

プロペラ式循環装置による藍藻類ガス胞破壊効果

Destructive Effect of Gas Vesicle by Propeller-Type Cyanobacteria Eliminator

研究第二部 研究員 澤田 祥吾
前 研究第二部 研究員 酒井 遥
研究第二部 水質技術開発室長 木村 文宣

プロペラ式循環装置は、藍藻類の浮沈特性に着目し、ガス胞の破壊を通じて沈降を促すことを目的とした対策装置であり、近年注目されている。しかし、本装置が稼働することで藍藻類のガス胞が破壊され沈降することにより発現する効果発現メカニズムに関する知見については、過去に観測事例がなく、十分に把握されていない。そのため、2021年～2024年に上記課題を解明するためのモニタリング調査を実施し、ガス胞破壊効果を評価した。その結果、本装置の吸込口付近と吐出口付近における *Microcystis* 属の沈降率を比較すると、吐出口付近の沈降率が大きく、ガス胞破壊効果が確認された。これらの結果より、各年度で沈降率にばらつきはあるものの、プロペラ式循環装置を通過することによりガス胞破壊効果が継続的に発現していることが示された。

キーワード：水質改善、アオコ、プロペラ式循環装置、ガス胞破壊、沈降率

The propeller-type cyanobacteria eliminator is a countermeasure device that focuses on the buoyancy characteristics of cyanobacteria and aims to promote sedimentation by destroying gas vesicles. It has gained attention in recent years. However, there have been no past observational cases regarding the mechanism by which this device achieves its effect—specifically, the destruction of cyanobacterial gas vesicles and subsequent sedimentation—and this mechanism remains poorly understood. Therefore, monitoring surveys were conducted from 2021 to 2024 to elucidate this issue and evaluate the gas vesicle destruction effect. The results showed that the sedimentation rate of *Microcystis* near the device's intake was significantly lower than that near the outlet, confirming the gas vesicle destruction effect. Although sedimentation rates varied annually, these results indicate that the gas vesicle destruction effect is continuously manifested as water passes through the propeller-type cyanobacteria eliminator.

Key words : Water quality survey, Cyanobacteria, Propeller-type cyanobacteria eliminator, Gas vesicle destruction, Sedimentation rate

1. はじめに

ダムは、洪水調節、利水補給（上水・農業用水・工業用水・発電等）、及び流水の正常な機能の維持といった多目的利用がなされている。これらの機能は、流域の水資源管理において中心的な役割を担うとともに、社会の安全性や持続可能な発展を支える基盤的インフラとして位置づけられており、我々の安心・安全な生活の維持に不可欠な存在である。一方で、ダムの設置に伴い河川の流が堰き止められて形成される水域では、近年、水質悪化とりわけ富栄養化現象が深刻な課題として顕在化する場合があり、利水機能の低下や景観の劣化、さらには生態系への影響など、多方面にわたる懸念が指摘されている。

富栄養化現象に伴う水質障害は、アオコの大量発生やカビ臭の発生など、藻類の異常増殖に起因する事例

が多く、その背景には表層水の長期滞留、高水温状態の持続、藻類の増殖を促進する栄養塩類（窒素・リン）の流入といった複合的な要因が関与している。これらの要因は、季節変動や流域の土地利用、気候変動なども密接に関連しており、貯水池内で発生する水理・水質条件と相まって、発生する現象を複雑化させている。このような状況に対して、多くのダムでは気泡式循環装置による表水層の攪拌促進や、流入水浄化施設による栄養塩負荷の低減といった技術的対策が導入されているが、依然として十分な改善が得られないダムも散見され、継続的な対応が求められている。

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によると、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に集中してい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る。こういった特性を有する貯水池では、有効な対策手法が確立されていない。

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いえる。特に夏季の高温・高日射の環境下においては、これらの特性が表層付近での寡占的増殖と集積を可能にする主要因となっている。

本報告の対象であるプロペラ式循環装置は、以上に示す藍藻類の浮沈特性に着目し、ガス胞の破壊を通じて沈降を促すことを目的と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、①光制限効果、②低水温効果、③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③水圧効果に関しては、既存の水質改善対策では機能させることが困難であったものである。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実際に藍藻類のガス胞が破壊され、沈降しているかについては、これまで観測された事例がないため、藍藻類のガス胞破壊効果を立証する上で重要な課題となっていた。

