

## 8 途上国に適用可能な水改善技術

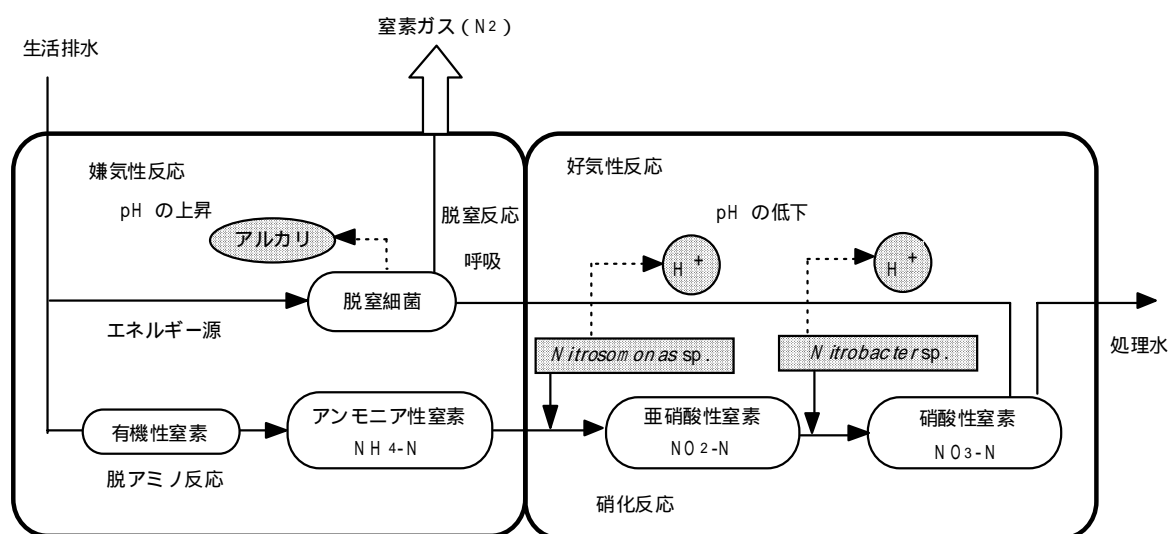
湖沼等の富栄養化防止を図る上では、先進国の技術をそのまま移転することは効果的ではなく、国情を踏まえた省エネ、省コスト、省メンテナンスの技術が重要である。本章では、このような開発途上国に適用可能な技術について述べる。

### 8 - 1 高度処理浄化槽

#### 8 - 1 - 1 システムの原理、特徴

##### (1) システムの原理

生活排水対策としては大きく人口の密集した地域で活用される下水道と人口の分散した地域で活用される浄化槽の大きく二つに分けられる。この中で浄化槽は処理水質の高度化を図ることにより、処理水をオンサイトで水域に還元できることから高度処理浄化槽の普及は河川水、地下水の維持用水量の確保、すなわち水の涵養に対し大きな効果を有している。この高度処理浄化槽は窒素とリンを除去可能とする生活排水対策の処理システムであり、家庭用の小規模から集合住宅用の大規模まで存在する。処理方式としては、生物処理反応槽に微生物が浮遊状態で存在する活性汚泥方式と微生物が担体に付着状態で存在する生物膜方式に主として分けられる。いずれの方式においても富栄養化対策として湖沼、内海、内湾流域を保全するために浄化槽において窒素、リン除去型の高度化が行われつつある。この場合、生活排水中に含まれるし尿、生活雑排水由来の窒素、リンを除去するために嫌気・好気条件が交互に保持される工夫が図られている。窒素を除去するためには生活排水中の有機性窒素としてのアミノ酸、たん白質の嫌気反応槽での脱アミノ反応によるアンモニア性窒素への変換、その後、



反応	脱アミノ反応	硝化反応	脱窒反応
アルカリ度の消費	有機性窒素 $1\text{m g} \cdot \text{l}^{-1}$ が脱アミノ化されるときアルカリ度 $3.57\text{m g} \cdot \text{l}^{-1}$ 生成	アンモニア性窒素 $1\text{m g} \cdot \text{l}^{-1}$ が硝化されるときアルカリ度 $7.14\text{m g} \cdot \text{l}^{-1}$ 消費する	硝酸性窒素 $1\text{m g} \cdot \text{l}^{-1}$ が脱窒されるときアルカリ度 $3.57\text{m g} \cdot \text{l}^{-1}$ 生成する。脱窒反応においてはC/N比は3~5程度必要。
処理機能の状況	流入下水中の窒素形態は有機性窒素とアンモニア性窒素でほとんど占められている。その比率は4:6程度	流入アルカリ度が少ないとpHの低下をきたす。 ↓ 処理機能低下、汚泥の解体	アルカリ度を生成するためpH上昇。硝化と脱窒とを組み合わせることによりpH低下を防ぎ、処理機能が安定。

図8-1-1 生物学的硝化・脱窒反応における窒素除去メカニズム

好気反応槽での硝化細菌の働きによるアンモニア性窒素の硝酸性窒素への変換がまず基本的に必要なである。この硝酸性窒素に変換した好気処理水を嫌気性反応槽へ循環返送することにより、硝酸性窒素 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) に結合している酸素を有効に利用できる脱窒細菌の働きでエネルギー源としては流入する生活排水中の有機物である BOD を利用し、呼吸源としては  $\text{NO}_3$  中の結合酸素を利用し菌体合成を行うことにより  $\text{N}_2$  ガスへの変換が行われ窒素の除去が達成される (図 8-1-1)。

