

閉鎖性水域における異常発生藻類の制御技術

井 芹 寧 ・ 森 雅 佳 ・ 松 岡 陽 子

閉鎖性水域における異常発生藻類の制御技術*

井 芹 寧^{・・・} 森 雅 佳[・] 松 岡 陽 子^{・・・}

1 藻類の異常発生について

海域の赤潮，陸水域の淡水赤潮及びアオコと呼ばれている現象は，何れも藻類の異常発生が原因となったものである。

藻類の異常発生は栄養塩の供給が基本となるが，化学的，物理的及び生物的要因が複雑に絡んでいることが多い（表1）。

表1 藻類増殖要因

分類	藻類増殖要因
化学	・増殖制限栄養塩・栄養塩比・pH・炭酸 ・酸化還元電位・微量元素・ビタミン・キレート物質 ・塩分濃度 その他
物理	・水温・交換率・日射・水温躍層・流動 その他
生物	・競合藻類・動物プランクトン・ビタミン等供給細菌類 ・溶藻細菌・魚類・種場・水生植物・移動性・ウイルス その他
総合	・栄養塩供給機構 その他

藻類異常発生対策を策定するにあたり最も留意しなければならないことは，その発生要因を可能な限り明確にした上，その主要要因に対する効率的な対策法を検討することである。また，発生種の生理的，生態的特質についても十分理解しなければならない。

本報は，実用的な閉鎖性水域の藻類制御対策が試みられているダム湖の例を中心に，筆者らが検討してきた手法及び今後期待される新規技術も加え，その概要を取りまとめたものである。

2 循環・流動制御による藻類制御手法

循環・流動制御による異常発生藻類制御技術のシステム概念図を図1に示す。その概要は次に示すとおりである。

2.1 一般的手法

(1) 全層・浅層曝気循環

気泡の上昇時に生じる流れを利用し，鉛直混合流を引き起こす手法である。曝気を行う水深の違いにより，全層曝気循環と浅層曝気循環に大別される。

全層曝気循環としては間欠式空気揚水筒¹⁾が主流である。逆サイホンの原理を用いて砲弾状の気泡を形成させ，間欠的に円筒内を上昇させる。気泡

上昇時に生じる流れにより，底層水を吸引し水面へ導く。中小規模のダム貯水池において，異臭味対策としての適用例が多い。

その作用は 藻類を暗所に送り込み，藍藻類などの暗所で増殖しにくい種類を抑制する，表層の水温，pHを低下させる，底層の無酸素化を防止して，リンなどの栄養塩溶出を防ぐ等で，藻類の増殖を制御する。

浅層曝気は散気管法²⁾が主流で，一定の水深で散気管により連続的に曝気を行い，大小の気泡の上昇に伴い連行される水の流れて，鉛直混合層を形成する。鉛直混合層では水温が均一化し，曝気水深下部に水温躍層が形成される。散気管の水深を変え，躍層の位置をコントロールすることで，通常湖水より水温が低く密度の高い流入河川水（高栄養塩を含む）を生産層より下層へ送り込み，栄養塩の供給を断つことで，藻類の増殖を制御する。底層部近くに曝気位置を設定すれば全層曝気循環が可能である。

この他，水面のドーナツ状の施設から外周方向に水流を起こし，湧昇流を発生させるタイプ³⁾，底層水を水面まで引き上げ放流するタイプ，太陽光発電により表層水を中層付近まで引き込むタイプ等多くの方式が考案されている。

全層・浅層曝気循環はアオコを形成する藍藻類に対しては，循環を効果的に起こすことができれば非常に有効な手法である。しかしながら渦鞭毛藻の淡水赤潮に対しては，藍藻と比較すると明確な効果が得られないためか研究例は少ない。水中ミキサーで淡水赤潮の処理を実験的に実施し効果を確認したケースが報告されている⁴⁾。

数年前，筆者らがフィールドとする九州地区で，曝気循環対策が稼働しているダム湖も含めて，例年になくアオコ（*Microcystis*）の発生が顕著となった。曝気循環は他の方式と比較して設計基準もしっかりしており，予測シミュレーションに関し時期には，予測に反してアオコの発生に至った段階でも概ね確立されている。しかしながら，この

* Suppression Algal Bloom in Enclosed Coastal Sea and Reservoir.