本報告は、こうした課題に着目し、2021年(令和3年)～2024年(令和6年)の4年間に本装置の効果確認のためのモニタリング調査を実施し、プロペラ式循環装置の稼働による藍藻類のガス胞破壊効果について検証した結果を取りまとめたものである。

2. プロペラ式循環装置の概要

プロペラ式循環装置は、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⁾。

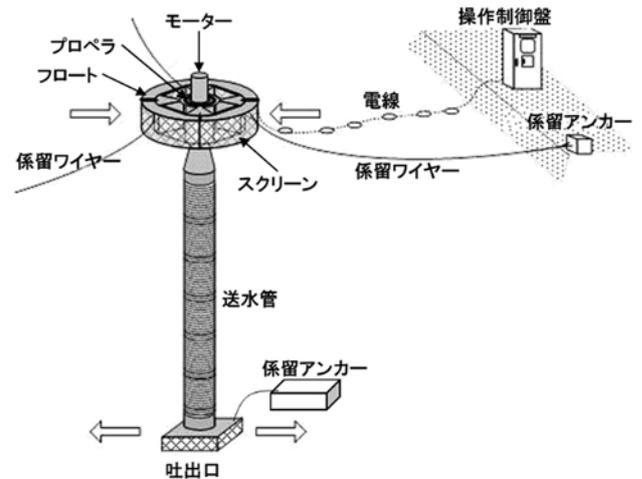


図-1 プロペラ式循環装置の構造



図-2 駆動部本体 外観



図-3 操作制御盤 外観

3. 現地調査

(1) 現地調査フィールド：三春ダムの概要

現地調査を行った三春ダムは、阿武隈川水系大滝根川に建設され、1998年に管理開始された総貯水容量42.8×10⁶m³、湛水面積2.9km²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、ダム湖は一般公募による選考により「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

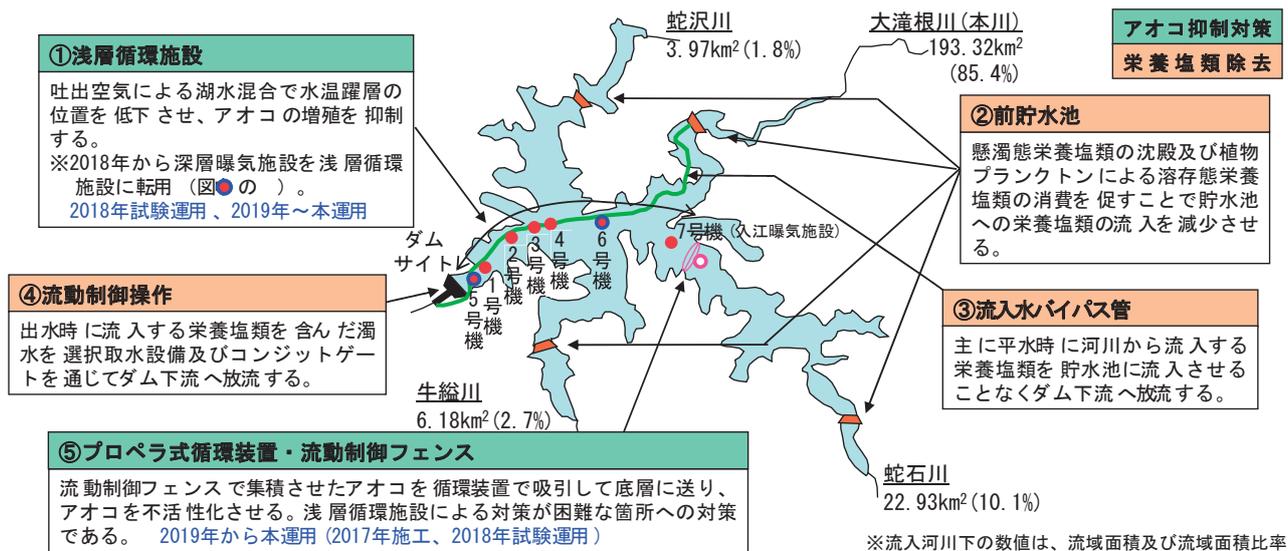


図-4 三春ダムの貯水池形状及び水質改善対策

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-4参照)。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、本報告で対象とするプロペラ式循環装置は、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、2019年より稼働を開始している。