なお、このような嫌気反応槽への好気反応槽の処理水等の循環返送は 5 人 ~ 50 人用の小規模タイプの生物膜処理方式および大規模の嫌気・好気活性汚泥法方式等で活用される。また、51 人以上の中大規模のタイプでは嫌気・好気条件を形成するために間欠ばっ気活性汚泥法、回分式活性汚泥法等も活用される。

また、リンを除去するためには生物学的方法と物理化学的方法が活用される。生物学的方法としては嫌気・好気条件下において嫌気条件でのリンの放出速度に対し好気条件でのリンの取り込み速度が 10 倍程度に達し、リンが汚泥中に通常の 1.5% ~ 2% に対し 5% 以上に過剰に蓄積されることによる手法が代表である。この場合、汚泥の適正な

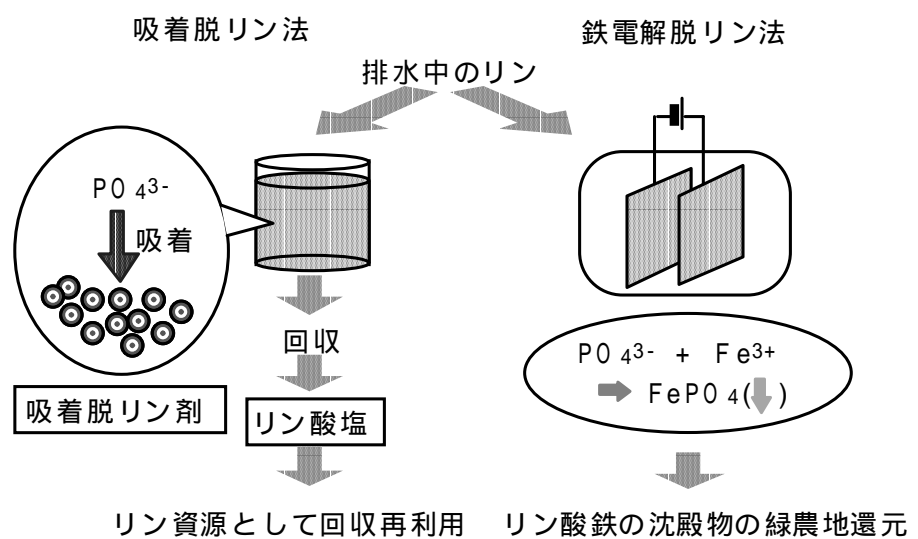


図 8-1-2 物理化学的リン除去システム

頻度の引き抜きが必要とされる。物理化学的方法としては凝集沈殿法、吸着脱リン法、鉄電解脱リン法 (図 8-1-2) などがある。この中で吸着脱リン法はジルコニウム担体の充填塔でリンを吸着させ、その後、アルカリを添加して脱着させ回収・資源化を図る上で重要なプロセスである。鉄電解脱リン法は陽極の鉄板と陰極の鉄板に微弱電流を流し溶出した鉄イオンを流入生活排水中のリン酸イオンを反応させ凝集して除去する方法である。このようなリンの除去法は小規模と中大規模において適用は処理特性に応じて異なっている。

## (2) システムのフロー

### 小規模システム

小規模タイプの高度処理浄化槽としては流量調整型で嫌気反応槽・好気反応槽の順で好気反応槽の処理水等を循環するシステムで窒素除去が行われるようになっている。好気反応槽としては生物ろ過法、膜分離活性汚泥法、接触ばっ気法等が用いられている。このような窒素除去に加えてリン除去を行う場合には、吸着脱リン法、鉄電解脱リン法等が用いられている (図 8-1-3)。代表的なシステムの処理フローは図 8-1-4 ~ 6 に示すとおりである。

### 中大規模システム

中大規模タイプの高度処理浄化槽としては流量調整型が基本で嫌気条件と好気条件が交互にくり返されるようになっている。窒素除去を主として行う場合は空気供給を ON, OFF する嫌気・好気間欠ばっ気式活性汚泥法、流入・ばっ気 (好気)・非ばっ気 (嫌気)・沈殿・放流をくり返す嫌気・好気回分

式活性汚泥法，非ばっ気（嫌気）槽・ばっ気（好気）槽・沈殿槽からなり沈殿汚泥およびばっ気槽の活性汚泥を各々50～100%，200～300%返送あるいは循環する嫌気・好気循環式活性汚泥法が用いられている。これらの嫌気・好気活性汚泥法においては生物学的リン除去も行われるが，流入負荷の変動，季節的な水温の変動等で安定性に問題のある場合にはポリ塩化アルミニウム（PAC），硫酸アルミニウム，ポリ塩化鉄，塩化第二鉄等の凝集剤を活性汚泥反応槽内に直接流入水中のリンとAあるいはFe