** Yasushi ISERI 西日本技術開発（株）環境部水域環境グループリーダー，***Masayoshi MORI ,Youko MATSUYOKA 同環境部

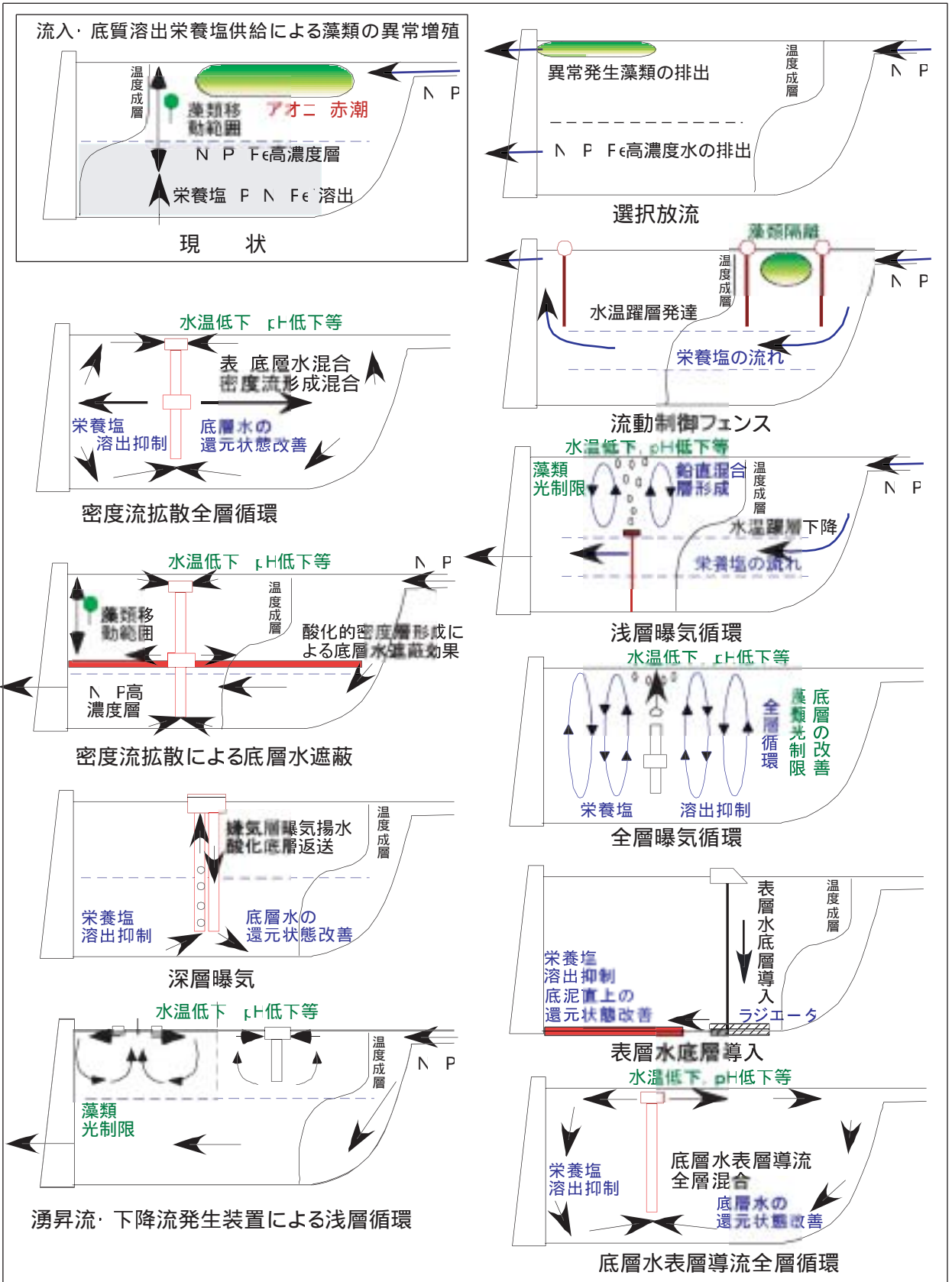


図1 曝気循環・流動制御システムの概略図

時期には、予測に反してアオコの発生に至ったダム湖も少なくない。曝気循環法は設置事例が多いが、対策後の効果の長期的検証が行われている例は少なく、検証が行われていたとしてもそのダム湖のみの単独の検証となっている。今後は、全国の対策が実施されているダム湖の統一的なモニタリングの実施もしくはモニタリング結果の評価を行い、より完全な設計基準及び予測シミュレーションモデルを確立することが望まれる。また、地球温暖化による影響も無視できない段階にきており、長期的な気象変動による藻類相への影響も踏まえて見直しを行う必要があるかもしれない。

(2) 深層曝気

深層曝気施設は湖面に設置した水槽とそこから底層まで延びた円筒2本からなる。一方の円筒の底部で曝気を行い、嫌氣的条件である底層水を水面まで揚水し、D Oの供給を行った後、底層に還流する。躍層を壊さず底層の還元的環境を改善するのが目的で、硫化水素による異臭味障害、鉄・マンガン溶出による赤水・黒水障害の軽減に有効である。また、底層からのリン、鉄成分の溶出防止作用により藻類の増殖制御効果も期待できる。

設備と運転に比較的多くの費用を要するので適用事例は少ないが、浅層曝気循環において底層部のD O低下の進行が生じる恐れがある場合、本法と併用することが望ましい。

(3) 選択放流

表層放流は、藻類の生産層である表層水の放流により藻類を系外に排出したり、高水温層を排出して表層の水温を低下させ、藻類の増殖を抑制する。下層放流は藻類の増殖を引き起こす高栄養塩含有底層水を排出する目的で実施する。

Peridinium や *Micorocystis* 等の表層集積性の高い藻類は、風により形成される吹送流の影響を受け、分布が大きく変動する。ダムサイト側へ吹送流が形成される条件では、放水口付近にこれらの藻類が高密度で集積することがある。この時点で表層放流を実施すると、効率的な藻類の排出除去が可能である。筆者の観察では数十万 m^2 に発生した淡水赤潮が数時間で消失した事例もある。

表層、下層放流とも、下流水域への影響を十分予測評価した上で実施しなければならない。また、

効率的な対策のためには水位変動に追従する選択取水設備が必要となる。

2.2 今後期待される手法

(1) 密度流拡散装置

海域では間欠式空気揚水筒が港湾水域、養殖筏設置水域で適用され、流動促進やD O供給作用等により水質改善につながっているが、十数万 m^2 レベルの小水域の改善に止まっている。

内湾などの広範囲の閉鎖性水域に対しては、表層水と底層水を混合して中層から排出し、密度流の性質を利用し、広範囲に循環を引き起こす密度流拡散装置が検討されている⁵⁾。

鉛直移動を行う藻類が優占している水域では躍層付近が藻類に対する栄養塩供給層となっているケースがある⁶⁾。この場合、密度流拡散装置の表・底層水の混合割合を変え、密度流の生じる水深を調整することで、リンや鉄などの栄養塩を含んだ嫌気層の上部に酸素含有密度流による遮蔽を行う対策が提案できる。閉鎖性水域で底質からの栄養塩供給が藻類異常発生の主要要因である場合には、有効な対策の一つとなる可能性がある。

(2) 微細気泡曝気

嫌氣的状態を改善するために曝気を行う場合には、形成される気泡が小さいほど酸素の溶解効率が高い。近年、各種の微細気泡発生装置が考案されている。その方式としては、加圧型もしくは剪断型が主流である。剪断型の気泡発生状況を写真1に示す。



写真1 微細気泡発生状況
(大きな気泡の周囲で広く白色を呈しているのが微細気泡)

底層嫌気層を効率的に改善するためには、水温成層を壊さずに微細気泡で酸素を供給し、水平流動装置により広範囲に高酸素含有水を送り込む方式が考えられる。浅水深水域における対策例を図2に示す。

* Suppression Algal Bloom in Enclosed Coastal Sea and Reservoir.

** Yasushi ISERI 西日本技術開発(株)環境部水域環境グループリーダー、***Masayoshi MORI, Youko MATSUYOKA 同環境部

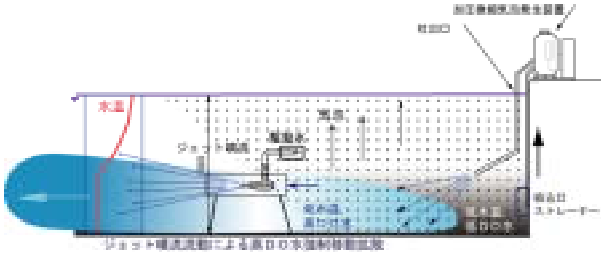


図2 微細気泡と水平流動による対策例

(3) 流動制御フェンス⁷⁾

貯水池の横断方向に不透水性のフェンスを2～3ヶ所に設置して生産層の分画を行うとともに、流入水による物理的攪乱を軽減することでフェンス下流側の水温躍層を発達させ、相対的に低温で高密度の流入水を下層へ導くシステムである。分画水深は生産層を考慮して、5～10m水深のものが適用されている。

流動制御フェンスの水質改善効果は、栄養塩供給源となる流入水の流動制御効果と、ダム湖生産層の分画効果で成り立っている。

流入水流動制御効果としては、流入水潜り込み水深の拡大による藻類に対する栄養塩供給の抑制であり、生産層分画効果としては、増殖に適した上流部への藻類の移動・集積の抑制、上流部で増殖した藻類の下流域への移動・拡散抑制、表層の藻類および懸濁態栄養塩の沈降促進があげられる。以上の効果が総合的に働くことで、貯水池の藻類生産量を低下させ、水質を改善する。表水層の拡大を促進させて、栄養塩を有光層（生産層）に再浮上させないためには、下部取水との併用が効果的であると考えられる。

