

物理的処理によるアオコ対策の効果に関する 基礎的実験

EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECTS OF PREVENTION METHODS ON BLOOM FORMING CYANOBACTERIA BY PHYSICAL TREATMENT

古里栄一¹・藤野毅²・浅枝隆³・有田正光⁴

Eiichi FURUSATO, Takeshi FUJINO, Takashi ASAEDA and Masamitsu ARITA

¹正会員 博(工) 東京電機大学研究員 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²正会員 博(学術) 埼玉大学准教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

³正会員 工博 埼玉大学教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

⁴正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

We carried out laboratory experiments to measure the effect of mechanical pressurization on *Microcystis aeruginosa* from a eutrophicated water body. When pressure higher than 0.3 MPa was imposed, sedimentation of the cells occurred due to collapsing gas vesicles, and the colony was destroyed. We also conducted decomposition experiments of cells kept in the dark for 20 days at 15°C and 25°C and found that the effect of temperature on the decrease in Chlorophyll-a and increase in orthophosphate was greater than that of pressurization. The synergistic effects of collapsing gas vesicles and destroying colonies by pressurization on cyanobacterial competitive superiority are discussed.

Key Words : cyanobacteria, gas vesicles, pressurization, sedimentation, colony destruction

1. はじめに

ダム貯水池等の停滞性水域では富栄養化によりしばしば藍藻類の異常増殖現象が発生し、様々な水質障害の原因となっている。近年、この水質障害に対する様々な対策技術に関する研究開発が盛んになってきている¹⁾。例えば、わが国でも曝気循環対策によるアオコの抑制事例が報告されている^{2),3),4)}。しかし、従来提案されている対策技術は浅い湖沼では適用な困難なことが多く、浅い水域での対策技術の研究開発が必要である。有効な対策手法の開発においてはアオコを形成する藍藻類の生理生態学的特性や競合戦略を十分考慮する必要があると考える。

アオコを形成する藍藻類は一般に群体形成により生活サイズが大型化しているので増殖速度は遅くなる傾向がある。しかしながら、この特性により、沈降や捕食損失を回避することが可能となる。その結果として極端な優占状態を形成し、表層に集積してアオコ状態となる⁵⁾。この結果、水中は弱光あるいは暗黒化して水を透明化させる沈水植物のみならず他の植・動物プランクトンの増殖も困難となる結果、水質悪化に加えて水界生態系の単純化をもたらされる。

アオコを形成する藍藻類は細胞内のガス胞により浮力制御能を持っている。このガス胞は一定以上の高圧の作

用で破壊され浮力制御能が消失することが指摘されている⁶⁾。また、群体構造が破壊できれば藍藻類の生活サイズの小型化によって動物プランクトンによる捕食が促され⁷⁾、アオコ形成藍藻類の増殖抑制を図ることができると考えられる。このような考え方を応用した手法の一つとして井芹らはアオコを含む水を噴流状に壁面に衝突させ、物理的な衝撃をアオコに与えることによって増殖抑制効果がもたらされると報告している⁸⁾。しかし、彼等の研究では増殖抑制にかかわるメカニズムについての説明は不十分なものであったと考える。

本研究では井芹等の研究を参照した上でアオコを形成する藍藻類(*Microcystis*)の新たな増殖抑制手法について提案するとともに、その効果を室内・現地実験によって検証することを目的としている。

2. 実験方法と実験結果

埼玉県東北部に位置するG調節池(以下、対象池と表記)は富栄養状態にあり、例年夏季に藍藻類によるアオコが発生している。本研究では対象池から採取した藍藻類(*Microcystis*)を用いて、室内実験および現地における隔離水界実験を行った。

(1) 処理装置・手法の概要

本研究はアオコが発生している湖沼の表層水を取水し、それを提案する装置で処理して水質浄化や水界生態系の健全化を図ろうとするものである。提案する処理装置の概略を図-1に示す。取水口から*Microcystis*を含む表層近傍の湖沼水を選択的に取水し、加圧ポンプに導き、処理チャンバーへ送水する。処理チャンバーは円筒形状の内部タンクと外部タンクの二槽のタンクからなる。内部タンクは直径15cm、長さ30cm、外部タンクは直径30cm、長さ40cmである。加圧ポンプを通過した湖沼水は内部タンクに導かれて加圧される。内部タンクの外壁面は多くの直径3mmの穴が開けられている。内部タンクから外部タンクに流出した湖沼水は吐出口から排出される。ただし、室内実験においてはポンプとチャンバーのみを用いて室内で処理を行った。本システムの処理水量は、0.5MPa(処理チャンバー流入前)で約0.5m³/min.である。作用圧力は、内部タンク外壁面の穴の数を変化させることにより変化させた。

