

沿岸帯の植生保全技術に関する研究

Development of preservation technique for pelagic vegetation

浅枝隆^{1*}、古里栄一²

Takashi Asaeda¹, Eiichi Furusato²

¹ 埼玉大学 大学院理工学研究科環境制御工学専攻

Dept of Environmental Science & Human Engineering, Saitama University

² 有限会社環境水理研究所

Environmental Hydraulic Institute Ltd.

研究目的：貯水池や湖沼における水環境の保全と修復を目的として、水界生態系の重要な構成要素である沿岸帯の植生ならびに関連生態系に関する保全技術の応用生態工学的な研究を行う。

1. 背景

湖沼等の停滞性水域の生態系においては、沿岸帯の植生、すなわち、沈水植物等の水生植物が、水質浄化のみならず様々な生物の生息環境の維持などの重要な機能を担っている。しかしながら、近年は水質汚濁により植物プランクトンが異常繁殖し、藍藻類によるアオコが発生して、様々な水質障害が生じる場合が多い。さらに、アオコは水面を覆うように発生するために、こういった湖沼では沈水植物が繁茂することができない。アオコの原因となる藍藻類は、近年はミクロキスティンによる毒性と言った問題を引き起こすことから、沿岸帯の植生を保全することのみならず、生活環境という点からも改善施策の実施が必要である。

アオコのような富栄養化現象は、基本的には過剰な栄養塩負荷が、人間諸活動に伴い河川に流出し、富栄養化させた結果として生じている。したがって、最も根本的な解段は流域負荷の発生あるいは流出の抑制である。しかしながら、小規模排水あるいは面源排水が原因となることも多く、流域対策を実施することは社会経済的に困難であることが多いのが実態であろう。

こういった背景から、湖内対策が重要となってくる。例えば、深い貯水池においては曝気循環対策が既に多くの水域で効果を発揮している。しかしながら、浅い水域においてはこれらの対策効果は期待できないことから、アオコの抑制は困難であることが多い。

浅い水域においても効率的にアオコを抑制できるシステムであるシアノバスターは、アオコの発生および分布特性や、これを可能にする浮力制御能等の生理生態学的な特性(岡田ら 1981)に対応した効率的なシステムである。

本報では隔離水界や大規模貯水池における適用実験の結果に基づき、シアノバスターの効果について述べる。

表1 シアノバスターの一般的な効果

施設	作用	直接的な効果	副次的・広域的な影響
シアノゲート	吹送流を利用した水の華の効率の良い取水	浮遊した藍藻類を除去する。	以下の作用の効率を上げ、B/Cを向上させる。
バスターマシン	圧力処理によるガス胞の破壊	藍藻類を沈降させる。(透明化する)	藍藻類の光占有を妨害し、無害な他の植物プランクトンの増殖に適した環境を形成する。
	衝撃の強せん断処理による群体構造の破壊	藍藻類の群体構造を破壊する。	ミジンコ等の捕食圧が増加し、高次の生態系の食物連鎖につながる。

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保2 5 5 電話：048-858-3563 FAX：048-858-3563
Email：Asaeda@post.saitama-u.ac.jp

2. シアノバスターの概要

藍藻類によって生じる水の華現象の抑制対策には、流域対策や湖内対策など様々な手法が、開発・適用されている。これらは、水域毎の自然環境あるいは地域社会の特性に応じて有効性が異なるために、対象水域の諸特性を検討した上で適用することが必要である。シアノバスターは、無機態栄養塩の流域負荷の削減が困難であるために湖内対策が必要で、かつ曝気循環等の流動制御対策の適用が難しい水深の浅い水域や貯水池流入端等においても、効率よく藍藻類の増殖を抑制することのできる対策である。表1に、シアノバスターの原理と一般的な効果を示す。なお、シアノバスターシステムの主要な機能であるバスターマシンにおける噴射衝撃は、殺藻ではなく以下の作用により水界生態系の健全化を促進する機能が期待できる処理手法である。処理による藍藻類の増殖の抑制に加えて、競合者である緑藻類や珪藻類等他の植物プランクトンや、捕食者である各種動物プランクトンの増加が生じる(井芹他 2000, 古里他 2003)。したがって、噴射衝撃処理は、水の華の形成藍藻類が極度に優占する状態から、多様でバランスのとれたプランクトン群集へ遷移させる効果を有する手法である。