筆者らは、フェンス設置後にフェンス下流側の水域において、設置前と比較して全リン濃度が1/2、クロロフィルa濃度が1/5に改善されることを確認した。また、*Peridinium*の水平移動を制限する手法で、淡水赤潮発生の抑制を実施した事例が報告されている⁸⁾。

筆者らの観測では、流動制御フェンスの保護作用により躍層が発達し、フェンス間（フェンス下流）でより強い成層が形成され、定常的に上流側にフェンスがふくらむ状態となる。この時点で、流入水の流れを、フェンス下流側の水塊全体でブロックするようになり、良好な流入水制御が可能と考えられる（写真2）。



写真2 流入水制御状況

水温成層の形成が弱くフェンスが下流側にたわんだ状態で、出水等の流量増加があった場合、フェンス下流側において表層までの混合流が生じやすい。このような条件では、流動制御機能はほとんど期待できない。フェンス下流側の水温成層を十分に発達させることがポイントと考えられる。

本法は、電気代などの運転費用を要しないため、他の手法より経済的であり、各地のダム湖に設置するケースが増えてきている。しかしながら、十分な検討がなされないまま適用され、良好な結果を得られないケースもみうけられるようになった。

流動制御フェンス法は、ここ数年で急速に設置例が増えてきた技術であり、その水質改善機構はまだ完全には解明されていない段階である。発展途上の技術であることを認識し、成功例と失敗例のモニタリングデータを比較検討するとともに詳細な湖水流動調査を実施して、本法の条件別の水質改善機構を明確にすることが必要である。その上、設計基準及び汎用性のある予測シミュレーションモデルを確立することが急務と考えられる。

なお、本法はフェンス間に藻類の発生を封じ込める機能を有するため（図3）、回収、遮光などの手法と組み合わせると効率的な水質改善が可能である。筆者らは、表層に分布する藻類を一方に効率的に導流するユニットも開発している。

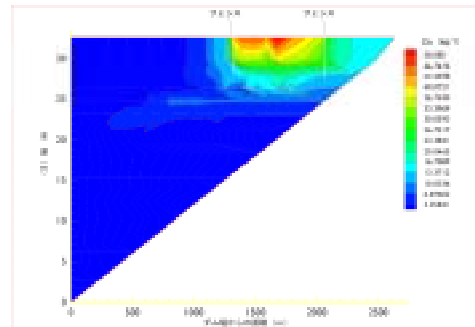


図3 フェンス間に制御された藻類（クロロフィルaシミュレーション結果）

(4) 表層水底層導入⁹⁾

DOを多量に含んだ表層水を底層に導水し底泥直上水を改善する技術である。

従来、表層水を底層に導水する手法はいくつか試みられていたが、密度の関係で底層に導入した表層水は上昇流となり、底泥に直接影響を及ぼすことはなかった。本方式では、導流した表層水を湖底に設置したラジエータで冷却した後、ディフューザーから少量ずつ放出する。この方式により、DOを含んだ表層水が底泥直上を水平方向に広がって行くようになり、底泥からの栄養塩溶出等に直接効果を発揮することができる。

本法は比較的少ない導水量で効果が期待できるので、越波や太陽光発電などの自然エネルギーを用いたシステム化が期待される。

(5) 潮汐流動制御¹⁰⁾

潮汐は半日周期で流れの向きが反転する往復流場を形成していることから、流向により形状抵抗の特性が異なる非対称ブロックを海底に設置すると、一潮汐間を通じて定常的に存在する平均流に相当する“潮汐残差流”を生成することが可能となる。この、潮汐残差流を利用し、港湾等の閉鎖性水域の外海との海水交換を促進する(図4)。

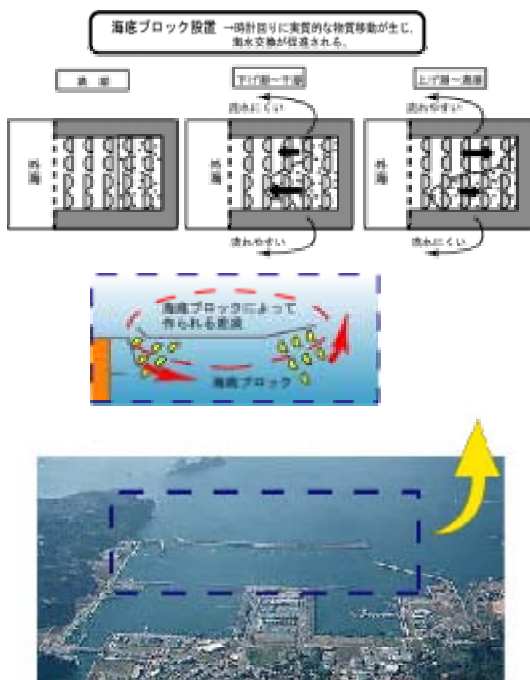


図4 海底ブロックによる海水交換¹⁰⁾

3 藻類直接制御法

3.1 一般的手法

(1) ろ過回収

藻類のろ過除去対策法は、回転ドラムろ過法の適用例が多い。回転ドラムろ過法は、プランクトンネット、長毛、微細毛ろ布等をろ材とし、これらを回転ドラムろ過器に取り付け連続的にろ過を行うものである。

この他、砂層に湖水を導流し処理する砂ろ過、珪藻土等でろ過層をあらかじめ形成させ、ろ過処理を行うプリコートろ過法、カートリッジろ過、マイクロストレーナー等多くの手法がある。何れも、ろ過法は回収した藻類の処理が問題となる。肥料化、飼料化、油化等が試みられているものの費用を要するため、産業廃棄物として処理されているケースが多い。回収は水面から高密度で藻類を吸引する必要がある。油回収の技術を応用し水面に渦流を発生させ、広範囲の藻類を吸引するシステムが考案されている¹¹⁾。

(2) 水耕生物ろ過

湖水をくみ上げ水生植物が生育する施設に導入する。施設はコンクリート槽に土壌を入れずに、直接植物を繁茂させたもので、原水は植物の根圏のろ過作用、食物連鎖浄化作用及び栄養塩吸収作用等により浄化される。植物は有用な野菜、花などを中心に植え付けられ、周辺住民が収穫し系外に取り除かれる。汚泥は肥料として利用される。

このように、住民活動を組み入れることで、維持管理の経費が削減され、継続的なシステムとして機能している。また、環境学習の場としても有用に活用されている。海外への展開も積極的に図られている¹²⁾。

施設が老朽化してくると(特に啓発用設備など)、清潔感の低下から住民離れにつながるので、これらの設備に関しても住民活動を取り入れて管理していくことが望ましい。

微生物を利用した手法として、生物膜を形成させたハニカム構造の担体を設置した処理槽に導水し、生物補食や分解を期待した方法も試みられている。

(3) 浮上分離

藻類を含んだ湖水にPACなどの凝集剤を加え、藻類を凝集させた後、微細気泡を吹き込み、泡の

* Suppression Algal Bloom in Enclosed Coastal Sea and Reservoir.