本装置ではポンプによる加圧でガス胞の耐圧限界を超える圧力を作用させ、*Microcystis*の細胞内器官であるガス胞を破壊する。その後、処理チャンバー内の内部タンクから、小孔を通して外部タンクに噴流状に*Microcystis*を含む水が流出する。このとき発生する強い乱れやせん断力によって群体構造が破壊される。数10～数100μmスケールの立体構造を有する藍藻類の群体は、数100以上の細胞が一定の規則性を有して集合したものである。この集合体を形成する細胞外の粘性物質等の結合力を上回るせん断力をチャンバーは与えようとするものである。また、処理チャンバーでも加圧ポンプで破壊されなかった*Microcystis*のガス胞破壊が期待される。なお、処理チャンバー内を水が通過するのは1秒未満の僅かな時間である。以上のように本装置は物理的に*Microcystis*を処理しようとするものであり、薬剤などを使用しない点は工学的・環境技術的に有利な点であると考えている。なお、本装置ではガス胞と群体構造の双方を破壊するものであるが、上述の様にそれぞれの機構や作用力の種類が異なることから、ガス胞破壊の上では群体構造破壊は必ずしも必要ないと考えられる。

(2) 室内実験

a) ガス胞と群体破壊

本研究で提案する処理装置の基本的な効果を調べるための検証実験の結果を以下に示す。検証実験では、試料水を対象池においてアオコ発生時に採取し、直ちに実験室へ持ち帰って実験を行った。なお、処理装置の処理チャンバー流入前の圧力は、後述の図-2.3の結果を念頭において0.5MPaと設定した。

写真1(a)-①は現地水が無処理のまま攪拌した状況、写真1(a)-②は処理装置により処理した直後の状況を示している。両写真の状況に大きな差は認められないことが分かる。写真1(b)-①、②はそれぞれの24時間後の状況

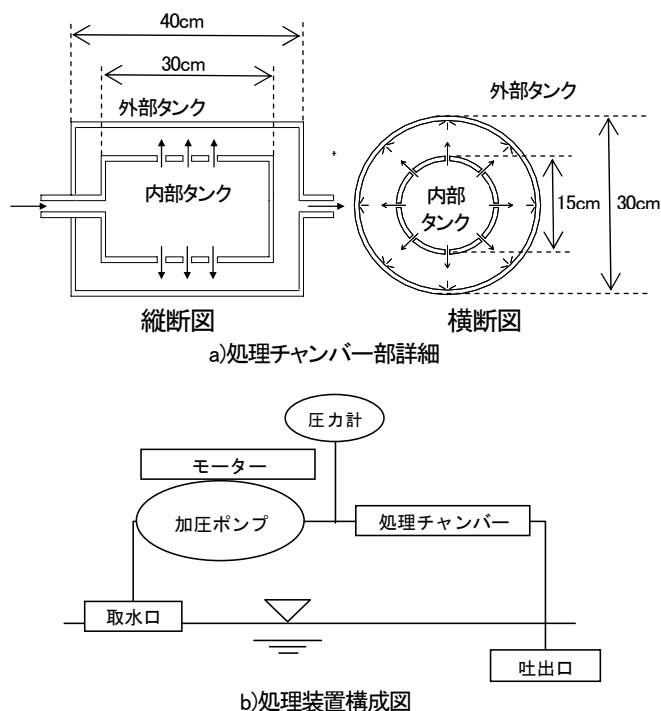


図-1 藍藻類を処理する装置の概念図(bは現地実験の構成を示す。)