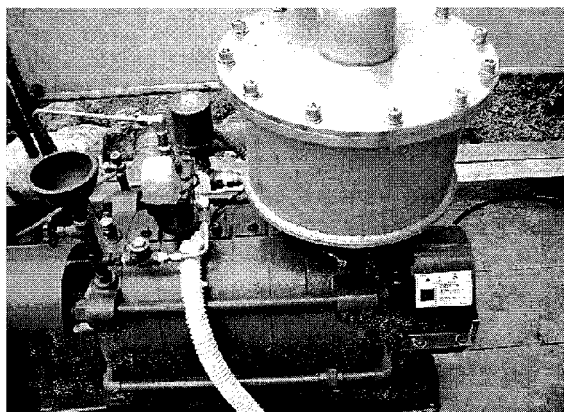


写真1 シアノバスターシステム(プロトタイプ),(上:
シアノゲート,2.5×1.0×0.5m)(下:バスターマシ
ン0.5m³/min.定格出力 15kW)

3. 水の華の除去効果(効率的なシアノゲートによる藍藻類の取水)

3.1 現地実験その1：埼玉県内調節池における小規模水域実験

M.aeruginosa による水の華が発生している埼玉県内の調節池において、施設規模と対象面積との関係を明らかにすることを目的としてシステムの稼動に伴う表層の水の華の分布変化の調査を行った。

(1) 実験結果

図1に隔離水域における水の華の取水状況を示す。吹送流によって隔離水塊の風下側に於いて約 8m^2 の範囲に集積して水の華状態となっていた浮遊藍藻類の群体は、処理開始後約8分でほぼ除去することができた。隔離水塊の幅が 10m であることから、水塊内の平均的な取水流速は約 1cm/s であったと推測される。また、実験装置は $0.5\text{m}^3/\text{min}$ の取水量であることから取水層厚は水の華の水面集積層厚と同スケールの約 5cm であったと推測される。水の華を引き起こす藍藻類の浮遊特性を考慮すれば、この薄い取水層厚は極めて有効であると考えられる。

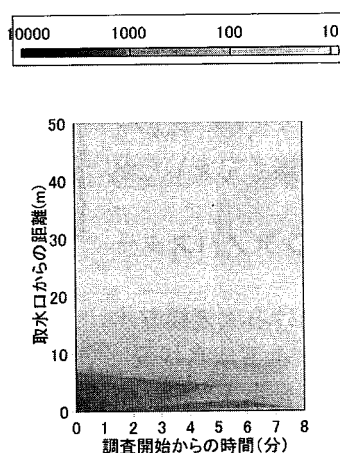


図 1 シアノバスターによる水の華の取水状況 (SS:mg/L)

システムの取水量は $0.5\text{m}^3/\text{min}$ である。隔離水域は幅 10m 、長さ 50m である。

実験開始時には朝から継続して吹いていた北風により、無風状態では全面的に発生していた藍藻類が風下側5mに集積していた。なお、実験前日に周辺水域の水の華を吹送流を利用して隔離水域内に収集しておいた。

(2) 施設規模と対象面積との関係

現地実験で得られた効果に基づき、シアノバスターの処理効率と施設規模に関する解析を行った。現地における藍藻類の動態を、シアノバスターによる処理を含めて最も単純化すれば、下式の通り記述できる。

$$\frac{dC}{dt} = C \left(\mu - \frac{Q_P}{A \cdot D} \right) \quad (1)$$



写真2 シアノバスターによる浮遊藍藻類の取水状況（左、取水開始時 2003 年 8 月 1 日 10:35；右、取水完了時 2003 年 8 月 1 日 11:35）左側が下流部であり、フェンス中央のシアノゲートより取水している。8 月 1 日における主要藍藻類は、水の華の主要構成種である *Microcystis aeruginosa* であった。