** Yasushi ISERI 西日本技術開発(株)環境部水域環境グループリーダー、***Masayoshi MORI, Youko MATSUYOKA 同環境部

浮力の作用を利用し藻類を浮上分離するシステムである。

(4) 紫外線処理

筆者らは、ダム湖の淡水赤潮 (*Peridinium bipes*) の除去対策の検討にあたり、従来のろ過や加圧浮上分離法では処理量が少なく ($50\text{m}^3/\text{h}$ 程度)、ダム湖において広範囲に発生する淡水赤潮の処理には適用が困難という判断から、処理量が期待できる紫外線法による赤潮処理システムの検討を行った。

紫外線法は処理直後に完全に殺藻するレベルを要求すると、多くの照射量を必要とする。そこで、分裂増殖の抑制を目的とし、その作用に必要な最少の紫外線照射必要量を室内実験により評価した (図5)。

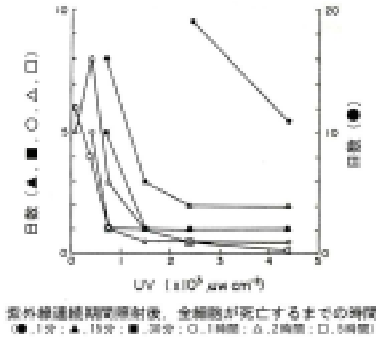


図5 紫外線の *Peridinium bipes* の処理効果

このデータに基づき設計を行い、紫外線出力30Wの紫外線ランプを40本取り付け付けた淡水赤潮処理船を開発した¹³⁾。本船の特徴は、船内に設置した濁度計を用いて赤潮密度を推定し、瞬時に赤潮増殖抑制に最適な紫外線照射量をCPUで計算し、インバータを通じて水中モーターの回転数 (処理管内流速) を制御ことで最も効率的な処理が行えるよう条件を自動設定することである。このシステムにより、最大処理水量 $800\text{m}^3/\text{h}$ の処理が可能である。

藻類異常発生の制御を目的として硫酸銅散布は水道水源ダム等で一般的に実施されている。また、海域においては過酸化水素水などの殺藻剤の散布、凝集剤としての粘土散布が試みられている。

3.2 今後期待される手法

(1) 凝集泡沫分離

凝集泡沫分離は凝集剤により藻類を凝集させ、カゼイン等を用いてフロック表面を疎水化させた

後、気泡を供給することで浮上分離・回収する技術である。丸山らの海産魚介類蓄養のための飼育水浄化に関する研究によると、魚から分泌されるタンパク質である体表面粘質物質が残餌や排泄物などの懸濁物を気泡に吸着させる捕集材としての役割を果たすことが報告されている。また、連続的に気泡を供給すると、供給される気泡で水面上に懸濁物濃縮したタンパク質特有の壊れにくい泡 (安定泡沫) が形成されることを見出し、凝集剤と乳製カゼインを併用し同様な効果のあるシステムとして完成させている。凝集泡沫分離により、海域の赤潮で99%以上、淡水赤潮でオゾン前処理と組み合わせ、90%の処理が可能である¹⁴⁾。

(2) 遮光

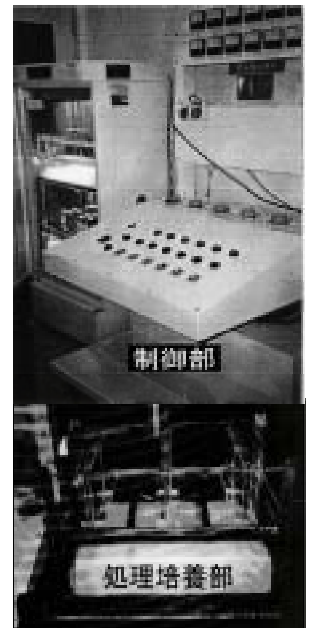
従来より、貯水槽等における藻類の発生を抑制する方法として、水面に光が到達しないように密閉遮光する方法が行われてきた。湖沼や貯水池では樹脂製の浮遊板を水面に浮かべ、水中に光が到達しないようにしたシステムが考案され、全水面の30~60%を覆うことにより、藻類の異常増殖が抑制されることが報告されている¹⁵⁾。また、水温を低下させる作用もアオコ増殖抑制には有効である。

(3) 電界、磁界による制御¹⁶⁾

電磁界による植物の生長制御は旧ソビエト連邦を中心に研究が進み、作物などの生長促進作用が報告されている。また、パルスや電解水を用いた殺菌など医療や食品分野で実用化がなされている技術を水域の微生物制御に応用できる可能性もある。

筆者らは異常発生藻類に対する、直接的電界及び磁界処理並びに電気的処理水による増殖抑制効果の確認実験を実施した。処理実験装置写真3に示す。

写真3 電・磁界処理装置



磁界,電界処理により淡水赤潮の *Peridinium bipes* に関しては, 500V/cmの強度で10分~60分間電界処理において約30~50%, 500~1000Gの連続磁界処理で約45~50%の除去率が得られた(図6)。

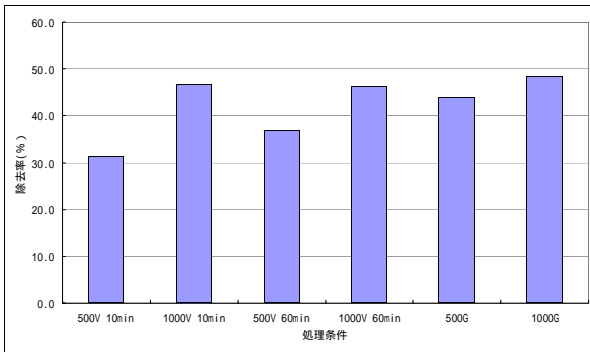


図6 電氣的処理実験結果

この他 *Ceratium hirundinella*, *Phormidium* sp. で同レベルの増殖抑制効果が確認された。

本手法については, 詳細の作用機構がほとんど明確にされていないが, 処理時に細胞内に微弱な電流が発生すること, イオン類を利用した細胞生理機構に影響を及ぼすこと等が増殖抑制効果として反映されているものと予想される。

今後は実用化を目指したデータの収集することが必要である。

(4) 電氣的処理水を用いた処理

藻類にとって炭素は光合成の原料に不可欠な栄養塩である。水中の炭素は大気からの供給や水中・底泥の有機物の分解により溶存二酸化炭素及び炭酸イオンとしてとけ込んでいるため, 通常は不足することはない。アオコが発生する水域では, その光合成の作用により, アルカリ性側に pH が移行する。アルカリ条件が強くなると, 炭酸イオンが重炭酸イオンに形態が変化する。*Microcystis* は重炭酸イオンを利用できるが, 他の多くの藻類は利用できないため, *Microcystis* の特異的増殖につながりアオコの形成に至る。

筆者らは, 電氣的処理水である酸性イオン水を用いて, pH を酸性~中性に調整することによるアオコの制御実験を行った。実験にあたってはろ過湖水を直接酸性イオン水生成装置を用いて7.5~120分間処理し, pH の調整を行い, 湖水より得られたアオコ (*Microcystis aeruginosa*) を約15,000 cells/ml になるように接種し培養を行った。培養