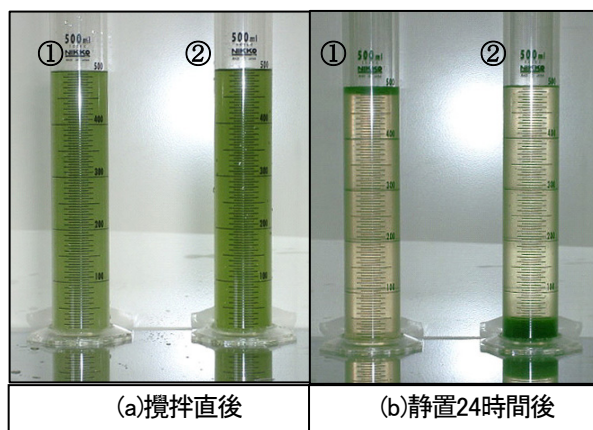


写真-1 無処理・処理による*Microcystis*細胞の沈降状況(両写真共、左:無処理、右:処理、処理圧力:0.5Mpa)

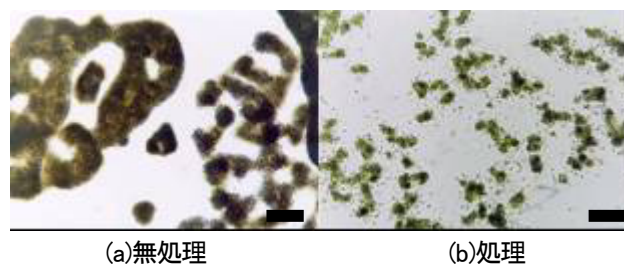


写真-2 無処理・処理の*Microcystis*の群体構造(左:無処理、右:処理、バーは100μm)

を示している。同写真より無処理のケースではガス胞による浮力効果で*Microcystis*が水表面付近に浮遊していること、逆に処理したケースでは*Microcystis*が沈降してい

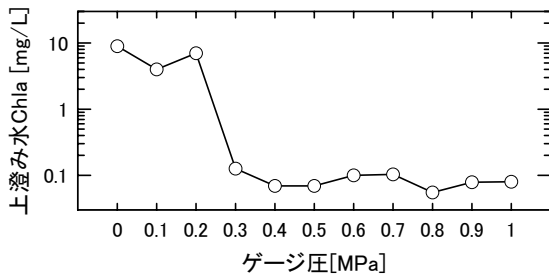


図-2 処理圧力の変化による *Microcystis* の沈降促進効果

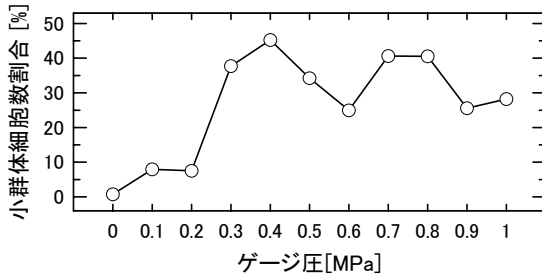


図-3 処理圧力の変化による *Microcystis* の群体破壊効果

ることが分かる。つまり、処理により *Microcystis* のガス胞が破壊され浮力効果を失ったことが明らかである。

写真-2(a)は無処理の場合、写真-2(b)は処理後の群体破壊効果を示す顕微鏡写真である。処理前に形成されていた、直径数100 μ mの *Microcystis* の群体構造が処理によって破壊されている様子がわかる。なお、処理後においても細胞は単体では存在せず数細胞～数10細胞程度の凝集体様の塊として存在している。これは、次節で詳述する様に、処理装置によって単細胞に分離された *Microcystis* の細胞が、一定時間後の沈降により濃縮された事に加え、細胞表面に残存している粘性物質の作用によって再凝集したものと考えている。このようにアオコの群体構造が破壊されると、サイズが小型化する事から動物プランクトンが捕食しやすい状態になると考えられる。実際に処理後の水の中でケンミジンコ等の大型の動物プランクトンが増殖していることが確認されている。

b) 処理圧力と処理効果

図-2は、対象池において水表面近傍で採取（平成12年10月4日）した現地水を圧力を変化させて処理し、1Lのメスシリンダー内で24時間自然放置した後の上層水のChla濃度の測定結果を示す。なお、Chlaの測定方法は、吸光法⁹⁾を用いている。同図に示すように、同一の試料水を使用したにも関わらず、処理圧力が0.3 MPa以上では上澄み水のChla濃度が大幅に低下しており、無処理(0MPa)に対して約1%程度であった。これは処理の作用圧力が *Microcystis* のガス胞破壊限界圧力⁹⁾を超過したために、ガス胞が破壊されて沈降した結果であると考えられる。0.3 MPa以上のメスシリンダーは、写真-1に示すように *Microcystis* の細胞の多くが容器底部に沈降し、上