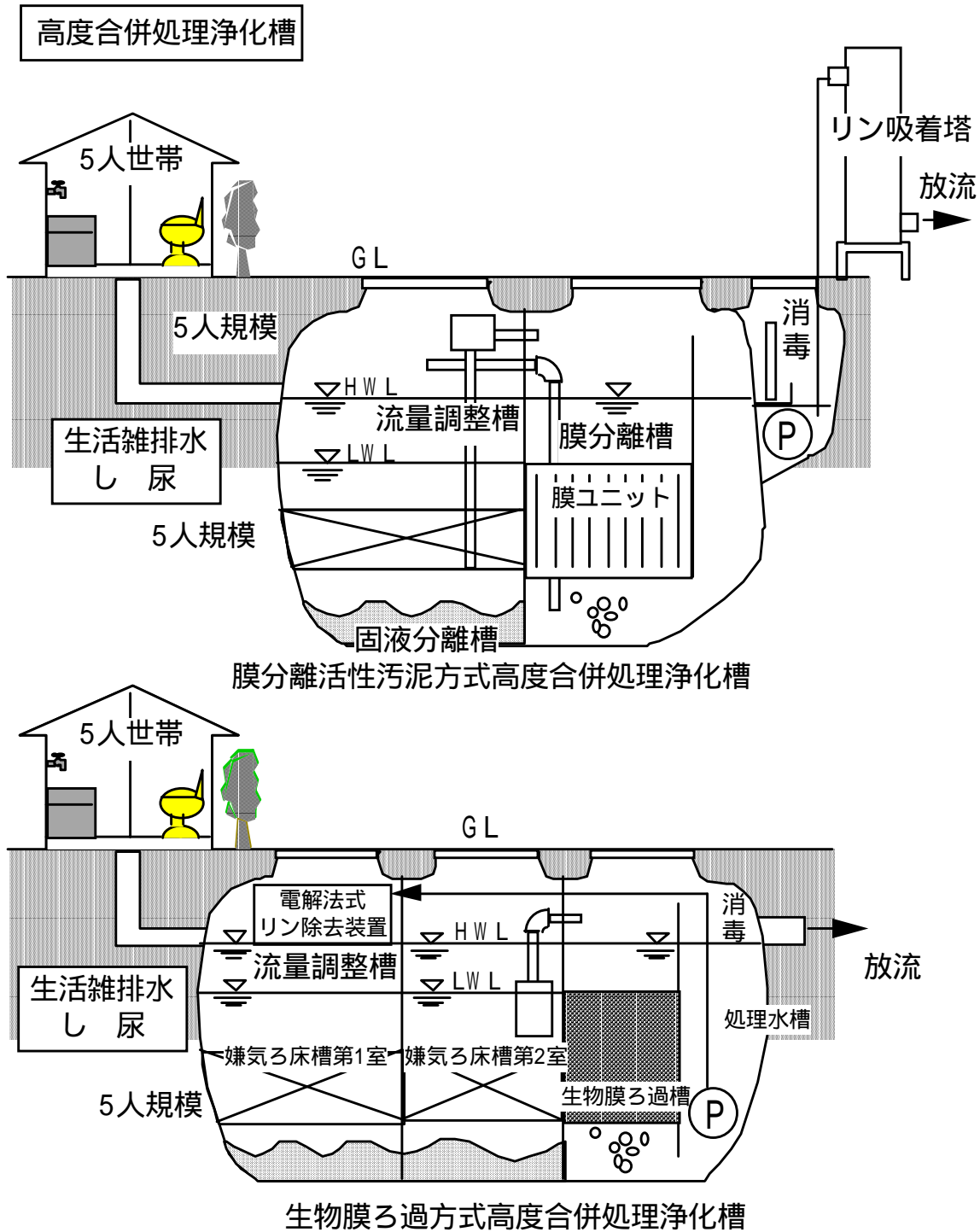


図8-1-3 高度合併処理浄化槽の概要

のモル比 ( $Fe/p$ ,  $Al/p$ ) で 2 程度になるように添加してリン除去の安定化が図られる。また、生物処理プロセスと組み合わせて鉄電解脱リン法、吸着脱リン法、凝集沈殿法等が用いられる。代表的なシステムの処理フローは図 8-1-7~9 に示すとおりである。

