたものである。

2. プロペラ式湖水浄化装置の概要

本装置は、①プロペラ、モーター及びフロートを含む駆動部本体、②送水管と吐出口、③駆動部本体を係留するワイヤー及び操作制御盤（陸上施設）から構成される（図-1参照）。湖面に設置した状態では、①の駆動部本体のみが水面上に見えることとなる（図-2参照）。また、陸上部に設置される操作制御盤は、幅0.8m、高さ2.1m、奥行き0.5m程度の大きさであり、室内に設置することは当然のことながら、野外に直接設置することも可能である（図-3参照）³⁾。

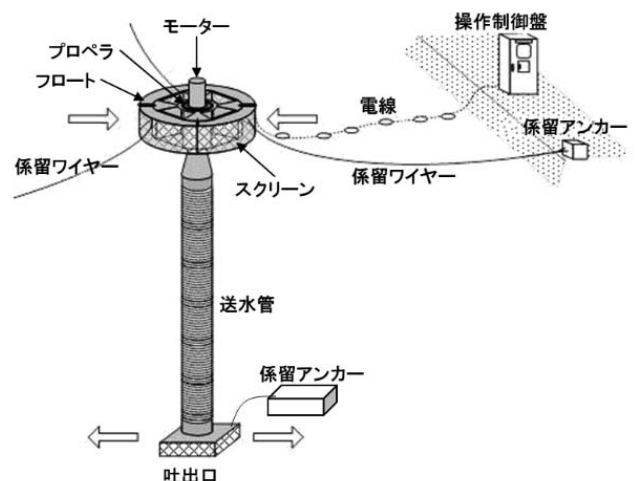


図-1 プロペラ式湖水浄化装置の構造



図-2 駆動部本体 外観



図-3 操作制御盤 外観

3. 現地計測

(1) 現地計測フィールド：三春ダムの概要

現地計測を行った三春ダムは、阿武隈川水系大滝根川に建設され、平成10年に管理開始された総貯水容量 $42.8 \times 10^6 \text{m}^3$ 、湛水面積 2.9km^2 の多目的ダムである。貯水池は大きく4つに分岐した複雑な形状であり、ダム湖はその形状を当地の天然記念物「三春滝桜」に見立てて「さくら湖」と命名された。

ダム湖の主要な流入河川は、蛇沢川・大滝根川（本川）・蛇石川・牛縊川の4河川であり、流域面積比からの推定では総流入量の約8割が大滝根川からの供給である。当ダムは、大滝根川上流域に人口約3万人の田村市を抱える典型的な里ダムであり、計画時点から「富栄養化は避けられないダム」と予測されていた⁵⁾。このため、ダム建設中より流域を含めた詳細な水質調査が実施され、建設時に様々な水質改善対策施設が設置され、管理開始当初よりそれらを稼働させて水質悪化を防ぐよう努めてきた（図-6参照）。その結果、アオコの発生は毎年みられるものの、現在まで利水障害等の深刻な水質問題は発生していない。

なお、本報で対象とするプロペラ式湖水浄化装置は、既存の水質改善対策によるアオコ対策効果が十分に発現していなかった蛇石川筋への追加対策として設置されており、令和元年より稼働を開始している。

(2) 自律型無人潜水機 (AUV) の概要

今回の現地計測では、(株)エイト日本技術開発（以下、EJEC）が所有する自律型無人潜水機（AUV：Autonomous Underwater Vehicle）を使用した。使用機種は、YSI社製のi3XO Eco Mapper AUV（図-4参照）である。本機器は、以下に示す特徴を有している。

- ・機器サイズがコンパクト（全長2.3m、重量40kg）であるため、人力での投入・回収が可能である。
- ・水深0.2m～100m間での航行が可能である。
- ・慣性航法装置とドップラー速度計ADCPによるハイブリッド位置計測装置を搭載しており、AUV本体の位置を水中で測位することが可能である。
- ・AUVの潜行深度は、「水深 h (m) で固定」、「高さ d (m) で固定」、「水深 h (m) ～高さ d (m) の間を波状」といった方法で設定可能であり（図-5参照）、比較的容易にAUVを所定の深度で潜行させることが可能である。
- ・水温/塩分センサー、DOセンサー、濁度センサー、pH/ORPセンサー、クロロフィル/フィコシアニンセンサー等の水質センサーを4本同時に装備でき、これらデータの同時取得が可能である。
- ・計測航路を予め入力することで自動航行が可能であることから、同じ範囲を同じピッチ・速度で何度でも計測することが可能である。