(2) プロペラ式循環装置によるガス胞破壊

本装置は、稼働により送水管を通じて表層から下層へアオコを移送することで水圧による加圧を行い、ガス胞を破壊する。アオコは加圧によりガス胞が破壊されると、浮沈機能を失って再浮上できなくなり、湖底へ沈降する。アオコ沈降後は、光の届かない湖底で活性が低下し、やがて死滅・分解すると考えられている⁶⁾。

アオコは、朝から昼にかけて表層付近で光合成を活性に行うが、この時に細胞内では、光合成による炭水化物の生産と呼吸による炭水化物の消費の両方が起きている。朝から昼にかけては光合成が活発になるため、生産量が消費量より多くなり、細胞比重は大きくなる。逆に昼になると光合成量が減少し、呼吸が卓越することにより、炭水化物の生産量と消費量が逆転し、その

結果、比重は軽くなる。

加圧処理による沈降のしやすさは、以上に示したアオコの浮沈特性とその時の細胞内圧が関係していると考えられる。朝から昼にかけては、比重が軽く細胞内でガス胞の占める割合が大きいが、ガス胞に掛かる細胞内圧が相対的に小さいため、ガス胞は潰しにくい(潰しても沈降しにくい)傾向にある。一方、昼から夜にかけては、比重が重く細胞内のガス胞の占める割合が小さいが、光合成によって生成される炭水化物が増加することでガス胞に掛かる細胞内圧が相対的に大きくなるため、ガス胞は潰しやすく、沈降しやすい傾向にあるものと考えられる(図-5参照)。

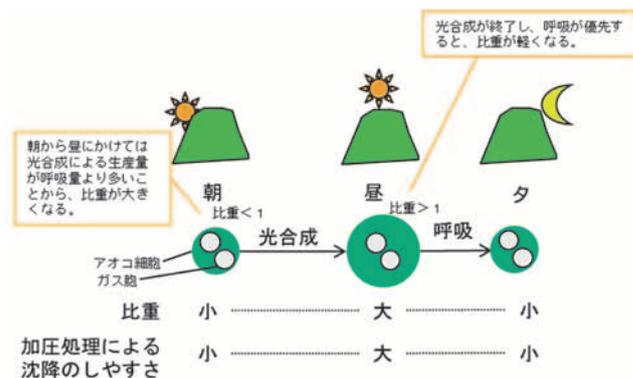


図-5 アオコの浮沈特性と加圧処理との関係

(3) 試料採取地点

前項に示すアオコの浮沈特性と加圧処理との関係を踏まえ、プロペラ式循環装置による表層水の移送に伴うガス胞損傷状況を把握することを目的に、装置稼働中に装置の吸込口及び吐出口(水深約20m地点に設置)の2地点において湖水を採取した(図-6参照)。この

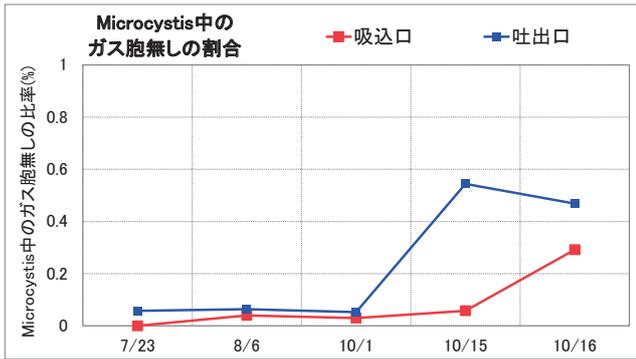


図-9 Microcystis属中のガス胞無し細胞の割合：2024年の事例

出口で大きな違いは認められなかったが、試料中の沈降物は、吸込口では少ないが吐出口では多い傾向が認められ、これらを比率で表すと吸込口の沈降物の割合は、全5調査日で4～44%であったのに対して、吐出口の沈降物の割合は18～96%と明確な違いが認められた。

また、沈降物中のMicrocystis属のガス胞有無に着目すると、7月、8月、10月初旬の試料については、吸込口と吐出口の何れの試料でもガス胞ありの割合が

大きい。10月中旬の試料では吐出口試料のガス胞無しの割合が多くなり、傾向の違いが認められた。なお、沈降物であってもガス胞ありとなっている点は、必ずしも全てのガス胞が破壊されていなくても、Microcystis属は沈降することを意味しており、特筆すべき点といえる。