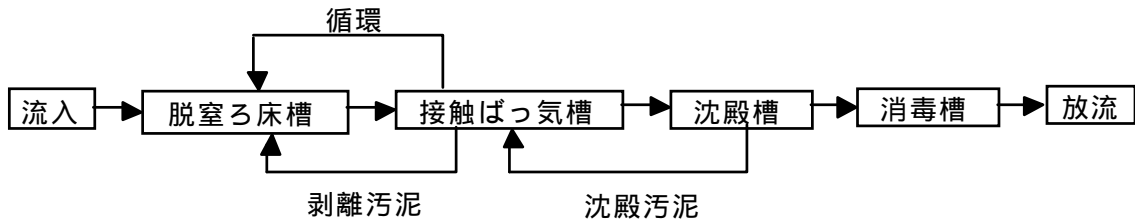


図8-1-4 循環型脱窒ろ床・接触ばっ気方式の処理フロー

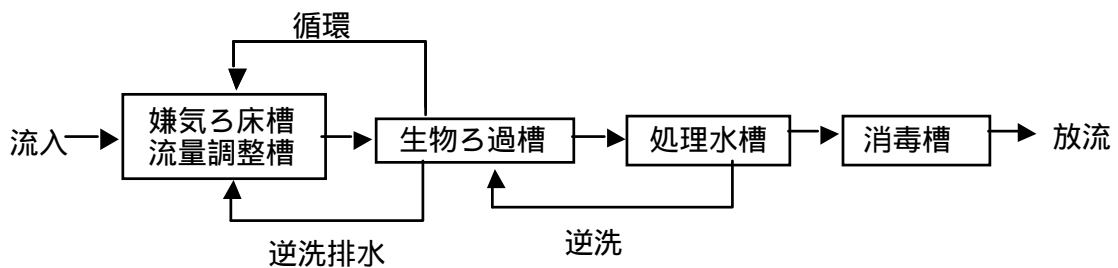


図8-1-5 生物ろ過方式の処理フロー

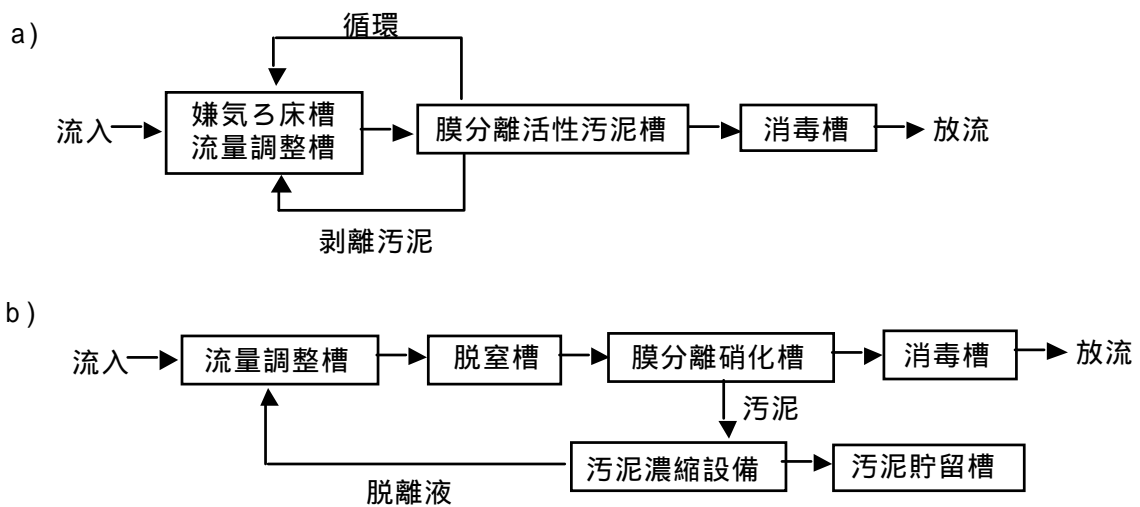


図8-1-6 膜分離活性汚泥方式の処理フロー

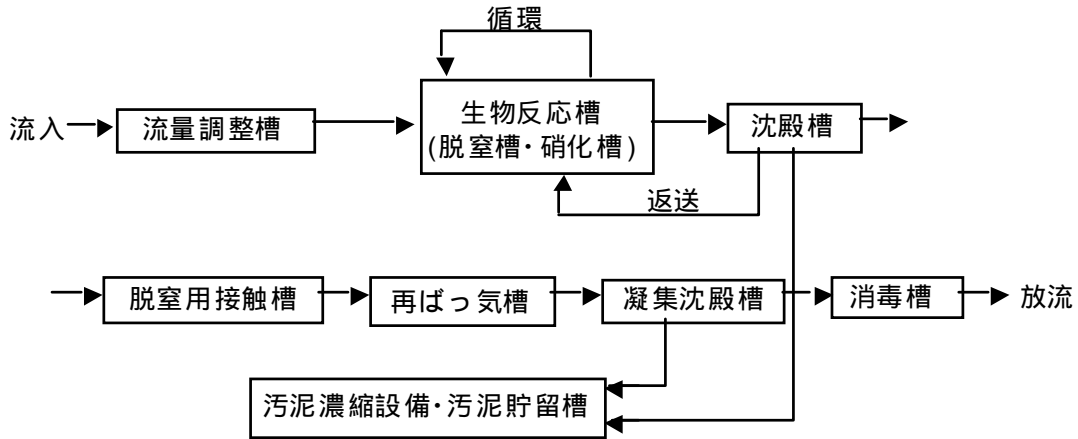


図8 - 1 - 7 硝化液循環活性汚泥・三次処理脱窒・脱リン方式

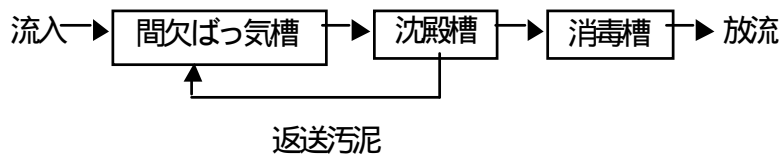


図8 - 1 - 8 間欠ばっ気嫌気・好気活性汚泥方式の処理フロー

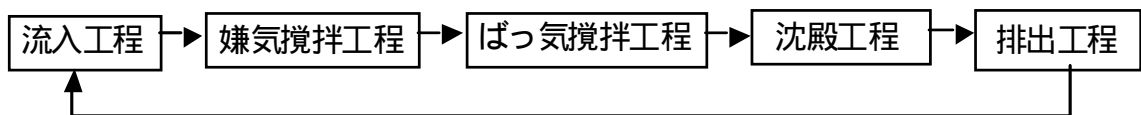


図8 - 1 - 9 回分式嫌気・好気活性汚泥方式の処理フロー

### (3) システムの特徴

高度合併処理浄化槽のシステムは生物処理として生物膜法を用いる場合でも、活性汚泥法を用いる場合でも必ず、硝化・脱窒反応による効率的な窒素除去が行えるように嫌気条件と好気条件がくり返されるシステムになっているのが最大の特徴である。また、生物学的あるいは物理化学的リン除去が行えるようになっていることも大きな特徴である。従来の合併処理浄化槽は有機物としてのBODの除去のみが対象とされていたことからアオコ、赤潮対策にはほとんど無力であり、普及・整備による富栄養化の防止には効果のなかったことが霞ヶ浦流域では確認されている。それ故、高度合併処理浄化槽のシステムの特徴である高い窒素、リンの除去機能は健全な水環境の創造への大きなインパクトを有しているといえる。また、嫌気条件と好気条件の組み込まれた処理プロセスにおける硝化・脱窒反