以上より、本装置を水平・鉛直方向に航行させることによって貯水池内の水質分布を三次元的に観測することが可能である。



図-4 AUV外観と各種機能（提供：EJEC）

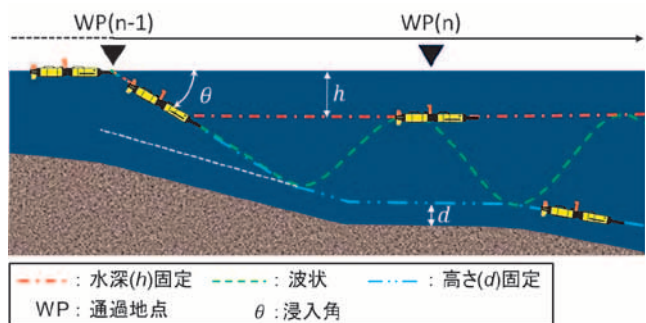


図-5 AUVの潜行深度の設定方法（提供：EJEC）

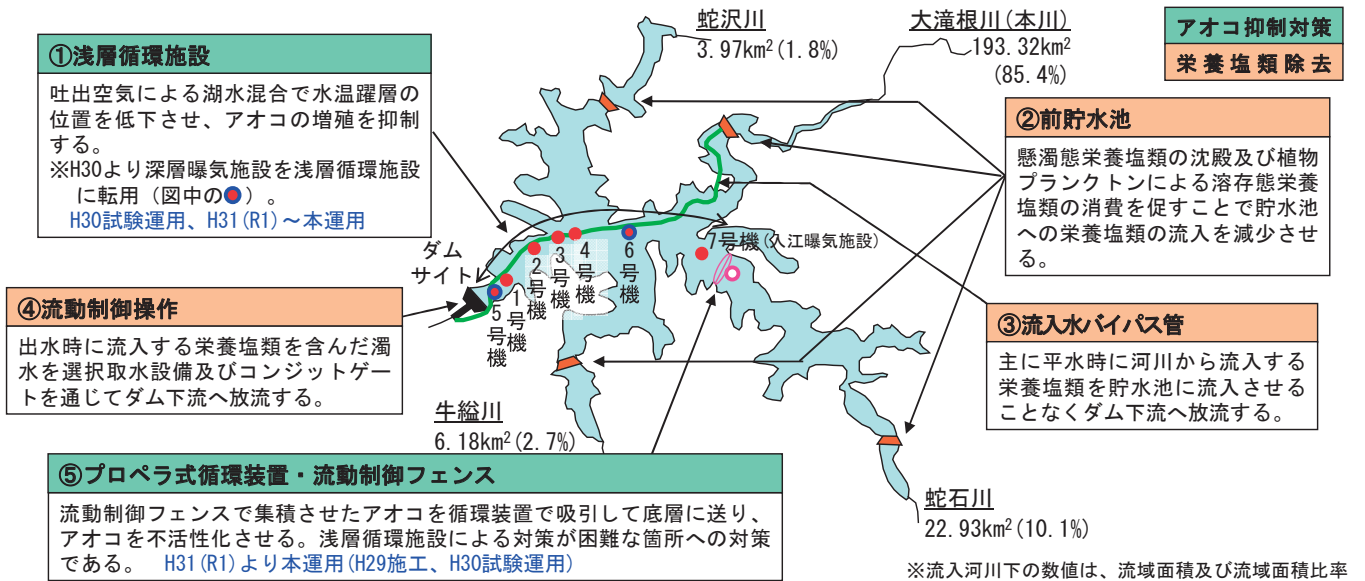


図-6 三春ダムの貯水池形状及び水質改善対策

(3) 令和5年度の現地計測概要

令和5年度の現地計測は、8月30日に実施した。

計測範囲は、図-7に示すように平面的には装置吐出口を含む横方向150m、縦方向110mの範囲を凡そ10mピッチで計測した。測定深度は、図-8に示すように水面下0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13m及び湖底上1.5, 2.0, 2.5, 3.0mとした。これにより計測範囲内の全水深に渡る水質を概ね網羅できるように設定した。測定項目は、水温、pH、DO、Chl-a、フィコシアニン(PCY)の5項目とした。

AUVの航行速度は1m/secに設定し、1水深あたり30分程度で航行・計測を行ったことから、計測に要した時間は途中の調整やデータチェックも含めて全体で5時間程度であった。

湖底付近の水質は、地形変化が著しくAUVの湖底面への接近が困難なため、AUVでの取得データを補完するためのデータとして、AUV搭載の水質計と同機種の多項目水質計 YSI社製のEXO3を使用し、計測範囲内の計26地点において水質鉛直分布の計測を行った。

今回実施したAVUの計測測線図(平面図)を図-7に、計測航跡図(鳥観図)を図-8にそれぞれ示す。なお、プロペラ式湖水浄化装置の吐出口はEL.299mの湖底に設置されており、当日の貯水位はEL.318mであったことから、水深約18～19m間に吐出口が位置していたことになる。

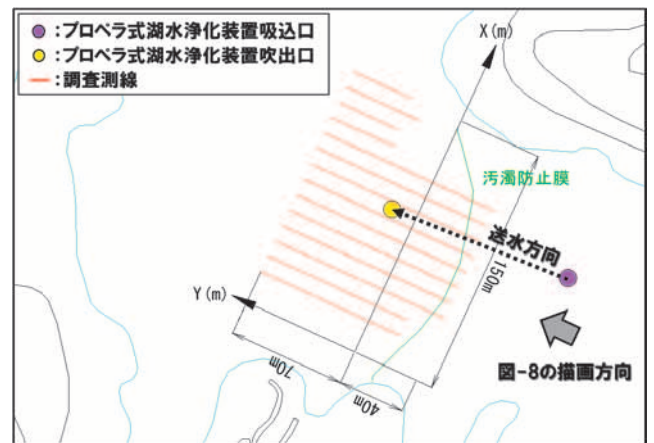


図-7 AUV計測測線図(平面図)

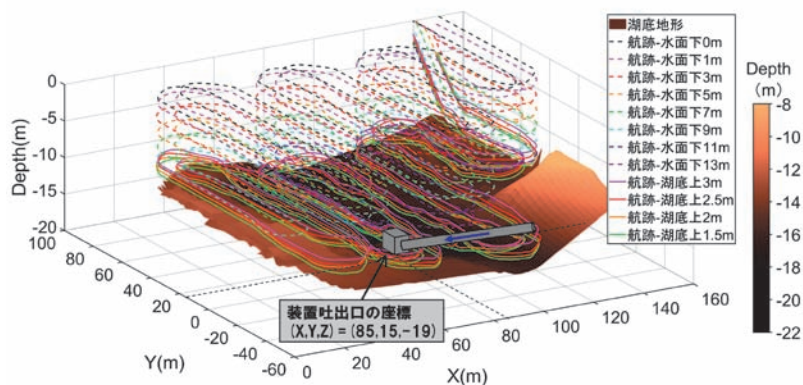


図-8 AUV航跡図(鳥観図)