(2) 2021年～2024年におけるモニタリング結果

前項では2024年のモニタリング結果を示し、Microcystis属に対するガス胞破壊効果の発現が確認できた。本項では、調査を実施した4年間を通じてこの結果が認められるかを確認するため、2021年～2024年の4年間のモニタリング調査結果について同様に整理し、各年のガス胞有無の割合と沈降率を算出した。なお、沈降率は、式(1)により算出した。

$$a = \frac{b}{(b+c)} \times 100 \dots \text{式(1)}$$

ここに、a：沈降率、b：沈降細胞総数、c：浮遊細胞数である。

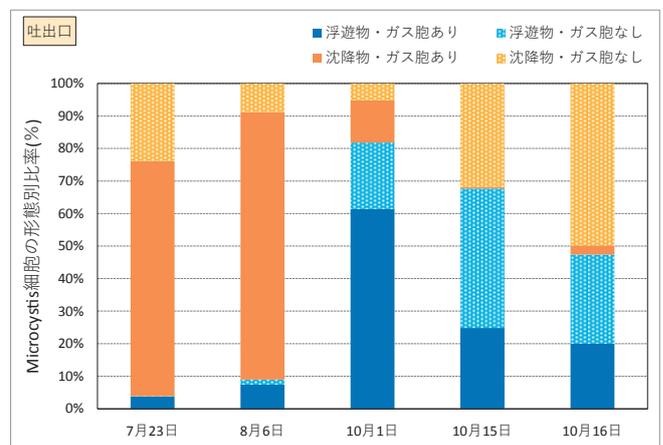
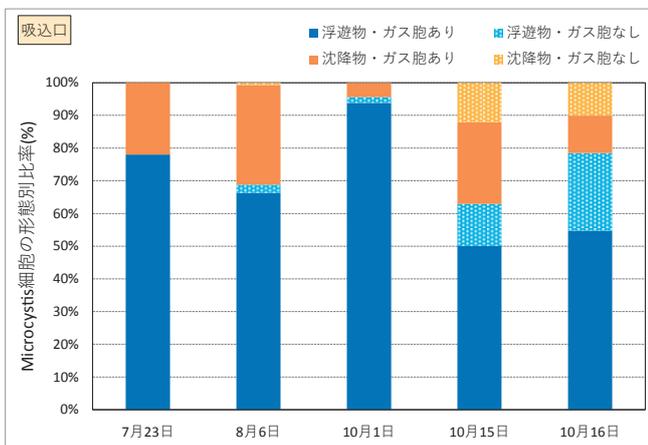
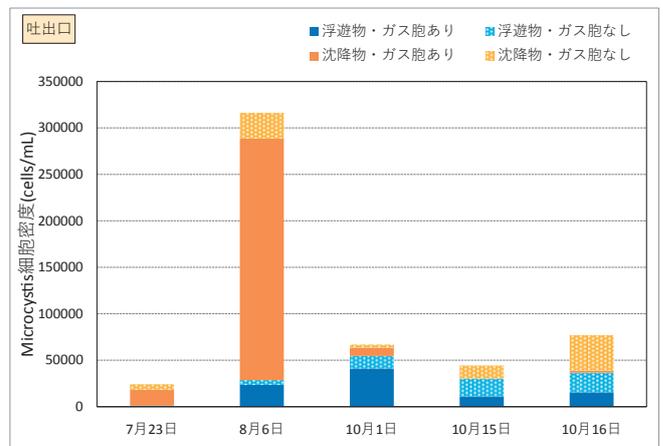
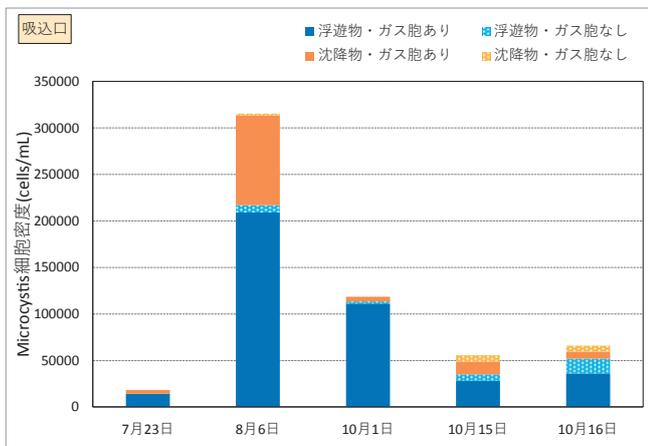