ここで、 C : 藍藻類の現存量 ($\mu\text{g}^{-\text{Chla}}\text{L}^{-1}$)、 μ : 藍藻類の *in situ* での増加速度 (d^{-1})、 Q_p : 装置の取水量 (m^3d^{-1})、 A : 処理面積 (m^2)、 D : 取水水深 (m) である。シアノバスターの適用方法としては①水の華の発生の前から稼動し、水の華が発生しないように稼動する場合と、②発生した水の華を除去する2つの方法が考えられる。ここでは①の条件について簡易に解析する。先に述べた実験結果より $D=0.05\text{m}$ を用い、水の華を引き起こす大群体性の藍藻類の増殖速度を一般値として $\mu=0.3(\text{d}^{-1})$ を仮定すれば、式(1)が負となる条件すなわち装置の稼動により藍藻類が増殖しない条件は式(2)で表すことができる。ただし、式(2)での Q_p の単位は m^3/min である。

$$Q_p > 1/96,000 \cdot A \quad \text{KKKKKKKKK (2)}$$

例えば $1\text{m}^3/\text{min}$ のシステムであれば約 $100,000\text{m}^2$ 弱を処理対象水域とすることが可能であると考えられる。ただし、実際には水面に浮遊した藍藻類による光障害条件が無くなれば、他種の増殖も生じやすいこと等を考慮すれば、対象面積はもっと大きい可能性もある。更に先の②の方法においては、初期値および処理の目標濃度、処理時間等によっても施設規模は変わりうる。今後はこれらの要素も考慮した解析が必要である。

3.2 大規模貯水池におけるシアノバスターの効果

写真2に、2003年度夏期における大規模貯水池に設置されたシアノゲートによる取水状況を示す。ガス胞によって浮遊した藍藻類が、水面付近数 cm の吹送流の卓越する層の中で、風下側に移動する様子と、これをシアノゲートが取水している状況(写真2(左))がわかる。写真(右)は約2時間弱の取水で、対象水域の浮遊した藍藻類の取水がほぼ完了した状況である。本調査時における約 10000m^2 の水の華の取水は、約2時間で終了した。

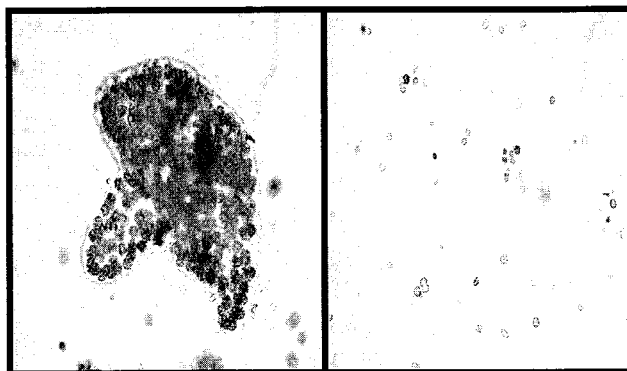


写真3 シアノバスターによる群体破壊状況
(左: 処理前, 右: 0.7MPa 瞬時処理後)

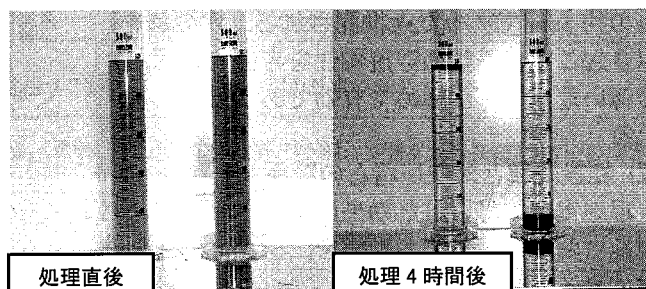


写真4 シアノバスターによる沈降状況
(左容器: 無処理, 右容器: 0.7MPa 瞬時処理)

なお、本貯水池においては、昨年度まで発生していた藍藻類による水の華は、シアノバスターを継続的に運用した今年度は発生量が低下したことから、シアノバスターによる広域的な水環境の改善効果が推測されている。

4. 処理による藍藻類への作用と水質改善効果(噴射衝撃原理を利用したバスターマシンの水環境への影響)

4.1 藍藻類への作用

写真3, 4に、シアノバスター処理した *Microcystis* の顕微鏡写真および沈降状況を示す。写真よりわかるように、直接的な効果として群体破壊による単体化およびガス胞破壊による沈降が可能である。このような藍藻類への直接的な作用が、現地においてどのような水質あるいは環境改善効果を生じるかについて、以下の実験を行った。