4. 計測結果

前項に示した方法で実施した水質計測結果を用いて、3次元方向に1mピッチで内挿補完したデータを生成し、そのデータに基づき平面・縦断・横断方向にスライスしたコンター図を作成した。以下、各水質項目についての図化結果とその結果から読み取れる特性等を示す。

(1) 平面方向の水質分布の違い

水質に特徴的な変化が見られた水深14mから17m間を1mピッチでスライスした平面コンター図を図-9, 10, 11, 12にそれぞれ示す。

水温・pH・DOに関しては、吐出口より4～5m程度上の水深14mの吐出口近傍で周囲と水温や水質の異なる水塊が確認された。

一方、Chl-aとフィコシアニンについては、同深度で変化は認められず、逆に吐出口直近の湖底付近に周囲よりも濃度の高い範囲が確認された。

(2) 縦断方向の水質分布の違い

(1)で確認された変化を異なる側面から確認するため、本装置の吐出口を通る断面で描いた縦断コンター図を図-13に示す。

水温・pH・DOに関しては、吐出口の直上～前方15m且つ3～5m上部(水深12～15m)付近に周囲よりも水温がやや高く、pH・DOもやや高い水塊が捉えられている。

Chl-aとフィコシアニンについても水温等と同範囲に周囲よりやや濃度の高いエリアが確認されているものの、その差は水温等と比べて顕著ではない。

しかし、吐出口の周辺40m程度までの湖底付近に周囲よりも明らかに濃度の高い範囲が捉えられており、水温等とは異なる特徴が見出された。

(3) 横断方向の水質分布の違い

(1)及び(2)の結果を踏まえ、吐出口周辺の水質分布の違いを横断方向から確認するため、本装置の吐出口を通る断面で描いた横断コンター図を図-14に示す。

水温・pH・DOに関しては、吐出口の左側5m程度の水深10～17m付近に周囲と異なる水温・水質が表れる範囲が確認された。

一方、Chl-aとフィコシアニンに関しては、水温等と同様の箇所がやや周囲と色合いが異なっているようであったがその差は明確ではなかった。むしろ吐出口

両側の湖底付近の違いが非常に際立っており、吐出口の右側湖底付近については、その違いがより顕著に見られた。

(4) まとめ

プロペラ式湖水浄化装置の吐出口周辺でAUV及び多項目水質計で計測した水温及び水質の測定結果から平面／縦断／横断方向の任意の断面でスライスした時のコンター図を作図し、その結果から吐出水や吐出水に含まれるアオコの挙動を観察した。

その結果、水温・pH・DOの3項目については、何れも同じ挙動を示し、装置吐出口より吐出された表層水(吐出口の周囲水よりも水温が高く、pH・DOが大きい)は吐出後に前方斜め上方に移流し、吐出口より4～5m程度浮上した後に周囲水と同レベルの水質となるようであった。浮上して以降は、周囲水との水質差がなくなるため、その後の挙動を追跡することはできなかったが、一般的な移流拡散の概念に基づくと、等密度層で広がっている(イントリュージョン流)ものと推察される。

これに対して、アオコの装置吐出後の挙動を追跡する指標として着目したChl-a及びフィコシアニンについては、前述の水温・pH・DOと同様の変化が見られたものの周囲水との濃度差は極めて小さかった。その一方で、吐出口直近の湖底付近に周囲より濃度の高いエリアが確認された。これは、表層水に含まれたアオコが水深約20mに移送される過程で水圧によりガス胞が圧壊され、吐出口から放出された先で速やかに沈降したため、AUVはこれを計測したものと推察される。

なお、湖底付近の濃度上昇については、計測時の着底による底泥等の巻き上げではないことは確認している。

5. 考察

プロペラ式湖水浄化装置の吐出口付近での表層水の移流拡散状況と移送後のアオコの挙動をAUV及び多項目水質計を用いた3次元的水質計測により把握することを試みた。

その結果、水温・pH・DOについては、吐出口より4～5m程度上部に周囲とは水温や水質の異なる範囲が確認された。これは、吐出口付近より相対的に水温の高い表層水が、吐出口より放出された後に凡そ4～5m浮上して等密度層へ貫入(イントリュージョン)している様子を捉えたものと推察される。