後のアオコ細胞数の変化及び pH の変化を図7に示す。

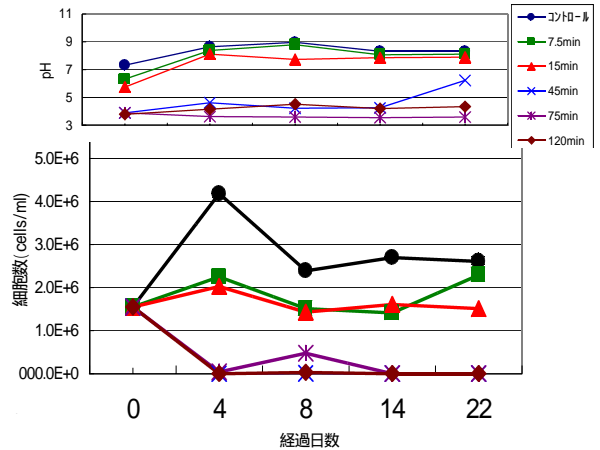


図7 pH制御実験結果

コントロールについては, アオコは4日後に400万 cells/ml に達し, その後は, 250万 cells/ml 前後で安定している。これに対し, 当初の pH を5.5~6.5 に調整した系(7.5~15分処理)では, 4割程度現存量が抑制され, pH を4に調整した系(45~120分処理)では, 数日でほぼ細胞が消滅している。

水質は処理により SO_4^{2-} , NO_3^- 等陰イオンの増加, Ca^{2+} , NH_4^+ 等の陽イオンの減少が示している。

別途, 酸性イオン水をアオコ含有湖水に添加した実験を行ったところ, pH がアルカリ側で推移するのにかかわらず, アオコの制御効果が認められており, pH にあわせ水質組成の変化がアオコ増殖に影響を与えていることが推察される。

(5) 微生物的手法

沿岸海域において, しばしば急速に赤潮が消滅する事例が観察されているが¹⁷⁾, *H. akashiwo* や *G. mikimotoi* が大増殖した海水中にはこれらに特異的に作用する殺藻細菌やウイルス等が多く存在することが報告されており¹⁸⁾, 急激な赤潮の消滅は殺藻微生物によると考えられている^{5) 6)}。近年これらの細菌やウイルス等の微生物を利用した赤潮対策の研究が精力的に行われている。その主な手法は細菌による溶藻(殺藻細菌)¹⁹⁾, 細菌の生成する殺藻物質による死滅, ウイルスによる溶藻²⁰⁾であり, 殺藻微生物を活用する方法は, 特異性が高く他の生物に対して及ぼす影響が少ない。そのため, 環境

* Suppression Algal Bloom in Enclosed Coastal Sea and Reservoir.

** Yasushi ISERI 西日本技術開発(株)環境部水域環境グループリーダー, ***Masayoshi MORI, Youko MATSUYOKA 同環境部

に優しい生物的防除として期待されている。殺藻微生物は微細藻への接触によって溶藻する *Glidin bacteria* 群や粘菌類と、細胞外に致死物質を産出して殺藻する *Eubacteria* 群、ウイルスによる溶藻に大別される。近年、数多くの殺藻細菌が各地の沿岸海域から分離され、殺藻細菌が海水中に広く普通に生息していることが明らかとなった。アオコ (*Microcystis*) に関しては *Pseudomonas* の一種が溶藻作用を有し、*Sphingomonas* がアオコの毒素 (Microcystin) を分解する作用があることが明らかになっている²¹⁾。

しかしこれの生物については、詳細な殺滅機構が十分に解明されておらず不明な点が多い。また対象赤潮に対する選択性が高い反面、効率的な対策としては欠点にもなりやすく、実用化には多くの問題が残されている。

4 種場処理

4.1 天日乾燥⁵⁾

筆者らは、アオコ (*Microcystis*) が定常的に発生するダム湖において、冬季に水位を低下させ、底泥を数ヶ月間乾燥させる天日乾燥処理を実施した。その結果、ろ過湖水に底泥を分取してアオコの発生条件 (3000Lux, 24hr明, 25℃) で培養を行うと、天日乾燥の前の底質については、数日でアオコの形成が観察されたが、天日乾燥後の底質については、ほとんどアオコが出現しないことを確認した。一方、アオコの競合種の一つであるホシガタケイソウ (*Asterionella formosa*) はほとんど天日乾燥の影響を受けないことも明らかとなった (図8)。

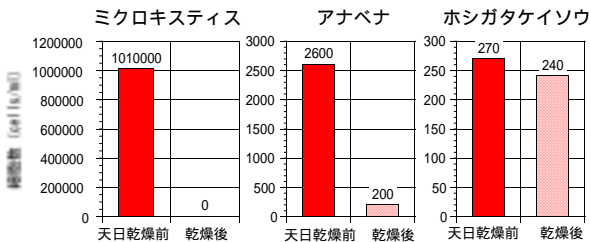


図8 天日乾燥によるアオコ発芽抑制効果

地点 条件	中間			ダムサイト		
	天日 乾燥前 (mg/m ²)	天日 乾燥後 (mg/m ²)	減少 率 (%)	天日 乾燥前 (mg/m ²)	天日 乾燥後 (mg/m ²)	減少 率 (%)
全窒素	194	22.7	88	312	22.7	93
全リン	14.8	3.78	74	18.4	3.46	81

表2 天日乾燥による溶出量の変化

対象ダム湖では、天日乾燥処理を開始した年から、数年にわたり、夏季の優占種が従来の藍藻類 (*Microcystis*) から緑藻類 (*Gonatozygon*, *Mougeotia* 等) へ遷移し、アオコの発生が抑制された。

また、底質からの栄養塩溶出試験 (水温22℃, 嫌気的条件) を行ったところ、全窒素、全リンの溶出量が天日乾燥後に74~93%減少することが確認された。(表2)。

これらの効果は、水位低下時の波や降雨による底泥洗い流し作用、日光中の紫外線による殺藻作用、温度変化による殺藻作用 (日温度変化, 凍結)、土壌粒子の団粒化、酸化作用によるリンの不活性化、有機物の好氣的分解作用、底生生物、土壌微生物相の変化による作用等が総合的に作用することにより生じたものと考えられる。

4.2 種場直接処理

底泥を揚泥して酸化処理等を行った上、覆砂材として再利用する方法 (後述) を用い、オゾン処理等によりシストを不活性化する方法が考えられる。

5 生態系に着目した対策

(1) バイオマニピュレーション²²⁾

生物間の相互作用を利用して水質浄化を行う手法で、バランスの取れた生態系を維持することで、単一藻類の異常増殖を抑制する。通常、食物連鎖の一部を人為的に操作するため、バイオマニピュレーションと呼ばれている。

問題となる藻類を直接処理する目的で殺藻剤処理等を行うと、他の藻類にも影響を及ぼし、生態系のバランスが崩れ、かえって特異的な藻類の増殖を引きおこす可能性がある。これに対し、藻類を捕食する動物プランクトンや、対象藻類の競争相手を増やす方策を施した方が、安定した藻類の増殖制御が可能である。