4.2 現地実験の概要

Microcystis による水の華が発生している埼玉県内の富栄養化した調節池において、シアノバスターで処理を行った湖水を現地に設けた隔離水域($d=2m$)に貯留し、透明度や各種水質項目を分析するとともに、植物および動物プランクトンの追跡調査を行った。現地観測項目については毎日調査を行い、室内分析項目については処理直後と処理10日後の2回実施した。

4.3 処理後における水質の時系列変化状況

図2に処理区における処理直後から10日後までの現地観測項目の時系列変化を示す。また、処理直後と10日後の水質状況を比較して図3に示す。

処理直後は透明度が20cm程度と極めて小さく、*Microcystis* の細胞数やChl-a, SS, T-P等の値も非常に高いものであった。これは、バスターマシンによる処理効果が、短期的には藍藻類の群体構造の破壊と細胞内ガス胞の破壊のみであるためである。ただし、処理前はきわめて濃縮された水の華状態であり透明度は0mであったことを考えれば、処理直後においても若干の透明度改善効果があったと言えよう。さらに、データとしては取得されていないが、見た目の水色は著しく透明感が増すことを付記する。

一方処理後は徐々に透明度は増加し、10日後には約1mに達した(図2)。また、*Microcystis* の細胞数やChl-a, SS, T-P等はいずれも処理直後の1%前後の値となっており、水中の懸濁物質や栄養塩が10日間で著しく減少したことを示している。これは、水質項目としてのSSやリンの殆どに相当する *Microcystis* そのものが沈降したことによって、顕著な水質変化が生じた現象を表していると考えられる。

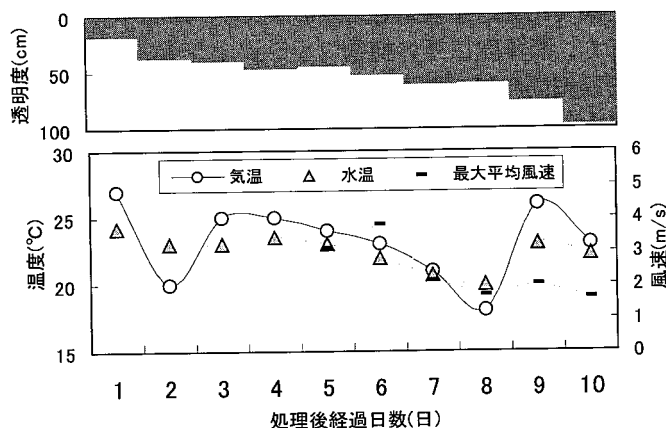


図2 シアノバスター処理後の隔離水界内水質の時系列変化

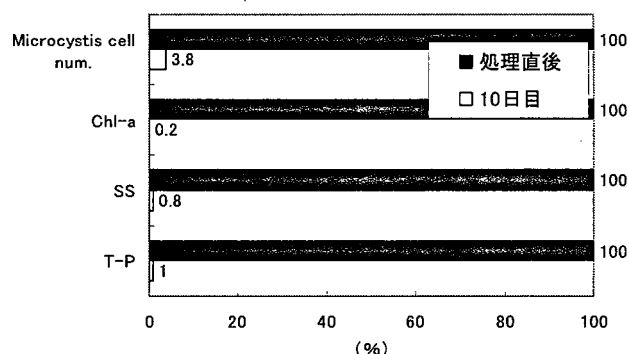


図3 隔離水界内水質の処理直後と10日の水質の比較
処理直後の分析値は *Mic.* 細胞数, 1.2×10^7 (cells/mL); Chl-a, 14,000(ug/L); SS, 2,340(mg/L); T-P, 13.8(mg/L)である。

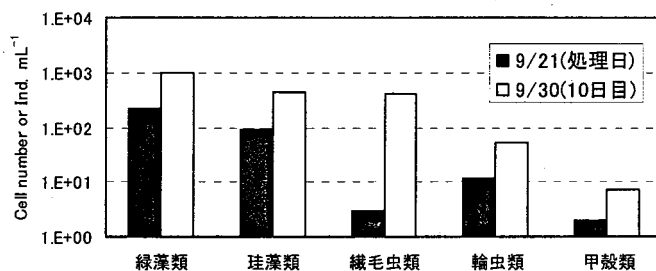


図4 シアノバスター処理後の隔離水界内プランクトンの時系列変化。
(各プランクトンの主要構成種は以下の通りであった。緑藻類: *Chlorococcum* sp., *Scenedesmus quadricauda*, 珪藻類: *Stephanodiscus* sp., *Cyclotella bodanica*, 繊毛虫類: *Holophrya* sp., 輪虫類: *Gastropus minor*, *Brachionus calyciflorus*, 甲殻類: *Bosmina longirostris*, *Cyclops*)