筆者らが行った他ダムでの観測結果によると、貫

平面コンター図 : Dep=14.0m

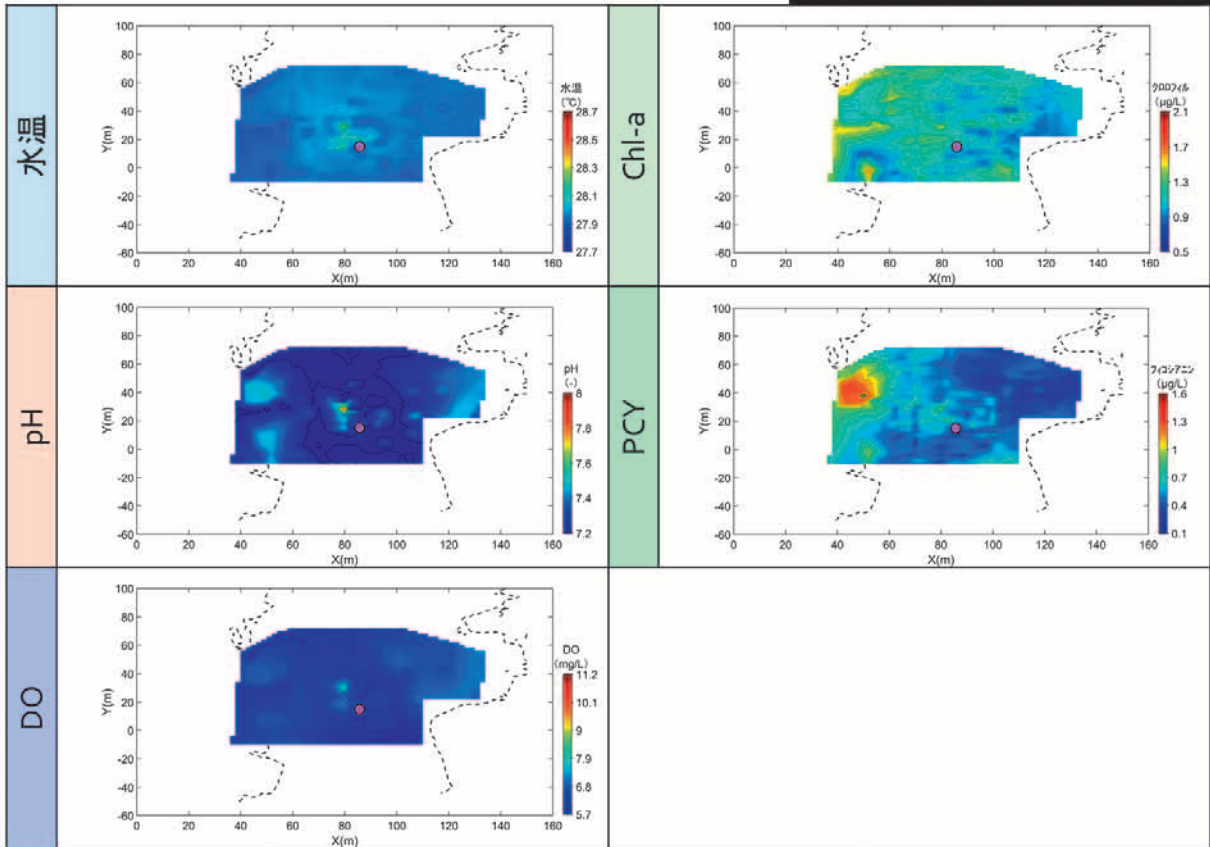


図-9 装置吐出部付近の水質コンター図 (平面図 : 水深14m) ●は装置吐出口位置

平面コンター図 : Dep=15.0m