澄水が透明化していたことが目視的にも確認されたことを付記する。

図-3は処理水を攪拌した上で、（小群体として存在する細胞数）/（全細胞数）と処理圧力の関係を示したものである。ただし、処理後1時間経過した後に顕微鏡観察した結果である。なお、ここでは前述した様に処理直後は単細胞状態で存在した細胞が、顕微鏡観察までの一定時間の後に再度凝集した群体様の不定形の塊を、便宜的に群体と呼ぶこととしている。この群体様の細胞塊が、10細胞以下から構成されるものを小群体と定義している。同図より0.3 MPa以上では小群体細胞数の割合が急増し全体として3割以上となっていることが分かる。これは写真-2の結果に対応するものである。

なお、上述のようにここで定義する小群体は処理装置により単細胞状態となった藍藻類が再度凝集したものである。その意味では図-3に示す群体破壊効果は過小評価であり、本処理装置はさらに高い効果を持っていると考えている。

c) 処理水の暗所分解実験

本処理装置で処理して浮力を消失した *Microcystis* は湖沼の下層の無光層に沈降する。その結果、枯死による分解に伴って無機態栄養塩の水中への回帰が生じ、藍藻類を含む植物プランクトンの増殖を促進することが懸念される。以下ではこの点に関して検討するための暗所分解実験結果を示す。

上述の現象を模擬するために対象池で採取した試料水（平成13年9月3日採取）を使用して室内実験を実施した。実験では現地で処理圧力0.5MPaで処理した後、冷暗状態で保存して直ちに実験室に持ち帰ったものを使用した。処理水は200mlの三角フラスコに分配した上で密閉し、15℃および25℃の暗所で20日間保管した。このフラスコ中の試料水を3～5日間隔でChlaとPO₄-Pの分析を行った。なお、分析直前に十分に攪拌し、浮上あるいは沈降している細胞を十分に均質化してから分析に供した。分析方法は河川水質試験方法⁹⁾によった。図-4はChla濃度とPO₄-P濃度の経日変化を示している。同図中には15℃と25℃の両水温ケースに加え、比較のために無処理のケースを併せて示している。なお、同一条件で3本のフラスコを用いており、図中ではこれらの標準偏差をあわせて示した。

図-4(a)より、Chla濃度は処理の有無や水温条件に関わらず全てのケースにおいて暗所移行後に減少していることがわかる。これは、藍藻類の耐暗性の弱さ¹⁰⁾によると考えられる。ただし、処理のケースが無処理のケースよりも減少率が大きい。これは群体破壊された藍藻類が試料水中に含まれる動物プランクトンに捕食されやすくなったことや、群体破壊によって分解されやすくなったこと等が原因として考えられる。また、処理のケースでは15℃より25℃の方がChla濃度の減少率が大きい。これは処理、無処理の比較と同様に動物プランクトンによる

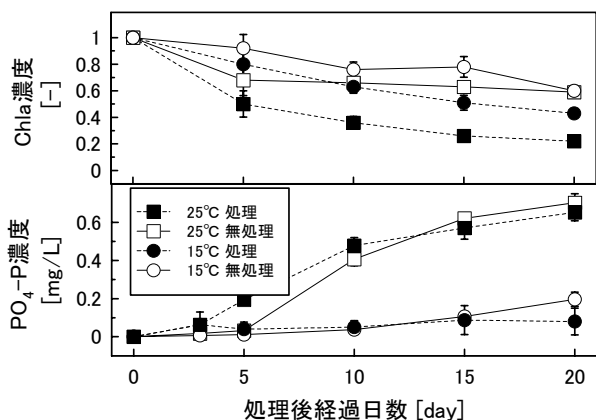


図-4 処理水の分解実験結果(縦棒は標準偏差を示す)

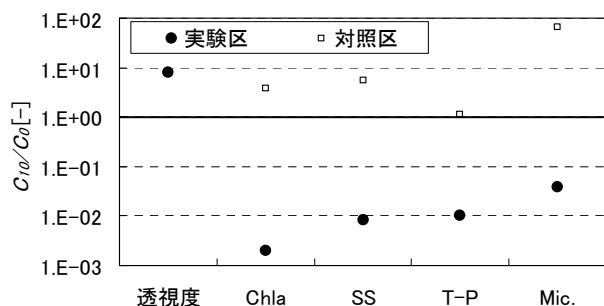


図-5 隔離水界実験結果(対照区の透視度は測定不能であったため図示していない)