表8-1-1 嫌気・好気条件を組み合わせた処理システムの特徴

基本仕様の原理を組み込むことによる性能上の効果

- 富栄養化すなわち、アオコ、赤潮、青潮の発生の主因である窒素を高度・効率的に除去できる。
- 硝化反応におけるpHの酸性化を脱窒反応におけるアルカリ度の供給でpHの中性化が行われ、微生物の凝集能力の向上、維持により固液分離が適切に行われ、処理水の透明化が可能となる。
- 接触ばっ気法においては、剥離汚泥を嫌気ろ床槽に常時循環することにより、反応槽内の透明化が促進され、ピーク時においても汚泥流出を抑制できるので処理水の透明化と安定した効率的な処理性能を維持することができる。
- ミジンコ、ミズムシ、巻貝類の大型無脊椎動物、バルキング形成系状微生物などの障害微生物の異常増殖の抑制が可能となる。
- 嫌気・好気循環法においては循環による流入原水の希釈効果、脱窒効果、微生物群との接触頻度の向上効果などにより硝化活性、脱窒活性が高まり生物学的硝化・脱窒の高度化が可能となる。
- 嫌気好気循環を行うか、嫌気好気の単槽でのサイクリック化を行うことによりCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O等の温暖化ガスの発生を抑制することができ地球に優しい近未来型水処理を行うことができる。

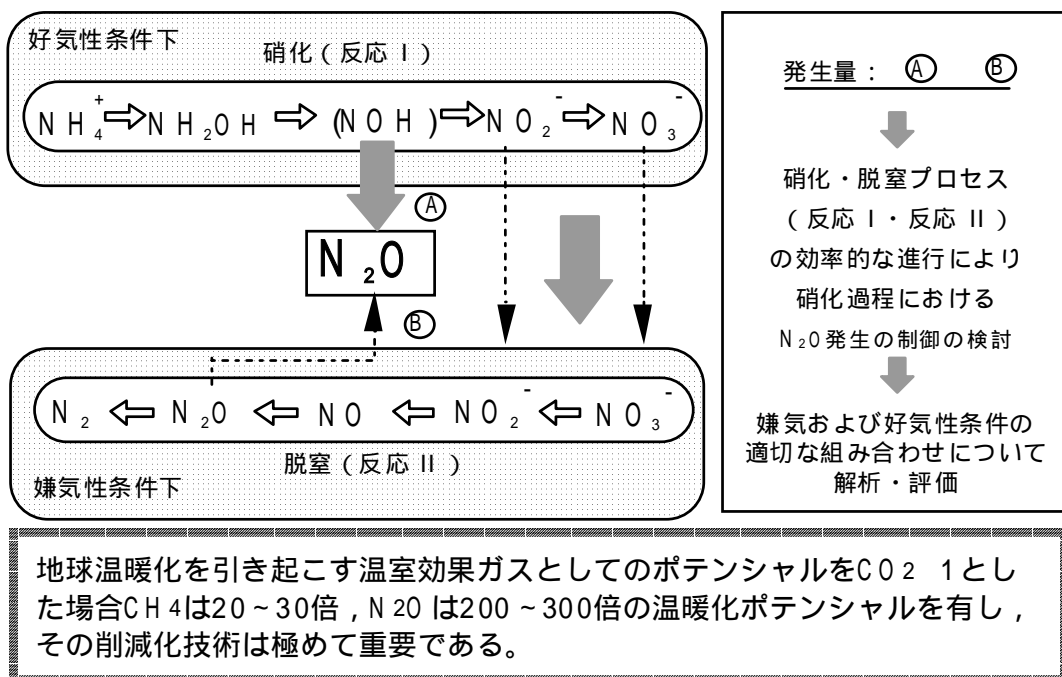


図8-1-10 生物学的排水処理の硝化・脱窒反応におけるN<sub>2</sub>O発生機構と最適制御システム

応,脱リン反応に加えて温室効果ガス発生抑制等に対する効果は表8-1-1,図8-1-10に示すとおりであり,富栄養化防止対策としての窒素,リンの除去,富栄養化防止対策としての $CH_4$ (メタン), $N_2O$ (亜酸化窒素)の発生抑制等をはじめ処理機能の高度化に対し大きな効果を発揮できることはシステムの多面的かつ重要な特徴であるといえる。

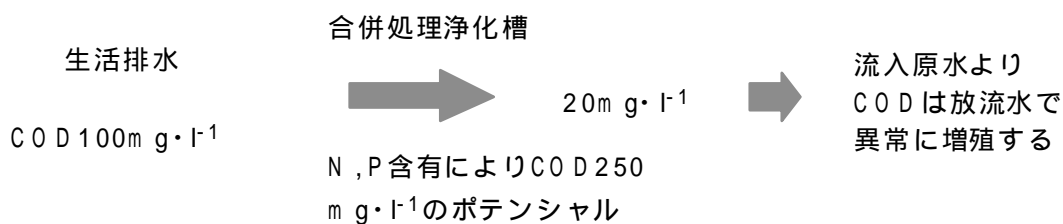
### 8-1-2 システムの性能

高度合併処理浄化槽システムの性能は,基本的には $BOD10mg \cdot l^{-1}$ 以下, $T-N10mg \cdot l^{-1}$ 以下, $T-P1mg \cdot l^{-1}$ 以下の処理水質が得られることである。小規模タイプでは $BOD10mg \cdot l^{-1}$ 以下, $T-N10mg \cdot l^{-1}$ 以下に加え技術開発の成果により $T-P1mg \cdot l^{-1}$ 以下の性能を満足することができるようになった。システム性能として窒素が $T-N$ で $10mg \cdot l^{-1}$ 以下,リンが $T-P$ で $1mg \cdot l^{-1}$ 以下とすべきは富栄養化の防止のためである。このシステム性能を満足させる必要があるのは,くみ取り便所を水洗する場合の水域に及ぼす窒素,リン負荷量の比較解析から明らかである。すなわち,人間一人あたり一日に排出する生活排水の原単位はし尿の水洗用水,台所・風呂・洗たく等の生活雑排水において水量では各々50,200(計250),BODでは各々13g,27g(計40g), $T-N$ では各々8g,2g(計10g), $T-P$ では各々0.7g,0.3g(計