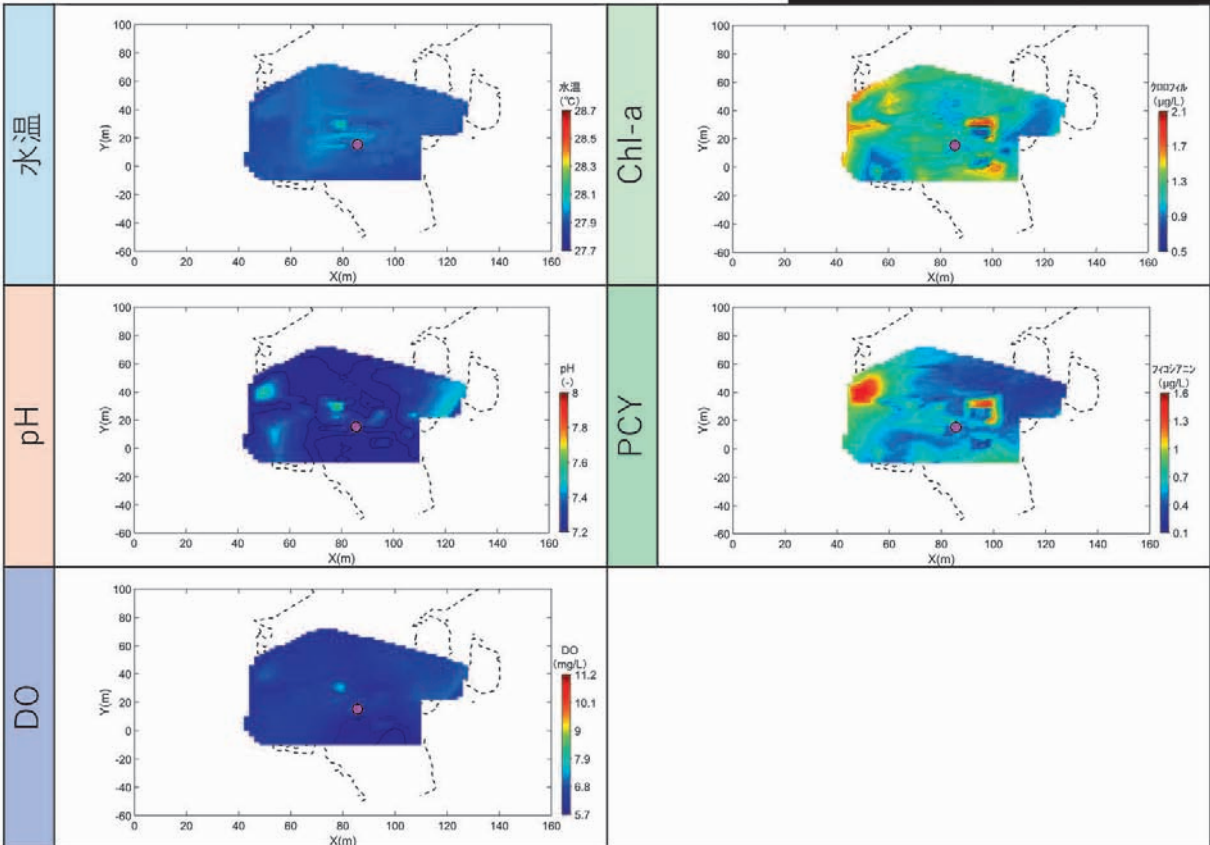


図-10 装置吐出部付近の水質コンター図 (平面図 : 水深15m) ●は装置吐出口位置

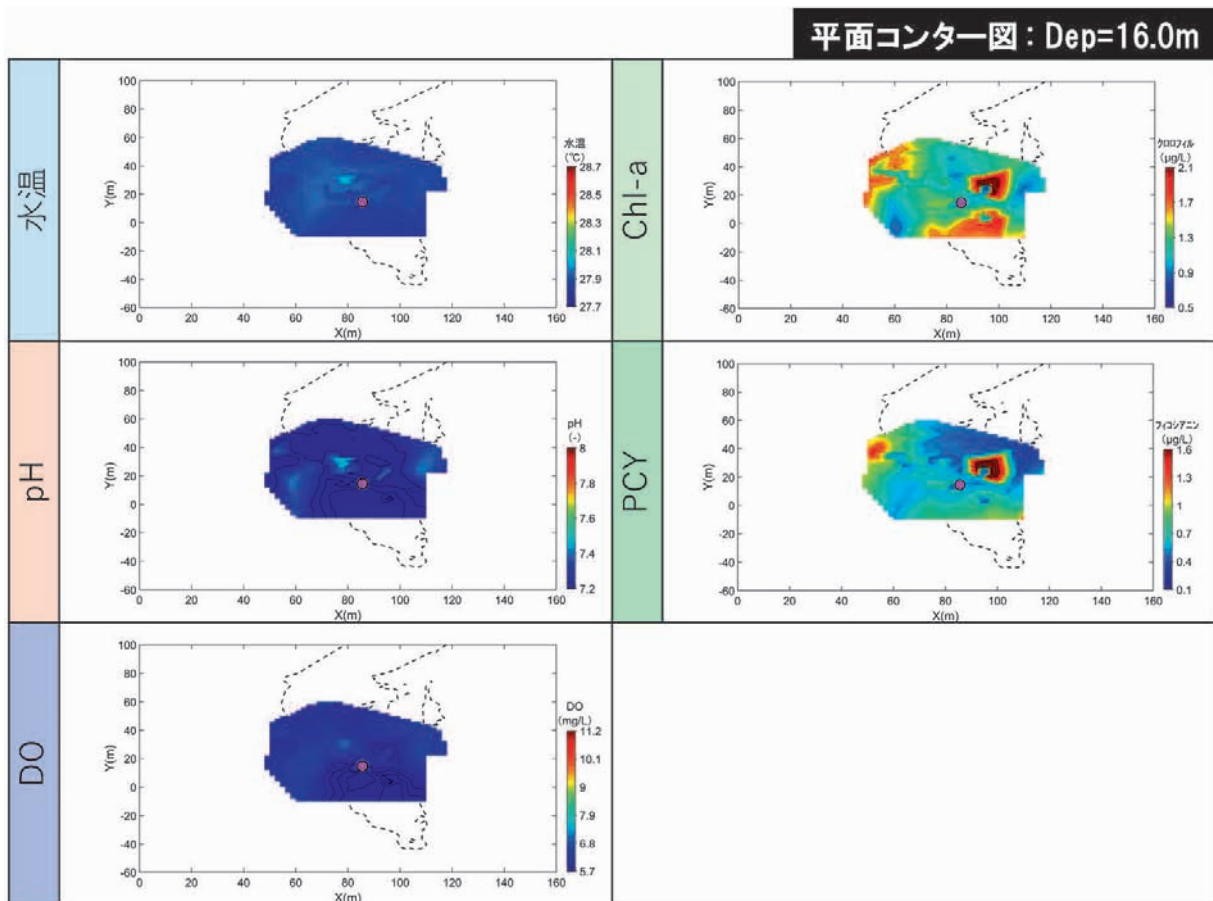


図-11 装置吐出部付近の水質コンター図(平面図:水深16m) ●は装置吐出口位置