なお、透明度の変化を沈降した粒子の存在上限位置と仮定すれば、沈降速度はおおむね $O(10^{-1})$ ($m d^{-1}$)となる。群体破壊による *Microcystis* の粒子サイズの低下を考慮すれば、この沈降速度は単体の *Microcystis* の沈降速度(Reynolds 1984)として評価できる。

ところで、実験は9月21日から30日という気温低下期に実施されたために、表面水温の低下に伴う鉛直混合と、これによる沈降阻害が懸念される。しかしながら、図2に示すように気温および表層水温の低下が生じながらも、処理後の水質変化に対しては沈降作用が支配的であった結果が得られたことになる。したがって、本対策手法は、安定成層が形成されやすい受熱期だけでなく、放熱期においても有効であると考えられる。

4.4 シアノバスターシステムによる水界生態系への影響

図4に処理直後および10日後の、隔離水界における植物および動物プランクトンの現存量データを示す。藍藻類以外の植物プランクトンおよび各種動物プランクトンが全て増加していることがわかる。実験期間中は、隔離水界と外部との水の交換はほとんど無かったことから、これらの変化は各プランクトンの増殖に起因すると考えられる。緑藻類と珪藻類の変化を増殖速度に換算すると $O(0.1)$ (d^{-1})であることから、藍藻類以外の植物プランクトンの変化を増殖と解釈することは可能である。ただし、各動物プランクトンは増加量が植物プランクトンよりも大きく、この増加を個体群の増加のみで説明することは難しい。しかしながら、バスターマシン処理後において、各動物プランクトン個体群が明らかに増加することはこのデータより評価できる。

5. 考察および課題

水の華現象の発生機構の一つは水面に浮遊することである。この特性は他の藻類への光阻害を引き起こすだけでなく景観障害の原因ともなるやっかいな性質である。しかしながら処理の観点から言えば、自ら水面に浮遊し更に吹送流により風下に集積するということは効率よい取水を可能にする性質であるとも言える。シアノバスターシステムはこのような水の華の原因となる藍藻類の特性を逆に利用するものである。実際の対策の適用にあたっては、風向や水の華の集積特性を配慮して、システム規模や設置位置を検討する必要があると考えられる。

バスターマシンの効果としては、水の華を沈降させることによる直接的かつ短期的な効果として、景観障害や悪臭の改善が期待されることに加え、藍藻類を減少させた結果として、発生植物プランクトンの無害な藻類へのシフトや水界生態系の長期的、間接的な改善効果が期待される。今後はより長期的な変化として、沈水植物群落の復活等の生態系修復効果を検討する必要がある。また、実際の適用にあたっては負の効果についても把握しておく必要がある。バスターマシンの処理による *Microcystis* の分解が、無処理に比べて増加しないことは実験的に確かめられている(大塚ほか 2002)が、ミクロキスチン等の藍藻毒素が短期的にせよ処理によって水中に放出される可能性等についても検討しておく必要がある。

【参考文献】

- 古里栄一、松宏典、田畑隆一郎、浅枝隆、須藤隆一、井芹寧(2003)浅い水域における水の華抑制手法(シアノバスター)の水環境改善効果、第37回日本水環境学会年会講演集
- 井芹寧、横山保夫、Elixat Rahim(2000)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, p78
- 岡田光正、須藤隆一、合場修一(1981)水の華の形成と消滅のシミュレーション、国立公害研究所報告 第25号, pp83-123
- 大塚信・藤野毅・浅枝隆・古里栄一(2002)加圧・対抗衝突によるミクロキスティス除去に関する現地実験、第36回日本水環境学会年会講演集, p141
- Reynolds, C. S.(1984), The ecology of freshwater phytoplankton, Cambridge University Press, Cambridge
- Walsby, A.E. (1994) Gas vesicles, *Microbiol. Rev.*, 58, 94-144.