表8-1-2 合併処理浄化槽放流水のAGPの一例

供試藻類	施設	AGP ( $mg \cdot l^{-1}$ )				平均
		A	B	C	D	
<i>Selenastrum capricornutum</i>		430	520	590	580	530
<i>Chlorella</i> sp.		290	370	440	370	368
<i>Chattoneila</i> sp.		450	430	430	390	425

AGPが $500mg \cdot l^{-1}$ であれば,浄化槽放流水1 $l$ からCODMnが250mg生産されることになる。



項目	合併処理浄化槽処理水	脱窒処理水	脱窒・脱リン処理水
T-N ( $mg \cdot l^{-1}$ )	31.0	7.5	6.5
T-P ( $mg \cdot l^{-1}$ )	3.8	3.5	0.1
AGP ( $mg \cdot l^{-1}$ )	420	80	10

AGP試験: フラスコに浄化槽処理水を入れ藻類を接種した後に,光を照射し,10日位培養し最大の増殖を示した時に測定し,試料水が公共用水域でどの位の藻類を増やす能力を有しているかを評価する試験法で藻類増殖潜在能力評価試験法のことである。

1g)である。くみ取り便所の時は、生活雑排水はたれ流されるもののし尿は収集してし尿処理施設の高度な先端的処理で完全な除去が行われる。この場合に生活雑排水としてたれ流されている窒素、リン濃度を原単位から求めると、窒素については $2g \div 200 = 10mg \cdot l^{-1}$ 、リンについては無リン洗剤の使用を考慮すると $0.2g \div 200 = 1mg \cdot l^{-1}$ となる。すなわち、生活雑排水はたれ流されていたもののし尿処理施設でほとんど窒素、リンの除去されていたし尿を貯留する方式のくみ取り便所を生活様式の高度化のために水洗化した場合、し尿と生活雑排水の両者からなる生活排水の処理性能をたれ流されていた生活雑排水濃度に相当する $T-N10mg \cdot l^{-1}$ 以下、 $T-P1mg \cdot l^{-1}$ にしない限り水域への窒素、リン負荷量を低減することはできない。このことから閉鎖性水域としての湖沼、内海、内湾流域においては $T-N10mg \cdot l^{-1}$ 以下、 $T-P1mg \cdot l^{-1}$ 以下の水質を満足しなければくみ取り便所の時の環境汚濁負荷以下にまで下げられないことからこのシステム性能を確保することが必要不可欠である。

また、生活排水が公共水域に放流される前に処理水がどの位の藻類を増殖する可能性があるかを解析・評価する方法として、藻類増殖の潜在能力 (AGP : Algal Growth Potential) 評価試験がある。この方法は各種排水およびその処理水を採水し、三角フラスコに入れ、藻類を接種し光を照射し (明 12 時間, 暗 12 時間), かつ温度を 20 程度にコントロールして最大に増殖するまで 10 ~ 14 日間培養し、実際の湖沼、内海、内湾の状況に近づけた形で試料水の藻類増殖の潜在能力を事前評価するものである。そのため、この増殖能を調べることで放流水が水域でどの位藻類を増やす能力を有しているかを事前評価し明らかにすることができる。

生活排水を対象として AGP から評価した窒素、リン除去の効果は表 8-1-2 に示すとおりである。このような結果は湖沼に出現するアオコを形成する藻類、内海や内湾に出現する赤潮を形成する藻類のいずれにおいても同じ傾向が得られている。この AGP 試験から下水道、農業集落排水処理施設、浄化槽等において BOD のみの除去対策がいかに無力であり、窒素、リン除去対策へ転換することが必然であることを理解することができる。

### 8 - 1 - 3 システムの波及効果

生活排水対策の要として下水道と相対して重要な位置づけにある浄化槽の技術開発はめざましいものがある。従来の BOD 除去型では累進的に加速する富栄養化を防止できないことから、1995 年度の浄化槽の構造基準の改正では BOD 除去型に代わり窒素・リン除去型の構造が追加された。小規模合併処理浄化槽については技術の確立されている窒素除去方式が導入され、中・大規模合併処理浄化槽については窒素、リン除去可能な硝化液循環型の嫌気・好気活性汚泥法と凝集沈殿法を組み合わせた処理方式が導入された。

表8-1-3 高度型小規模合併処理浄化槽の処理方式と性能の概要

処理方式	放流水質 ( $mg \cdot l^{-1}$ )	代表的特徴	代表的操作条件
流量調整型嫌気ろ床 生物膜ろ過循環法	BOD 10 T-N 10 SS 10	好気条件から嫌気条件へ循環し、好気性生物処理槽へ一定水量を送水する流量調整を行い、かつ生物ろ過を組み合わせることによりBOD、窒素の高度除去を図る。	生物ろ過槽BOD容積負荷：1 担体充填率：70%、循環比：4 充填担体：多孔質セラミックス製
流量調整型嫌気ろ床 担体流動ばっ気および 高速固液分離法	BOD 10 T-N 10 SS 10	好気条件から嫌気条件へ循環し、好気性生物処理槽へ一定水量を送水する流量調整を行い、かつ小円筒状担体を充填した流動ばっ気、同担体を用いた高速固液分離を組み合わせることによりBOD、窒素、SSの高度除去を図る。	担体流動ばっ気槽BOD容積負荷：0.4 循環比：2 充填担体：ポリエチレン製
流量調整型攪拌ろ床 生物膜ろ過循環法	BOD 10 T-N 10	好気条件から嫌気条件へ循環と全槽水位変動および放流水量を一定にすることによりピークカットさらに生物膜ろ過を行うことによりBOD、窒素の高度除去を図る。	生物ろ過槽BODろ材容積負荷：0.2 循環比：4 充填担体：多孔質セラミックス製