英国などではアオコ以外の藻類を増殖させる天然物質を水域に添加し、アオコを防除しようとする研究が試みられている。

ソウギョやコイなど直接アオコを捕食する魚類を投入してアオコの制御を試みた例もあるが、これらの魚類はアオコを消化することができず、かえって腸管内の高栄養や微量成分の暴露により、排出後のアオコの増殖促進につながる危険性がある。筆者は、ダム湖のアオコ発生初期において、

現地で魚類から排出されたとみられる長さ数cmのストロー状のアオコ群体を大量に確認した経験がある。ストロー状アオコと通常のアオコフロックを持ち帰り培養を行ったところ、ストロー状アオコの方がフロック状アオコの倍以上の期間増殖すること確認された。なお、ハクレン及びコクレンは咽頭歯によりアオコをすりつぶす作用があるので、一部の水域でアオコ制御の有効性が確認されている²³⁾。

また、アオコを捕食する大型のミジンコ類を増殖させたる床を用いてアオコを制御する試みがなされている²⁴⁾。

(2) 人工浮島

人工浮島はダム湖で失われた植生や生態系を修復・創造するために試みられている方法である。

基本的には水生植物の栄養塩吸収作用、水中部の根圏に生息する原生動物や動物プランクトンによる藻類の捕食作用等により水質浄化機能も有する。しかしながら、魚類により水中根の多くは食べ尽くされてしまうことが多く、水質浄化機能はほとんど望めないのが現実である。

そこで筆者らは、1cm程度の多重メッシュ構造を有する保護ネットで浮島下部をカバーし、根圏の保護、育成を試みた(写真4)。



写真4 多重メッシュ根圏保護ネットの例

その結果、設置半年後にはヨシやツルヨシの水中根が倍以上に伸張するなど根圏の発達を示され、トビケラ類の増殖も確認された(写真5)。

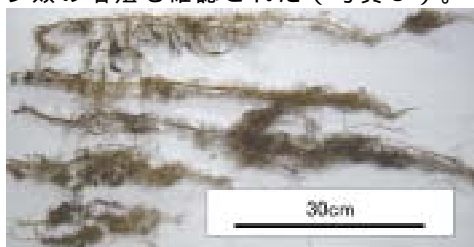
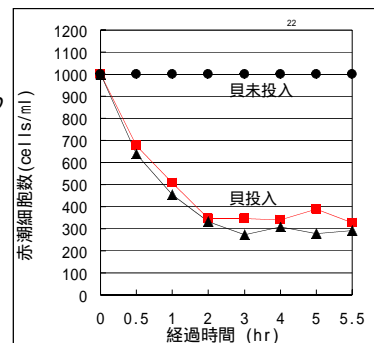


写真5 根圏保護ネットによる根圏の保護

多重ネット自体にも糸状の緑藻類が繁茂し(漁網と比較すると藻体が脱落しにくい)、人工浮島の水質浄化機能の向上に役立っているものと考えられる。

また筆者らは、ダム湖に生息するドブガイによる淡水赤潮(*Peridinium bipes*)捕食試験を実施した。約1000cells/mlの赤潮を含む1ℓ水槽に、ドブガイを1個体投入したところ10~22の温度条件において2時間で約70%の赤潮の除去が確認された(図9)。

図9 ドブガイによる*Peridinium bipes*の除去
(1L水槽、殻長5~7cmドブガイ1個体投入)



貝類などのろ過フイターを浮島で

繁殖させることにより、飛躍的に浮島の浄化機能を促進することが可能と考えられる。内湾では、イトゴカイ²⁵⁾やムラサキガイ、アサリ導入による水質改善が試みられている。

海域では大規模な浮島が必要となる、陸水域と異なり波浪に対する強度も考慮しなければならない、メガフロートの技術の転用も考えられる。関西空港の周辺では海域生態系の創生が認められており、積極的に水質改善機能、生態系健全化機能、漁業資源生産機能、温暖化抑制(二酸化炭素固定)機能を備えた浮島を建造するのの一案である。

(3) 干潟、浅場造成²⁶⁾

干潟の造成等総合的な環境修復事例を図10に示す。

* Suppression Algal Bloom in Enclosed Coastal Sea and Reservoir.

** Yasushi ISERI 西日本技術開発(株)環境部水域環境グループリーダー、***Masayoshi MORI, Youko MATSUYOKA 同環境部

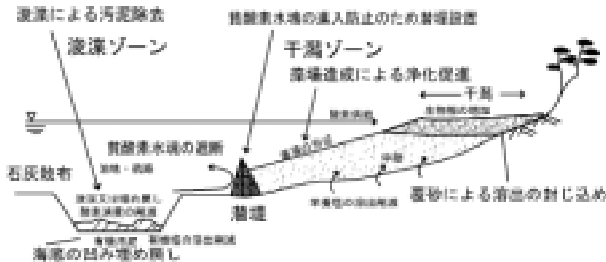


図10 干潟の造成例（他手法との連携）

干潟の造成事例は多く、失われた干潟の修復や親水空間の創造を目的で実施されている。

干潟の物質消費，生産は水質に対して非常に大きな影響を与えている。その機構は次のとおりである。底泥中もしくは表面に生息する底生動物の摂食による有機物除去，底泥中もしくは表面に生息する微小藻類，海藻藻類による栄養塩除去，魚類や鳥類の採餌による干潟生物の系外移動，微生物による有機物分解，脱窒。

干潟の底生性珪藻類は非常に生産性が高く，干潟の主要な一次生産者となっている。珪藻類は引き潮時に沿岸域に移動するが，これは物質循環の役割をなすだけでなく，沿岸域の藻類相にも大きな影響を与えていると考えられる。引き潮時に巻き上がった底生性珪藻類は，外洋では水中の栄養塩を吸収した後，沈降して水中の栄養塩除去の役割をなしていると考えられる。干潟の消失などにより，底生性の藻類の現存量が少なくなると，浮遊性の珪藻類や赤潮の原因となる渦鞭毛藻などが栄養塩を吸収して増殖することにより，藻類の異常発生につながる事が予想される。

(4) 藻（草）場造成^{2,6)}

藻場造成法は藻場が形成する生態系による水質浄化作用を主体にするものである。その効果は次の通りである。海藻（草）による栄養塩の吸収，光合成による酸素供給，藻体による有機懸濁物補足作用（底生動物，魚への移行促進），魚の捕食，捕獲による系外移動，流れ藻化による系外移動。

安定した生態系を形成することができれば持続的な環境改善につなげることができる。

生産された水産生物は漁獲により陸域に取り上げられることで系外に取り除くことが望ましい。

5.1 底泥対策

底泥対策は内部負荷の軽減を目的としている。

底泥の除去と底泥の改質に大別される。

(1) 浚渫

浚渫は除去対策の代表的手法である。汚濁物の系外除去，底泥からの栄養塩溶出の防止，生物生息域の修復・創造等の効果がある。

取り除いた汚泥の処理，再利用の検討が課題である。浚渫を行った後，水質が悪化した事例も多く，十分な調査を行い，取り除く深さや浮泥の移動状況を事前に検討した上で対策を実施することが望ましい。浮泥を効率的に除去する高濃度薄層浚渫工法等が検討されている。