捕食が活発化したこと、水温の高い方が分解が促進されやすくなったことが原因と考えられる。

図-4(b)は無機栄養塩のPO₄-Pの経日変化を示す。同図より、すべてのケースでPO₄-Pは増加するが、増加率は15°Cよりも25°Cのケースで顕著であり、処理による差異よりも設定水温の影響の方が大きく、Chla減少とは若干異なった結果となった。この要因としては、両項目の変動に関する過程が異なっていることが考えられる。Chlaの減少は、暗所における枯死や病原菌の感染および動物プランクトンの捕食によって生じる。ただし、これらの作用では、*Microcystis*の細胞内に存在していた有機態リンは有機態のまま存在している。デトリタス状の有機態リンが、従属栄養細菌によって無機化されて、はじめてPO₄-Pが増加することになる。本実験では、こうした個別プロセスについて評価することはできないが、両項目の変動にかかる要因の違いが、こうした変化を引き起こしたのではないかと考えられる。この要因については更なる検討が必要であるが、処理による藍藻類細胞の暗所沈降後に生じる無機態リンの回帰量の増加については、本実験で用いた条件によっては生じないと言えよう。

(3) 現地実験 (隔離水界実験)

本処理装置の効果を検証するためには現地での実験が必要となる。そこで、室内実験用の試料水を採取した同一水域において、隔離水界実験を実施した。(平成14年9月21日) 隔離水界は3mx3m(面積約9m²)、水深約2mの不透水性の膜からなるものであり、容積18m³である。

(以下では実験区という)。従って隔離水塊は周囲の水域とは水の交換は無い。実験においてはアオコを含む表層近傍の水塊を選択取水した後に約18m³を処理し、再び隔離水界内に放流した。なお、図-2の実験結果を参照して、処理圧力を0.5MPaとした。

処理された隔離水界内の表層水を処理直後と処理10日後に試料水として採取して分析を行った。分析項目は、透視度、Chla、T-P、SS、*Microcystis*細胞数である(図中ではMic.と表記している)。分析方法は、常法⁹⁾によった。なお、比較のために隔離水界の外(以下では対照区という)の表層水をほぼ同時に採取して同様の分析を行った。

図-5は処理実験実施日とその10日後の表層水を実験区と対照区のそれぞれにおいて採取し、その分析結果から各測定項目の増減比を示したものである。同図の縦軸は処理10日後の各項目の値(C₁₀)を処理直後の値(C₀)で除した結果を示している。よって、C₁₀/C₀>1は10日間で対象とする項目の値が増加したこと、C₁₀/C₀<1は減少したことを意味する。なお、対照区のC₀は、処理実験実施日に採水したサンプルの値である。

対照区と実験区の双方において、C₀としてのT-PおよびSSのChlaに対する比率は一般的な植物プランクトン細胞内の比率に近い値であった(対照区、T-P / Chla = 1.91 [g/g], SS / Chla = 105 [g/g]; 実験区、T-P / Chla = 0.97 [g/g], SS / Chla = 167 [g/g])。また、試料水中の植物プランクトンのほとんどは*Microcystis*であったことに加え、処理実験実施日のChlaの細胞あたり含有量(対照区、3.4[pg/cell], 実験区、1.7 [pg/cell])が、一般的な*Microcystis*の値と近い値であったことから、C₀の水質値は、*Microcystis*細胞に含まれる物質量を測定したものであると考えられる。

対照区では透視度以外の分析項目がC₁₀/C₀>1である。これは実験期間において、実験対象湖沼ではアオコの発生が継続しており、風による集積あるいは増殖によって濃度上昇が生じていることを示している。したがって、実験区のデータは、実験湖沼のアオコ発生期間において、処理水の性状がどの様に変化するのかわを示している。なお、透視度については対照区の表層がアオコで覆われた状態であり測定不能であったため図示していない。一方、実験区の分析項目の値は透明度が増加するとともに、その他の項目は10%以下(C₁₀/C₀<0.1)の値にまでに低減し、大幅に水質が改善されたことが伺える結果となっている。これは、処理による*Microcystis*細胞の沈降が、水質浄化そのものを生じたためであると考えられる。