とくに今後の技術開発を進めていく上で、高性能化、コンパクト化、省コスト化、省エネ化、維持管理の容易化は重要な課題であることから、このような技術がフリーに行えるよう告示第13型として新技術浄化槽が位置づけられた。この新技術としての小規模タイプの高度合併処理浄化槽における窒素  $10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  以下の方式は表 8-1-3 に示すとおりである。

さらに2000年6月からは、新たに性能基準に基づく技術評価がなされることとなった。すなわち、告示第13型の考え方を主とする型で、ますます窒素、リン除去技術の開発に弾みがつくものと考えられる。これらのことから、健全な水環境の創造をめざした高度合併処理浄化槽の技術開発と普及を国民への啓発をはじめ、省庁の縦割りではなく横断的な体系で推進していくことが重要と考えられる。なお高度合併処理浄化槽の普及による健全な水環境の創造のあり方は図 8-1-11 に示すとおりである。また、高度合併処理浄化槽の整備は、富栄養化対策のみならず地下水の硝酸汚染対策においても重要であり、1999年2月には環境基準健康項目に亜硝酸・硝酸濃度  $10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  以下が位置づけられた。このため東京都では、地下浸透地域に設置する浄化槽は環境基準を超えず、かつ地下水の飲料水質ガイドライン  $10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  以下を守れることを念頭に  $\text{BOD}10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  以下、 $\text{T-N}10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  以下の性能を有する高度合併処理浄化槽の設置指導要綱が実施されている。