藻類の種場の除去対策としても有効であり，著者らはダム湖の淡水赤潮において，上流端の種場を浚渫することにより数年間赤潮の発生が抑制できることを確認した。

(2) 覆砂

覆砂は汚泥化した底泥の上部に砂を覆砂する手法で，浚渫とならび底質改善の最も代表的な手法である。

底泥からの栄養塩溶出防止，底泥による溶存酸素消費抑制，生物生息域の修復・創造等の効果がある。従来は養魚場を有する閉鎖性水域での実施例が多かったが，近年は干潟部の生育環境回復手法として各地で実施されている。

覆砂は実施当初の効果は大きい，負荷源対策が十分でない場合，数年で汚泥が再沈積して効果が消失する。覆砂の代替材として，鉄鋼スラグ，ケイカル，石灰等が検討されている。その場でジェット水流を利用して砂を移動させ，覆砂として利用する技術もある。

覆砂は赤潮の初期発生を支えるシストの発芽遊泳を抑制することが期待されるが，筆者らが行った *Peridinium bipes* に関する発芽実験では，5cm 程度の覆砂では完全にはシストの発芽を制御できないことが明らかとなった。これは，渦鞭毛藻の場合，シスト発芽時にはアメーバー状で砂粒子間隙をすり抜けて，上水に達するためと推察される。

5.2 今後期待される技術

(1) クローズド覆砂工法

浚渫土を機械脱水して，浚渫泥の強度増加，減容化を計る。脱水ケーキを水域内に還元し，浚渫泥土を系外に持ち出さない浚渫・脱水・水域還元工法である。回収した汚泥を粒や礫状に水質浄化資

材として加工し、覆砂材として利用するバイオカルチャーシステムや²⁷⁾、さらに発展して、浚渫土を現地で直ちに酸化処理した後、覆土材として返送する方法が考案されている²⁸⁾。

(2) 有用微生物利用

底泥中の有機物を効率的に分解する微生物を底質部に導入し有機物分解を促進する。

一般的な好気性細菌である *Bacillus subtilis* (納豆菌の一種) をゼオライト等の多孔質担体に吸着させ底泥に散布する試みがなされている。

底質部は低温であること、嫌気的条件下であること、海域では塩分による影響があることなど、外来の細菌類が増殖しにくい環境にあり十分な効果を発揮できないことも考えられる。外来の細菌類を持ち込むこと自体も問題点がある立場から、現地の細菌類を利用する手法も検討されている。海底部に光を導入しそこに生息する光合成細菌を活性化し底泥を浄化する手法が検討されている。

(3) 超電導磁気分離式回収法

超電導磁気分離式回収法の概要を図11に示す。本法は、原水に凝集剤と鉄粉を加えて藻類と鉄粉の磁性フロックを作る前処理を行い、この後、磁気フィルターを通して磁性フロックを分離する。所定の時間分離運転した後、電磁石の磁場をなくし、磁気フィルター上に蓄積した磁性フロックを洗浄水で除去し、アオコを遠心分離器により脱水回収する。使用した鉄粉も回収し再利用する。高温超電導バルク磁石を使用するので、単純なる過処理より回収効率が優れている。原水を取水し、前処理過程を経て浄化水を得ると同時に、高濃度の汚泥を回収する時間はわずか4～5分程度である。アオコの除去率は90%以上で、400m³/日の処理が可能である²⁹⁾。

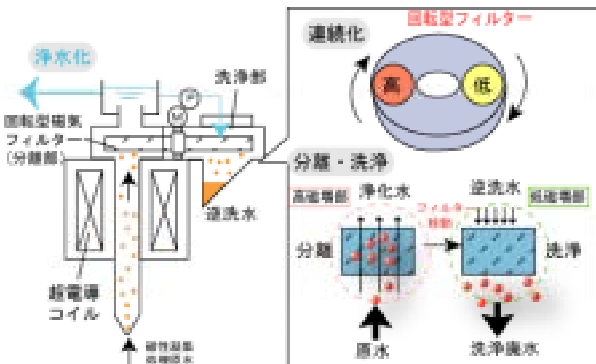


図11 超電導磁気分離式回収法概略図
(河川浄化の例)

6 物理的処理法

近年、薬品を全く使用しない物理的処理法の技術の開発が進んでいる。

(1) 噴射衝撃³⁰⁾

噴射衝撃は物理的処理の代表的な手法である。

アオコや赤潮を含んだ水を吸い込み高压、高速で衝撃板に噴射し、衝突時の物理的ショックを利用して処理を行う(図12)、原水吸引から処理まで数秒間の行程で可能である。

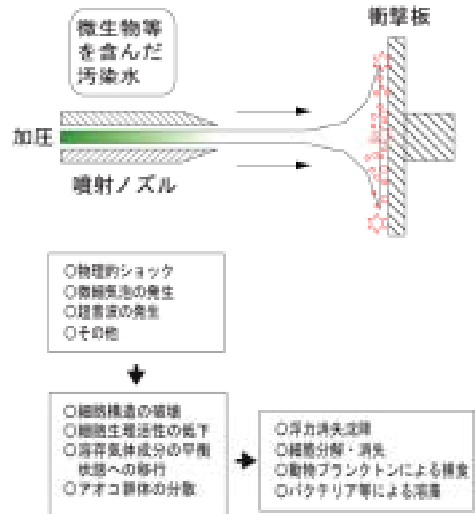


図12 噴射衝撃機構図

本法の特徴は、噴射速度(圧力)を変化させることにより、処理レベルの調整が可能なことである。アオコ(*Microcystis*)では、低压から高压にかけて、フロックを分散させる作用、偽空胞をつぶし細胞を沈降させる作用、細胞を破壊し殺藻する作用を段階的に選択することができる。それぞれ、捕食者による捕食作用促進処理、沈降分離処理、殺藻処理に利用される。一方、アオコの競争種となることが多い珪藻類や捕食者である動物プランクトンに対する影響が少なく、継続的に処理を行うことで、特定藻類の異常増殖水域が、多様性のあるバランスのとれた藻類相に変化するものと予想される(表3、図13)。

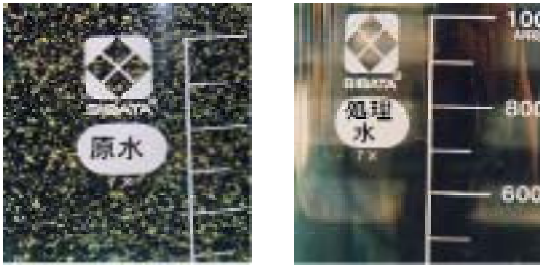
* Suppression Algal Bloom in Enclosed Coastal Sea and Reservoir.