3. 処理装置の適用可能性に関する考察

(1) 物理的処理の多様な影響と水質等の改善効果

本研究では、提案した処理装置を使用すれば*Microcystis*のガス胞と群体構造が破壊され、それによって水質浄化が可能であることを明らかにした。ここでは

処理に関わる基礎要素と本処理が水質に及ぼす影響についてより詳しく考察する。

a) ガス胞破壊

本実験は藍藻類の*Microcystis*を対象にしたが、他の藍藻類に対しても類似の作用があると考えられる。実際のガス胞破壊は総圧力、つまり、外部からの圧力と細胞内の膨圧の和が、ガス胞の限界圧力を上回った場合に生じる⁶⁾。しかしながら、限界圧力はプランクトンの種によって異なる。したがって、処理対象とする藍藻類の種類に応じて処理に必要とされる圧力は変化する。

富栄養化水域で発生する藍藻類の膨圧は0.2~0.5MPa程度である⁶⁾。また、本研究で用いた*Microcystis*の膨圧も含めたガス胞破壊の限界圧力は約0.8MPaである⁶⁾。図-2で示した沈降促進効果は0.3MPa以上で生じていることから*Microcystis*の処理時の膨圧は0.5MPa程度であったことが推察される。これは*Microcystis*の膨圧としては大きい方であることから、確実な沈降促進作用を生じさせるためには、0.3MPaより十分に高い処理圧力を使用する必要があると考えられる。この観点から、室内・野外実験では0.5MPaを使用したものである。なお、*Microcystis*以外の植物プランクトンを取り扱う場合は対象とするプランクトンの限界圧力の違いに加えて膨圧を考慮して処理圧力を設定すればよいと考える。

b) 群体構造の破壊

本研究の処理装置では藍藻類の*Microcystis*を対象にして群体破壊効果が認められることを示した。著者らは別途の簡易な実験で他の藍藻類 (*Phormidium*等)の群体構造も破壊されることを確認している。つまり、本処理装置はさまざまな藍藻類に適用可能な手法であると考えられる。

一般に自然湖沼が風等によって流動するとき、流れの中の渦の最小サイズは植物プランクトンの細胞あるいは群体よりも大きいとされている¹¹⁾。それ故、自然湖沼中の植物プランクトンの群体構造は乱流構造の中に埋め込まれた状態となっており破壊されにくいと考えられている⁵⁾。本処理システムは処理チャンバーの内部タンクから外部タンクへの噴流流出時に生じる極めて大きな流速(約20m/s)により強い乱れとせん断力を発生させて群体構造を破壊させようとするものである。この原理を適用すれば処理チャンバー内の構造は本研究で提案したもの以外にもさまざまな構造が考えられる。

ところで、*Microcystis*は多糖質の粘性物質の作用で群体を形成している¹²⁾。一方、他の藍藻類、例えばアオコを形成する*Anabaena*や*Aphanizomenon*は、群体や糸状体をシースやカプセル状有機物によって形成している¹³⁾。これらの藍藻類の細胞同士を繋ぐ力が*Microcystis*と同程度であれば、提案する処理装置は同様の効果を発揮すると思われる。この点については追加研究が必要であり、場合によっては対象とする種に応じて処理チャンバーの構造を変更する必要があるだろう。

e) 水質への影響

アオコ形成藍藻類だけでなく一般に植物プランクトンは、細胞自体が有機物や窒素・リンから構成された懸濁粒子である。したがって、粒子態と溶存態を分離せず水質を評価する場合、アオコの発生時の様に植物プランクトン細胞数が極めて高密度な状況では、その存在自体が水質指標値悪化の原因となる。本研究の処理装置を使用すればガス胞が破壊されたアオコは湖底に向かって沈降する。これによってアオコが発生している湖沼の水質は劇的に改善されることが期待でき、図-5に示したように95%以上の水質改善を得ることも可能となる。

また、アオコが形成されると水中は透視度が低下し、沈水植物や他の植物プランクトンの増殖は困難となり、湖沼水は濁った状態を継続させることとなる。本対策は透視度を向上させアオコ形成藍藻類のK戦略⁵⁾を無効化し、湖沼の水界生態系を望ましい状態に改善する上で有効であると考えられる。これは、バイオマニピュレーションにおけるカタストロフィックシフトのきっかけの1つに対応すると考えている。