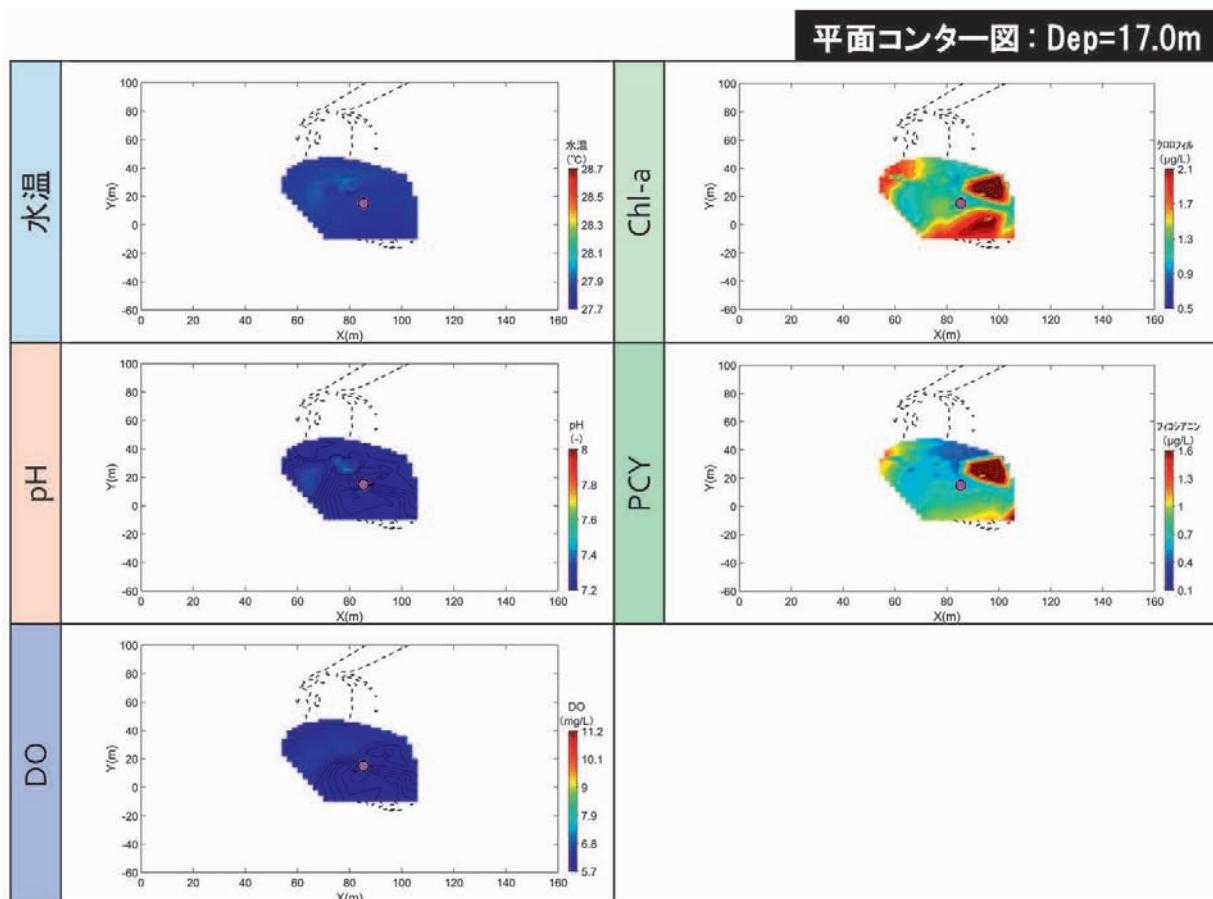


図-12 装置吐出部付近の水質コンター図(平面図:水深17m) ●は装置吐出口位置

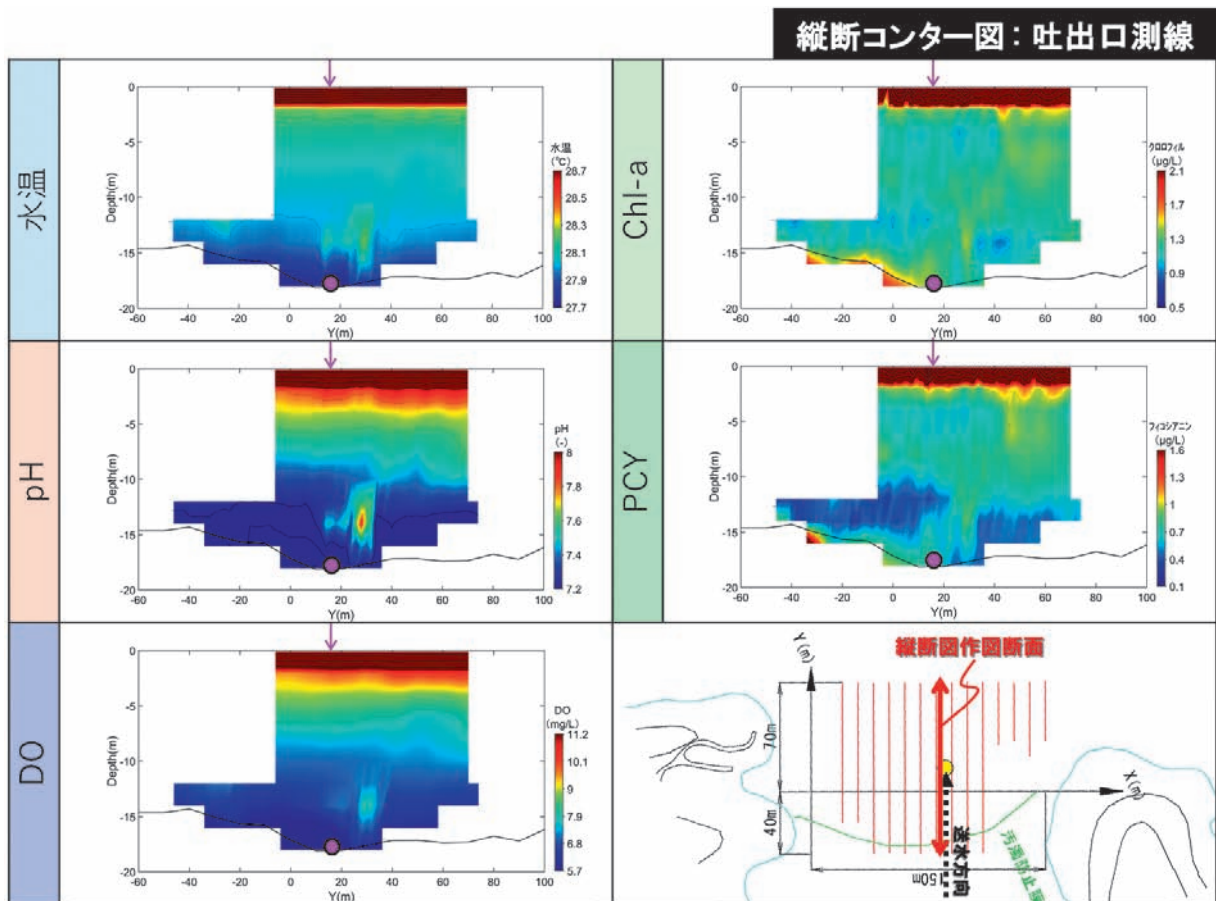


図-13 装置吐出部付近の水質コンター図 (装置吐出口の縦断図) ●は装置吐出口位置