図-10 吸込口及び吐出口の浮遊物と沈降物中のガス胞無し細胞数とその比率

表-1 *Microcystis*属中のガス胞有無数とガス胞比率

マイクロシスティス中のガス胞有り無しの細胞数と無しの比率(%) 年平均値						
地点	cells/mL cells/mL %	2021年 (R3)	2022年 (R4)	2023年 (R5)	2024年 (R6)	2021~2024 の平均
吸込口	有り	9,760	37,648	68,642	11527.4	10.7%
	無し	895	2,600	15,517	1196.2	
	無しの割合	8.4%	6.5%	18.4%	9.4%	
吐出口	有り	5,898	41,390	46,284	6206.8	20.3%
	無し	3,249	3,595	8,744	1720.4	
	無しの割合	35.5%	8.0%	15.9%	21.7%	

2021年～2024年のモニタリング調査結果から、各調査地点におけるガス胞有り／無しの細胞密度とその割合を算出するとともに、各年の平均値を算出し、表形式で整理した(表-1参照)。

その結果、年によるばらつきはあるものの、吐出口でのガス胞無しの割合が相対的に高いことが確認された。4年間の平均値を算出して比較すると、吸込口では10.7%であるのに対して、吐出口では20.3%となった。

次に、沈降率の算出結果を図-11に示す。沈降率についても同様に各年でばらつきはあるものの、全体的に吐出口の沈降率は吸込口より高くなっており、4年間の平均値を算出して比較すると、吸込口では22.2%であるのに対して、吐出口では54.2%と明確な違いが認められた。

以上の結果より、プロペラ式循環装置を通過することによるガス胞破壊効果は、継続的に発現しているものと評価される。

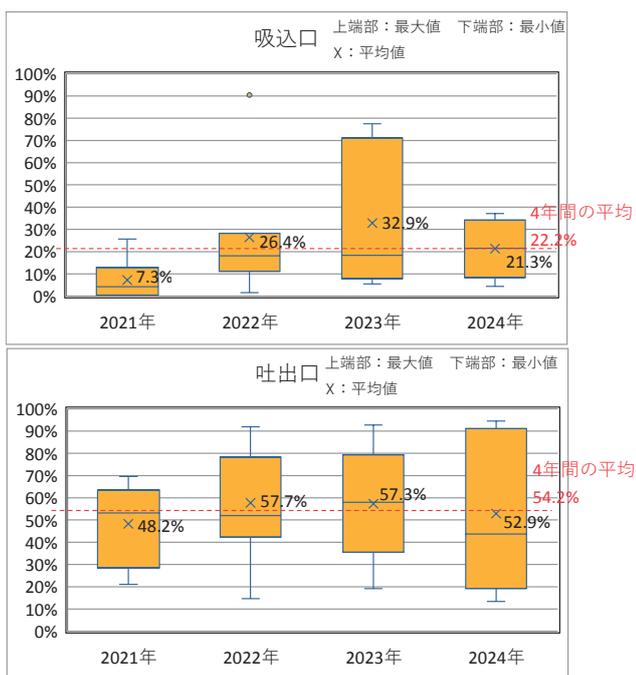


図-11 各年の沈降率の推移 (上段：吸込口 / 下段：吐出口)

5. 考察

前項で示したプロペラ式循環装置によるガス胞破壊効果に関するモニタリング調査結果について、今回の結果が得られた要因等についての考察を以下に示す。

(1) 2024年のモニタリング結果

まず、7月下旬から10月初旬の3回の試料では、ガス胞無し細胞の割合が吸込口地点と吐出口地点の何れでも20%未満と低かった点について考察する。

各調査を実施した期間を含む2024年の蛇石川筋での植物プランクトン調査結果を図-12に示す。2024年の蛇石川筋(フェンスより上流側)では、6月下旬から*Microcystis*属が確認されるようになり、最初は数群体/mLであったものが9月中旬にかけて数百群体/mLまで増加している。特に8月上旬までの増加速度の大きい時期が対数増殖期、8月上旬以降9月中上旬までのやや増加速度が鈍化した時期が増殖期～定常期であったことが伺える。つまり、ガス胞無しの割合が非常に少なかった期間は、*Microcystis*属の活性が高く活発に増殖を繰り返していた時期であったといえる。このため、装置通過前の細胞内の充填度合いにまだ余裕があり、0.2MPa程度(約20m深)の加圧では十分にガス胞破壊に至らしめることができなかつたことが考えられる。