一方、アオコが沈降して底泥として湖底に堆積することにより、栄養塩の溶出による水質悪化の可能性が生じる。しかし、本対策は浅い湖沼を対象としていることから水が透明化して湖底付近まで光が届くことにより、湖底近傍の貧酸素化が防止され栄養塩の溶出は抑制される可能性が高いと考えている。

(2) 残された課題

本研究で提案した処理装置による処理後の藍藻類の増殖機構や動物プランクトンや他の植物プランクトンへの影響については残された課題である。ガス胞の圧力による破壊効果については既存知見が数多く存在するものの、群体破壊については基礎的な知見が不足していると考えられる。本研究で採用した処理チャンバーをより効率的なものとするための改善策は残された課題である。

また、アオコの移動特性(浮遊特性など)を考慮した設置場所・稼働時間・自動制御などの運用指針、施設規模などの低コスト化などに関する検討が必要となる。本論文ではこれらは未検討の課題として残されているが、現地での運用に関して重要な項目であり、さらに検討を進めたいと考えている。

5. 結論

本論文はアオコの発生した水域の水質改善を図る目的でガス胞と群体構造を物理的に破壊する処理システムを提案し、その水質改善効果を室内および現地実験により検証したものである。

提案した処理手法により0.3MPa以上の処理圧力で*Microcystis*のガス胞破壊されること、処理チャンバーによって群体構造が破壊され、処理水中のアオコは沈降することが明らかになった。また、これによる各種水質指標の改善が確認された。なお、本手法は*Microcystis*以外

の藍藻類においても効果的であると予想された。

謝辞：本研究の実施にあたっては、埼玉県県土整備部に現地実験の使用許可を頂いた。また、隔離水界実験施設の設置にあたっては、小川工業株式会社の柿沼弘美課長および渡辺公成主任に、実験にあたっては、株式会社マルオテクノクリエイトの丸尾文雅代表に協力していただいた。ここに記して謝意を示す。

6. 参考文献

- 1) Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A. and Nichols, S. A.: (eds). *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*, 3rd ed. CRC Press, FL. 2005.
- 2) 古里栄一, 浅枝隆, 須藤隆一: アンテナ色素の吸光特性に基づく藍藻類の光学および水理学的発生条件に関する現地データを用いた考察—アンテナ色素・浮力周波数仮説—, *水環境学会誌*, 26, pp. 285-293, 2003.
- 3) 後藤浩一, 古里栄一, 浅枝隆: 曝気循環対策による藍藻類増殖抑制効果に関する研究, *水工学論文集*, 52, pp. 1297-1302, 2008.
- 4) 梅田信, 古里栄一, 浅枝隆: 富栄養化したダム湖におけるアオコ発生指標としての水温成層安定性, *ダム工学*, 16, pp. 269-281, 2006.
- 5) Reynolds, C. S.: *Vegetation processes in the pelagic: A model for ecosystem theory*, Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany, 1997.
- 6) Walsby, A. E.: Gas vesicles, *Microbiol. Rev.*, 58, pp. 94-144, 1994.
- 7) Burns, C. W.: The relationship between body size of filter feeding Cladocera and the maximum size of particle ingested, *Limnology and Oceanography*, 13, pp. 675-678, 1968.
- 8) 井芹 寧, 横山 保夫, 物理的衝撃を用いた, 富栄養化防止手法について, *日本陸水学会第65回大会 講演要旨集*, 78, 2000.
- 9) 建設省河川局: *河川水質試験方法 (案) 1997 版*, 1997.
- 10) 古里栄一, 浅枝隆, 福渡隆: 淡水植物プランクトンの耐暗性について, *水環境学会誌*, 24, pp. 27-34, 2001.
- 11) Spigel, R. H. and Imberger, J.: "Mixing processes relevant to phytoplankton dynamics in lakes." *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.*, 21, pp. 361-377, 1987.
- 12) Drews, G. and Weckesser, J.: "Function, structure and composition of cell wall and external layers." *The Biology of Cyanobacteria*, Carr, N. G. and Whitton, B. A. eds., Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 333-357, 1981.
- 13) Stanier, R. Y. and Cohen-Bazire, G.: "Phototrophic prokaryotes: The cyanobacteria." *Ann. Rev. Microbiol.*, 31, pp. 225-274, 1977.

(2009.9.30受付)