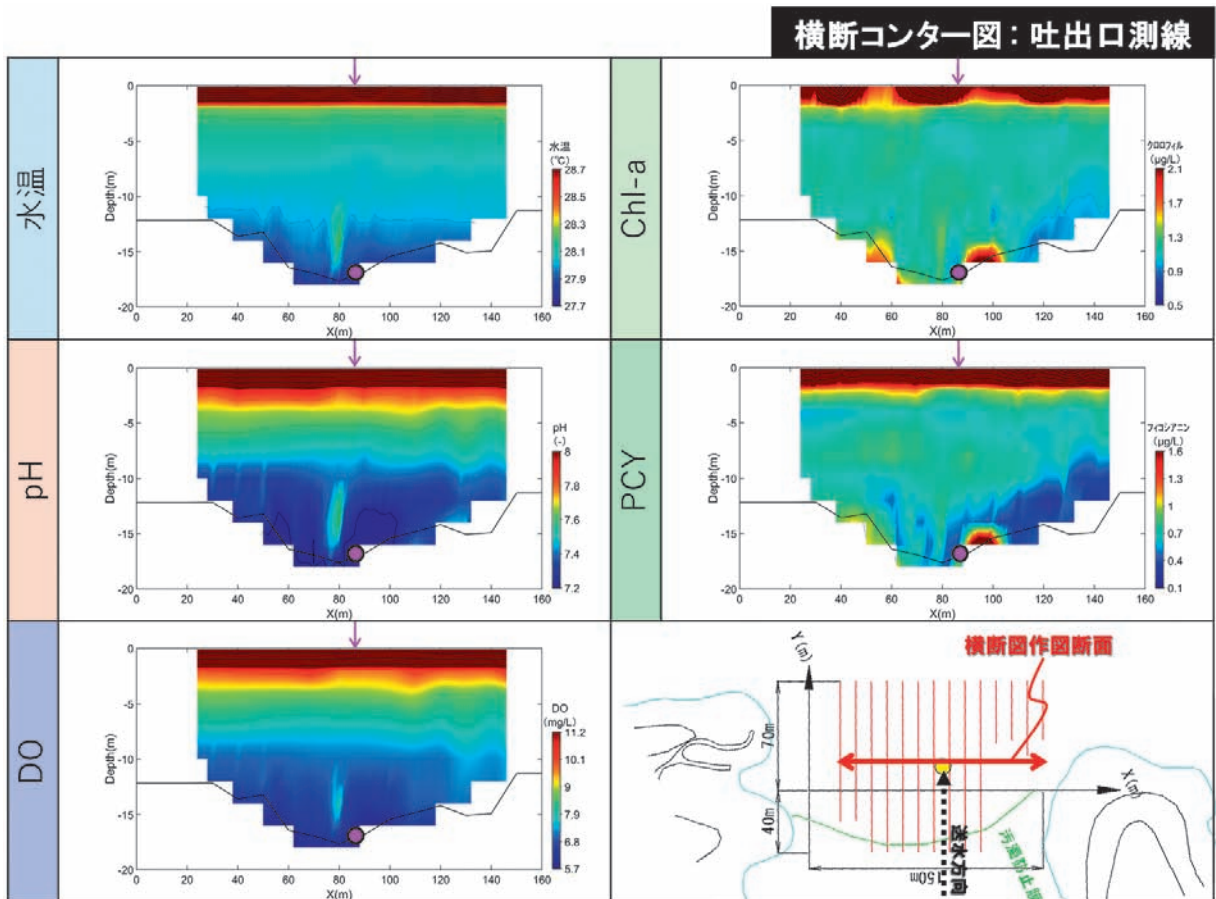


図-14 装置吐出部付近の水質コンター図 (装置吐出口の横断図) ●は装置吐出口位置

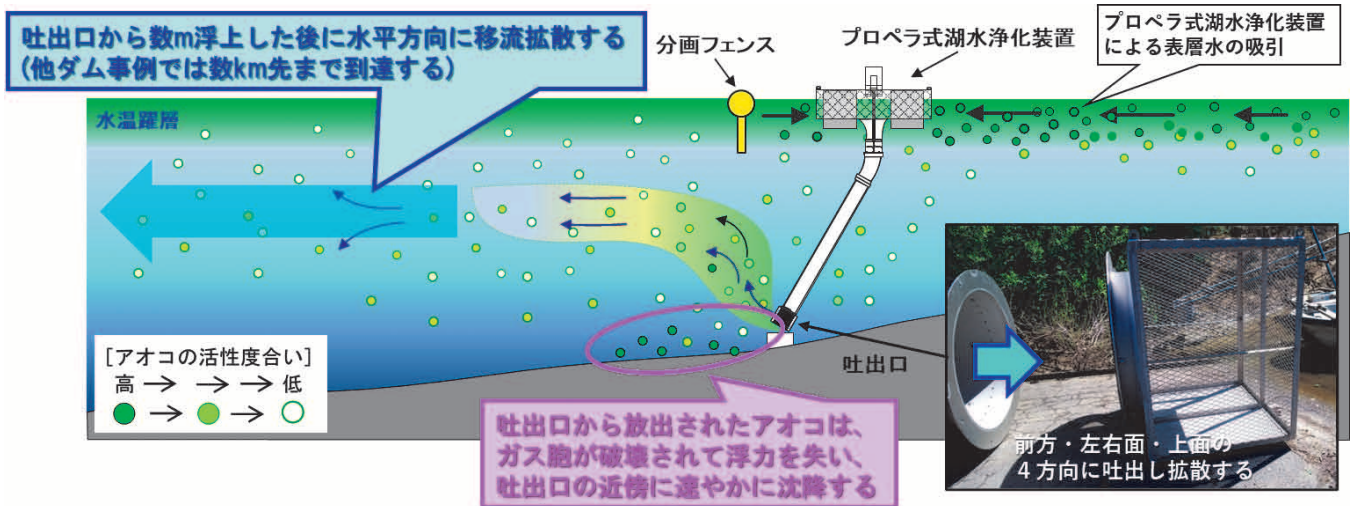


図-15 プロペラ式湖水浄化装置吐出口付近の移流拡散状況とアオコ挙動の想定概念図と吐出口の形状(写真)