一方、10月中旬に採取した試料については、蛇石川筋付近の*Microcystis*属は衰退期に移行しており、細胞内が炭水化物によって充填されており細胞内圧が装置通過前から高い状態であったため、同じ加圧でもガス胞破壊が十分に行えたものと考えられる。

次に必ずしもガス胞破壊率が高なくても装置通過後の沈降率が上昇した点について考察する。

7月及び8月に採取した試料の分析結果に着目すると、装置通過前の吸込口の試料は、浮遊物の割合が70～80%でそのほとんどがガス胞ありであったが、装置通過後の吐出口の試料では浮遊物の割合が10%以下と大幅に減少し、沈降物が試料の大半を占めるようになった。しかし、沈降物中のガス胞有無については、その多くがガス胞ありのままであった。一方、10月中旬に採取した試料に関しては、装置通過前の吸込口の浮遊物の割合は60～80%であり、その中には10～20%程度の割合でガス胞無しが含まれていたが、装置通過後の吐出口の浮遊物の割合は50～60%と大きく変化がないもののガス胞無しの割合がその殆どを占めていた。

このように時期によって装置通過による沈降率の変

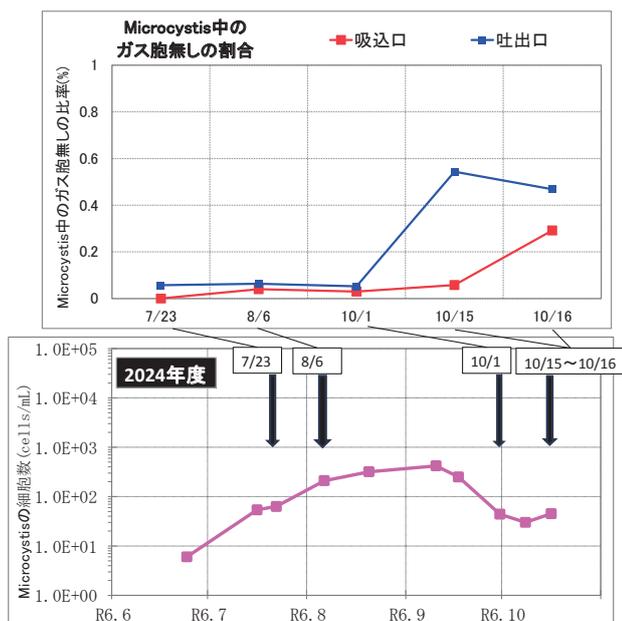


図-12 2024年の試料採取時期の貯水池内の藍藻類発生状況 (記載の日付は試料採取日)

化やその中のガス胞無しの割合の変化が異なる理由としては、以下が影響していると考えられる。

まず、対数増殖期にある*Microcystis*属は、光合成と呼吸のバランスが1日の中で大きく変わる時期であり、細胞内圧も1日の中で大きく変化し、表層付近での浮沈が活発に行われている時期であることが関係しているものと考えられる。つまり、上述した状態にある*Microcystis*属に0.2MPa程度の加圧を行うと、細胞内の一部のガス胞が破壊されるだけで浮沈のバランスが急激に崩れ、沈降に転ずる細胞が多くなるため、沈降物の割合が大きく変化したものと考えられる。

一方、衰退期にある*Microcystis*属については、前述の通り細胞内が炭水化物によって充填されており細胞内圧が装置通過前から高い状態にあるため、ガス胞の破壊は確実にできるものの、光合成を活発に行う時期を過ぎてしまったため、それ以上細胞比重が大きくなることは少なく、結果としてガス胞は破壊されても沈降に転ずるほどの比重には至らず、そのまま浮遊物として残存した可能性が考えられる。

木村らは、三春ダムで発生するアオコをビニール袋に封入して水中へ投下する実験を行い、その結果からアオコ沈降率を95%程度確保するためのガス胞損傷率は35%程度であること、その効果を得るためには少なくとも水深25m以深への表層水の移送と同水深に20秒以上の滞留が必要である、と報告している。