** Yasushi ISERI 西日本技術開発(株)環境部水域環境グループリーダー、***Masayoshi MORI, Youko MATSUYAMA 同環境部

プランクトン		圧力 (Mpa)	除去率 (%)
渦鞭毛藻	<i>Ceratium hirundinella</i>	0.5	95
藍藻	<i>Microcystis aeruginosa</i>	0.5	90
	<i>Phorimidium</i> sp.	0.5	86
珪藻	<i>Cyclotella</i> spp.	0.5~0.7	0~12
	<i>Mellosira</i> spp.	0.5	0~8
輪虫	<i>Bosmina rongirostris</i>	0.5	8
	<i>Keratella valga</i>	0.5	8

表3 藻類等に対する噴射衝撃処理効果

ンモデルの開発，我が国の閉鎖性水域における各要素の経済的評価手法の確立，全国レベルの対策実施後の効果検証データベースシステムの構築があげられる。



原水 処理水

図13 アオコの処理状況

この他，超音波発生装置による処理，キャビテーションによる処理，噴射水流同士を衝突させる処理などが，アオコや赤潮に対して適用が試みられている。

7 おわりに

21世紀の我が国は環の国造りとして，人と人との環，生態系の環，物質循環の環，環境と経済の環，地球の環の体系作りが求められている。

異常発生藻類制御手法等の水域改善手法は，住民，NPO，事業者及び公共団体等のパートナーシップのもとに，生態系及び物質循環を健全化し，改善手法の運用が経済的に成り立ち，地球環境に対する影響も配慮したものでなければならない。

今後の具体的課題として，水質改善施設を通じての実質的，持続的なパートナーシップの形成，自然エネルギーや自然浄化作用を利用し，経済的，保守管理が容易で，かつ環境に優しい手法の確立，ダム湖から内湾等の大規模な水域の浄化能力を有し，容易に移動が可能な機動性のある手法の開発，各手法の藻類制御効果の予測及び評価が可能なシミュレーショ

-
- 1) 宮岡・石垣・辻 ;閉鎖性水域における強制循環による水質改善工事, ヘドロ, No.74, pp.42-46, 1984
 - 2) 荒川・長崎・丹羽・福寿; 耶馬溪ダム貯水池における曝気の流動制御による水質保全効果について, ダム工学, Vol.8, No.1, pp.27-34, 1992
 - 3) 境; 磯焼けの海を救う, 農文協, 人間選書203, pp.163-169, 2000
 - 4) 岸本・旗持・前田; 鉛直循環による淡水赤潮発生対策について, 日本水産学会誌, 第62巻, 第1号, pp.3-11, 2000
 - 5) 大内; 密度流拡散装置による閉鎖性海域の攪拌浄化, 漁船, 第343号, pp.516-523, 2000
 - 6) 井上・井芹・長谷部・西元・小松; 渦鞭毛藻*Peridinium bipes*の鉛直移動が栄養塩循環に及ぼす影響, 環境工学研究論文集, 第37巻, pp.445-454, 1999
 - 7) 吉村・田嶋・斎藤・井芹; 寺内ダム貯水池における水質管理の調査報告, ダム技術, No.114, pp.1-12, 1993
 - 8) 山田; ダム湖上流端水域における*Peridinium*淡水赤潮の集積機構に関する研究, 環境衛生工学研究, 第9巻, 第4号, pp.46-53, 1990
 - 9) 小松・井上・長谷部・西元・藤田・井芹・中島; 表層水底層部連続供給による水質底泥改善技術, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1156-1160, 1998
 - 10) 中島・辰野・斎藤・西ノ首・多田・矢野・中村・矢田・小松・藤田・小橋; 流況制御ブロックによる水質改善効果と底質, ベントスの変化, 日本水産工学会学術講演会, pp.51-52, 2000
 - 11) 長尾; 浮遊物回収装置, (有) ナガオテック資料, 2000
 - 12) 稲森; 21世紀の中核としてのバイオ・エコエンジニアリング研究, 下水道協会誌, Vol.39, No.472, pp.72-75, 2000
 - 13) Y. Iseri, Z. Kawabata, M. Sasaki; Development of a boat equipped with UV lamps for suppression of freshwater red tide in a reservoir, Japanese Journal of Water Treatment Biology, Vol.29, No2, pp.61-70, 1996
 - 14) 井芹・川端・藤本・伊藤; 紫外線照射によるプランクトンコントロール, 用水と廃水, Vol.38, No.4, pp.31-37, 1996
 - 15) 小島; 湖面の局部遮光による藻類(アオコ)制御の実証実験, 日本水処理生物学会誌, 別巻21号, p.101, 2001
 - 16) 田中・安藝・井芹・横山・本田・川端; 電界・磁界を用いた淡水赤潮及びアオコの増殖制御, 水処理生物学会誌, 別巻, Vol.20, 1999
 - 17) Honjo, Shimouse, Hanaoka, ; A red tide occurred at the Hakozaki Fishing Port, Hakata Bay, in 1973 - The growth process and the chlorophyll content, Bull. Plankton Soc. Japan, Vol.25, pp.7-12, 1978
 - 18) 今井一郎・長崎嶋三; 沿岸環境中に存在する殺藻微生物の計数法の検討, 渦鞭毛藻・ラフィド藻等新型赤潮の発生機構と予測技術の開発に関する研究, 平成6年度研究報告書, 南西海区水産研究所, pp.35-44, 1995
 - 19) I. Imai, Y. Ishida and Y. Hata; Killing of marine phytoplankton by a gliding bacterium *Cytophaga* sp. isolated from the coastal sea of Japan, Mar. Biol., Vol.116, pp. 527-532, 1993
 - 20) K. Nagasaki, M. Ando, I. Imai, S. Itakura, and Y. Ishida; Virus-like particles in an Hiroshima Bay, Japan, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.96, pp.307-310, 1993
 - 21) 朴・横山・沖野; 諏訪湖におけるアオコ毒素microcystinの動態, 陸水学会誌, Vol.62, No.3, 2000
 - 22) 土木学会水理委員会環境水理部会; 湖沼貯水池の管理に向けた富栄養化現象に関する学術研究の取りまとめ, 2000
 - 23) 福島・高村・金・中川・鄭・孫; ハクレンを用いたバイオ・マニピュレーションの可能性, 国立環境研究所研究報告, No.138, pp.37-43, 1998
 - 24) 村上; ミジンコ床法による鑑賞池の浄化, 第2回環境技術研究協会年次大会予稿集, p.155, 2002
 - 25) 堤・門谷; 魚類養殖業直下に堆積したヘドロのイトゴカイによる浄化の試み, 日本水産学会誌, Vol.59, pp.1343-1347, 1993
 - 26) 沿岸海域における海洋環境改善技術に関する調査研究報告書, (財) シップ&オーシャン財団, 2000
 - 27) (社) 底質浄化協会; 新しい底質浄化技術バイオカルチャーシステム, 2001
 - 28) 井上; 還元状底質改善の手法画像, 資源環境対策, Vol.31, No.14, pp.27-30, 1995

* Suppression Algal Bloom in Enclosed Coastal Sea and Reservoir.

** Yasushi ISERI 西日本技術開発(株)環境部水域環境グループリーダー, ***Masayoshi MORI, Youko MATSUYOKA 同環境部

- 29) 佐保・水守・岡田・堤・林；H T C パルク磁石応用磁気分離によるアオコ浄化性能，低温工学・超電導学会要旨集，p.251，2001
- 30) 井芹・横山・E. Rahim；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，p.78，2000