入したイントリュージョン流は、吐出口より3.6km先にまで到達⁶⁾していることが確認されていることから、三春ダムでも同様の挙動を示しているものと推察される。なお、今回、水質計測を実施した三春ダムは、プロペラ式湖水浄化装置の吐出口より下流側で計7基の気泡式循環装置が稼働しており、その空気吐出標高は、イントリュージョン流の標高(吐出口の標高EL.299mから4～5m程度浮上して貫入している)ので、EL.303～304mと想定)に近いEL.301mであることから、EL.301m付近に形成されている水温躍層に沿って拡散している可能性がある。

一方、湖水中に含まれるアオコの指標となるChl-aとフィコシアニンについては、吐出口近傍にその周囲よりも高い濃度を示す範囲が確認された。

アオコを形成する藍藻類の持つ特徴の1つとして、ガス胞を用いた浮沈による水面～水中間の日周運動があるが、このガス胞を破壊するために必要な圧力(臨界圧力)は、藍藻類の種類によって異なり、代表的なアオコ形成種の*Microcystis*属では0.4～1.1MPa程度と言われている⁷⁾。但し、これだけの圧力をかけないとガス胞は全く破壊されないという訳ではなく、藍藻類の各細胞内には自然状態でも既に一定の圧力が掛かっており、その圧力は細胞内の膨圧の程度によって異なるとされており、光合成が活発であるほど、細胞内の膨圧は高くなる。

つまり、ガス胞破壊に必要となる加圧程度は、細胞の充填具合によって異なるし、全てのガス胞が破壊されなくても比重が1を超えれば浮上から沈降に転じることから、同じ深度に移送されてもガス胞が破壊されるものとされないものが出てくるものと推察される。

したがって、プロペラ式湖水浄化装置によって水深

約20mの湖底付近に移送されることにより、アオコは0.2MPa相当の加圧によりアオコの一部はガス胞が破壊され、吐出後速やかに沈降すると考えられ、今回の計測で確認された湖底付近のChl-aやフィコシアニンの高いエリアは、この沈降したアオコを捉えたものだと推察される。実際、筆者らは装置吐出口付近の底泥を採取し、底泥上の藍藻類細胞密度(cells/cm²)を計数しており、装置稼働期間中に藍藻類細胞密度は増加する傾向にあったことを確認している(未発表事項)。

以上にて考察した装置から吐出された湖水の移流拡散状況やアオコの沈降に至る挙動を概念的に示すと、図-15のようになる。

6. 今後の課題

今回のAUVと多項目水質計による計測により、これまで懸案であったプロペラ式湖水浄化装置による表層水吐出後の流動やアオコの挙動を概ね把握することができ、「この装置は単に湖水をかき混ぜているだけではないのか?」という問いに対して回答を示すことができたと思える。

しかし、計測された水温や水質濃度は僅かな違いに過ぎず、蓋然性のある十分な観測結果であるかについては、疑問が残る。また、装置吐出口は、図-15の写真に示したように前方・左右面・上面の4面が開口しているが、計測された水質分布には若干の偏りがある。この原因としては、計測当時の貯水池内の流れ(流入河川水貫入に起因する流れ、気泡式循環装置により生じられる流れ、内部静振等)が影響している可能性が考えられるが、その詳細についても解明されていない。

当財団では、今回採用した計測手法で複数のダム貯水池において計測を実施し、今回の結果の蓋然性を確

認していく予定である。また、実際の現場における吐出深度とガス胞破壊割合との関係についても現地実験を行っており、その結果についても追って報告する予定である。

謝辞

本研究は、「プロペラ式湖水浄化装置応用技術研究会」(委員長：日本大学工学部 梅田信教授)において調査方法や調査結果の解釈等について多くのご指導を賜った。また、三春ダム管理所には実験フィールド及びダム管理データ等を提供頂いた。さらに、AUVと多項目水質計による水質観測は、(株)エイト日本技術開発の大本氏・宮川氏にご協力頂いた。これら多くの皆様方にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案),国土交通省 河川局 河川環境課,pp17-19, 2005.
- 2) 丸尾慶樹・木村文宣・朝倉加連・中村伸也：プロペラ式湖水浄化装置による表層水の吸引特性の観測事例-続報-, 令和4年度 水源地環境技術研究所 所報, pp.3-12, 2023.
- 3) プロペラ式湖水浄化システム設置・運用マニュアル, 一般財団法人 水源地環境センター, p.6, 2023.
- 4) 木村文宣・武井俊哉・吉田成人：プロペラ式湖水浄化システムの施設設計手法に関する一考察, 令和元年度 水源地環境技術研究所 所報, pp.3-10, 2020.
- 5) 建設省 東北地方建設局 三春ダム工事事務所：三春ダム工事誌, pp.678-693, 1998.
- 6) 木村文宣・塩見裕亮・豊村馨一郎・工藤勝弘：プロペラ式湖水浄化装置による水質改善メカニズムと今後の展望, 平成28年度 水源地環境技術研究所 所報, pp.3-14, 2017.
- 7) Gas Vesicles: Anthony E. Walsby, Microbiological Reviews, Mar. pp.94-144, 1994.