この報告では、複数の投下深度によるガス胞破壊率や沈降率の違いについて解析されているが、その結果においても投下深度が大きくなるに従って沈降率が一

律に増加している訳ではなく、例えば10m深に投下した試料の沈降率が94%であるのに対して、25m深に投下した試料の沈降率が70%となっている。木村らは、その要因として試料としたアオコの加圧前の細胞内圧が不均一であるため、加圧後の沈降率にもそれが影響した可能性を指摘している (未公表)。

今回得られた沈降率とガス胞破壊状況が時期によって異なるという結果は、以上の木村らの報告とも一致していると解釈することができる。

(2) 2021年～2024年におけるモニタリング結果

2021年～2024年の4年間のモニタリング調査結果から、各年の沈降率の平均値・最大値・最小値を算出し比較した結果、年によるばらつきはあるものの、何れの年でも装置通過前後で沈降率は大きく変化し、装置通過後に沈降率が増大する結果が得られた。

以上の結果についても、各年の調査日とその時期の蛇石川筋のアオコ発生状況とを照合し (図-13参照)、安定して沈降率の増大が見られる理由や年によって沈降率にばらつきが生じる理由について考察する。

2021年に関しては、7月13日の試料を除き概ね対数増殖期～定常期に試料採取が行われたものと推察される。このため、装置通過前の吸込口の沈降率は平均値で7.3%と全4年の中でも最も低いが、装置通過後の吐出口の沈降率は48.2%と大幅に上昇したものと考えられる。

2022年に関しては、*Microcystis*属細胞密度が7月下旬のみ特異的に高く、それ以外の調査日では数十～百群体/mLと低い状態で推移していた。つまり、明確な対数増殖期がなく夏季を通じて活性が余り高まらずに一定量のアオコが維持されていたものと考えられる。このため、装置通過前の吸込口での沈降率は26.4%と2021年に比べても高くなっていったものと考えられる。

2023年に関しては、*Microcystis*属が8月初旬に数百群体/mLで出現し9月下旬までその状態を維持した後9月下旬以降は百群体/mL程度で推移した。以上のような経過を辿ったため、*Microcystis*属の盛衰が確認できないが、本研究で分析した試料は恐らく定常期の*Microcystis*属が多く含まれていたものと推察される。このため、装置通過前後での沈降率の違いが明確に表れにくかったものと考えられる。

2024年の*Microcystis*属の盛衰については、前述の通り対数増殖期から衰退期に試料採取したものと推察される。このため、装置通過前の吸込口では衰退期に採取した試料の影響でやや沈降率が大きく21.3%となるが、装置通過後の吐出口では沈降率が52.9%と確実に

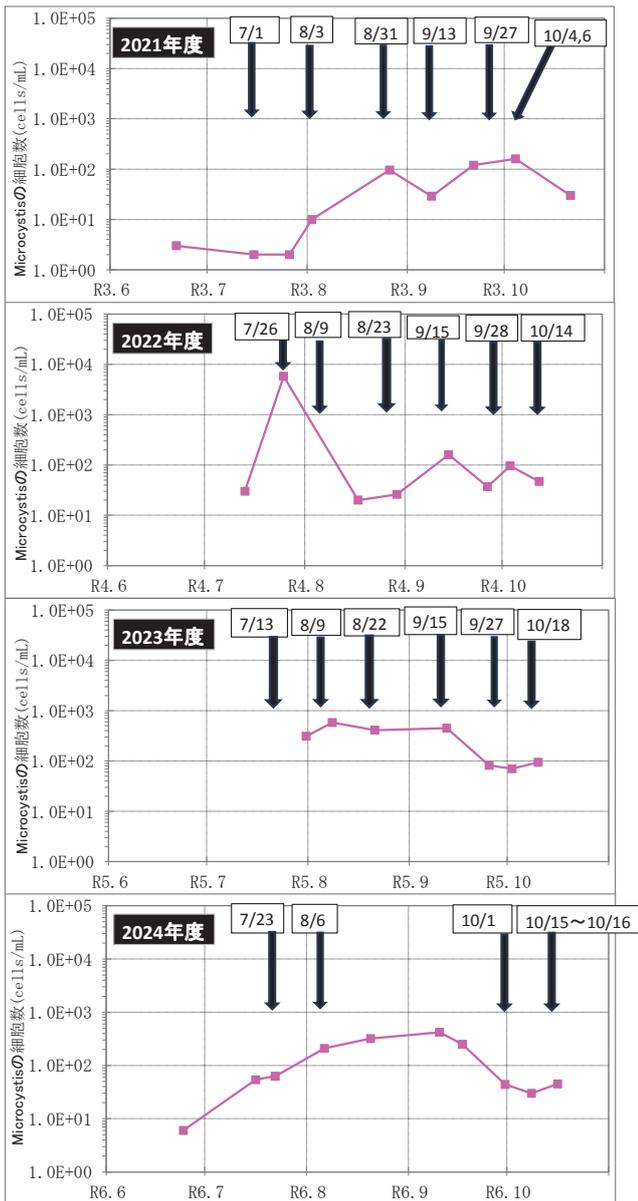


図-13 2021年から2024年の試料採取時期の貯水池内の藍藻類発生状況（記載の日付は試料採取日）

効果が表れる結果となったものと考えられる。

以上の結果から、*Microcystis*属の増殖過程によって沈降率には幅があるものの、アオコ発生期間を通じてプロペラ式循環装置を継続して運転することによって、平均して54%程度の沈降率は確保することができる。つまり、三春ダムに設置されたプロペラ式循環装置は、送水により生じる加圧効果は吐出水深にあたる約20m（圧力換算で約0.2MPa）であり、この加圧によって得られるアオコ沈降効果は、送水したアオコの約半分を沈降させるのものであると総括することができ、これが本装置によるアオコ沈降効果であると評価できる。

6. まとめ

本研究では、プロペラ式循環装置の稼働によって表層水を湖底へ移送することによる*Microcystis*属のガス胞破壊効果を示すことを目的にモニタリング調査を実施し、本装置の吸込口と吐出口のガス胞の有無状況及び沈降状況に着目した比較・解析を行い、その評価を行った。

その結果、プロペラ式循環装置により移送され湖底付近から吐出された湖水は、移送前の吸込口付近の湖水に比べてガス胞無しの割合が1割程度高く、沈降率も平均54.2%と明確な差が見られた。これは、ガス胞破壊によって*Microcystis*属の沈降が促進した結果と解釈することができる。この効果は、4年間の調査結果でばらつきはあるものの安定して得られていることから、本装置の運転によって継続的に得られる効果と評価することができる。

時期による沈降率の変化やその中のガス胞無しの割合が異なる点については、植物プランクトン調査結果から対数増殖期と衰退期の*Microcystis*属の細胞内の充填状況が影響していると考えられ、対数増殖期は0.2MPa程度の加圧で沈降、衰退期はガス胞が破壊されても沈降するほどの比重に至らず、沈降しない傾向であると考えられる。

なお、三春ダムでは、プロペラ式循環装置を2019年より運用を開始し、運用による水質改善効果を毎年評価している。その結果は、2025年2月に開催された「三春ダム水質対策検討会」において報告されており、今回示した結果のほか、底泥上に沈降した*Microcystis*属のガス胞無しの存在比率が経時的に増加することが示された。本検討会では、これら結果に対して、総合的な観点から「プロペラ式循環装置によるガス胞破壊の効果は確認されている」との最終結論が示されている。

以上のことから、プロペラ式循環装置によって*Microcystis*属が表層から湖底へ移送されることにより、ガス胞破壊効果が発現し、ダム貯水池の水質改善に寄与しているものと評価される。

本装置は表層水を数十秒という短時間のうちに水深20m程度の深度へ吐出するものであるが、移送されるアオコにとっては急激な環境変化を受けているといえる。そのため、今回着目した*Microcystis*属のガス胞破壊効果だけでなく、藻類活性に関しても何らかの影響を及ぼしている可能性も否定できない。更に、プロペラ装置の駆動により表層付近で発生する渦も藻類に対して何らかの影響を及ぼしている可能性もある。しかし、これらの可能性については、本研究では十分に追

及できていない。筆者らは、これらの疑題についても引き続き検証を行っていく予定である。

謝辞

本報告を作成するにあたり、三春ダム水質対策検討会（委員長：野池達也 東北大学名誉教授から多くの示唆を頂きました。また、三春ダム管理所からは水質調査等の各種データの提供を頂きました。更にデータ解析の一部については、株式会社日水コンの皆さんにご協力頂きました。

これら多くの皆様方に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：プロペラ式循環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：プロペラ式循環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.