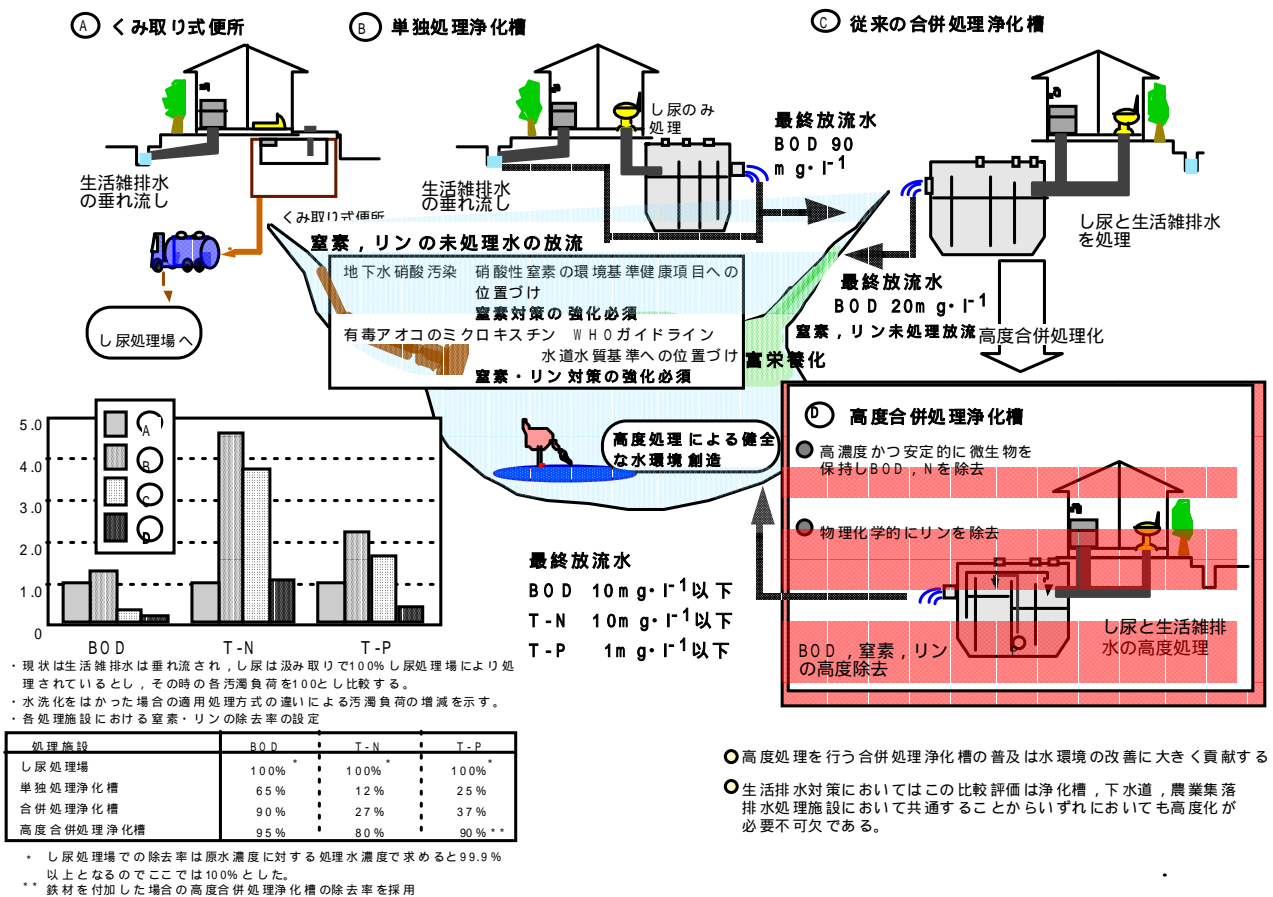


図8-1-11 生活排水対策における適用処理方式の違いと汚濁負荷削減効果の比較

さらに建設省（現国土交通省）の総合技術開発プロジェクト（総プロ）におけるディスポーザー活用において、下水道への負荷を高めないために後段の浄化槽は  $\text{BOD}10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $\text{T-N}10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $\text{T-P}1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  以下の高度処理方式とすることで合意したことはきわめて重要である。また上記システムと同時に  $\text{BOD}10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $\text{T-N}10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  以下のディスポーザー対応型の高度合併処理浄化槽も開発されており、くみ

取り便所，単独処理浄化槽設置地域でのディスポーザー単体の設置禁止の下，適正な整備がなされればディスポーザーが環境低負荷資源循環型の社会の構築に果す役割は大きいと考えられる。このような技術開発を行うバイオ・エコエンジニアリング研究施設が国立環境研究所に整備された(図8-1-12)。

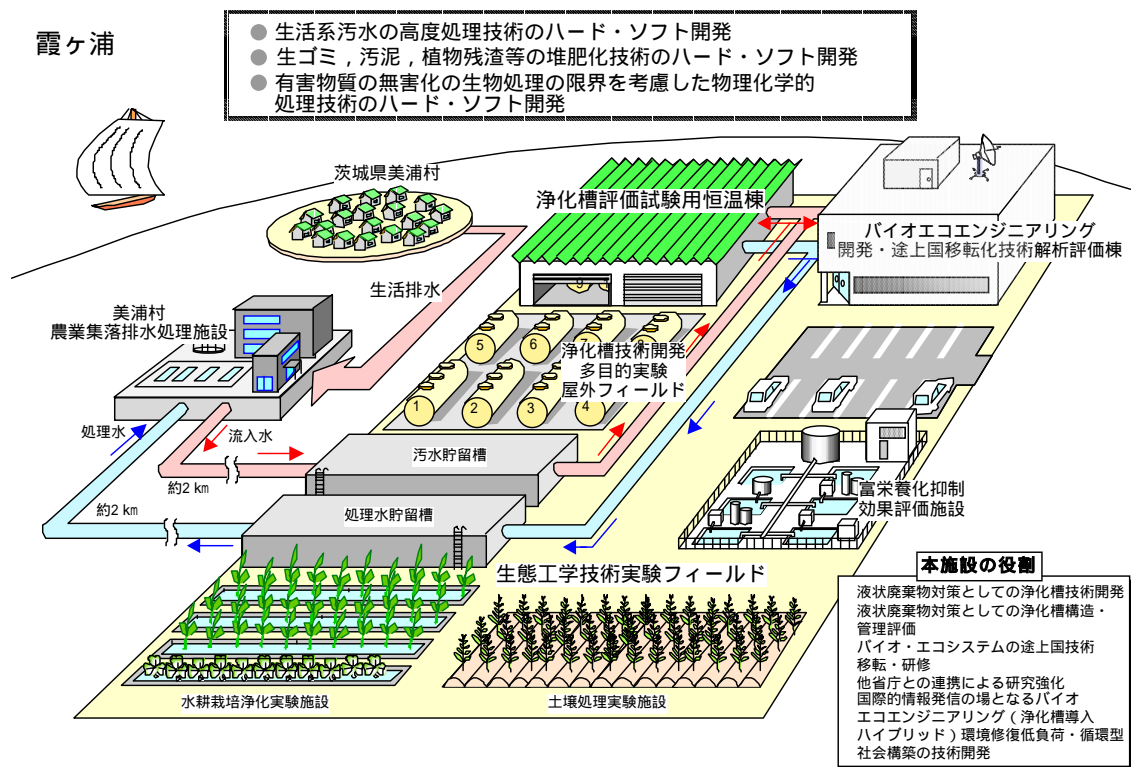


図8-1-12 高度合併処理浄化槽の技術開発と評価を行う上で重要な位置づけにあるバイオ・エコエンジニアリング研究施設

最近，窒素，リンを引き金として湖沼では青酸カリより強力な毒素ミクロキスチンを生成する有毒アオコが，内海，内湾では有毒赤潮が増殖する現象が顕在化しつつある。このことからわかるように，これからは浄化槽処理水の生態系に影響を及ぼさないことを念頭においた浄化槽技術の高度化が必要不可欠であり，これによる健全な生態系保全確保への波及効果ははかりしれないものがある。

<参考文献>

- 1) 稲森悠平，藤本尚志，須藤隆一：水界生態系に及ぼす影響から見た排水処理における窒素，リン同時除去の必要性，用水と廃水，35(1)，1993
- 2) 水のリスクマネジメント実務指針，サイエンスフォーラム，1998
- 3) 室石泰弘：合併処理浄化槽の整備促進と本年度の浄化槽行政の展望，月刊生活排水，4，1998
- 4) 稲森悠平，照沼洋，山海敏弘：湖沼水質保全と窒素・リン対策，資源環境対策，34(3)，1998
- 5) 小松央子，萩谷昭三：既設合併処理浄化槽における窒素・リン高度除去のための改善システム技術開発，茨城県地域研修型共同研究事業成果発表会要旨集，1999

(国立環境研究所：稲森悠平，野田尚宏)

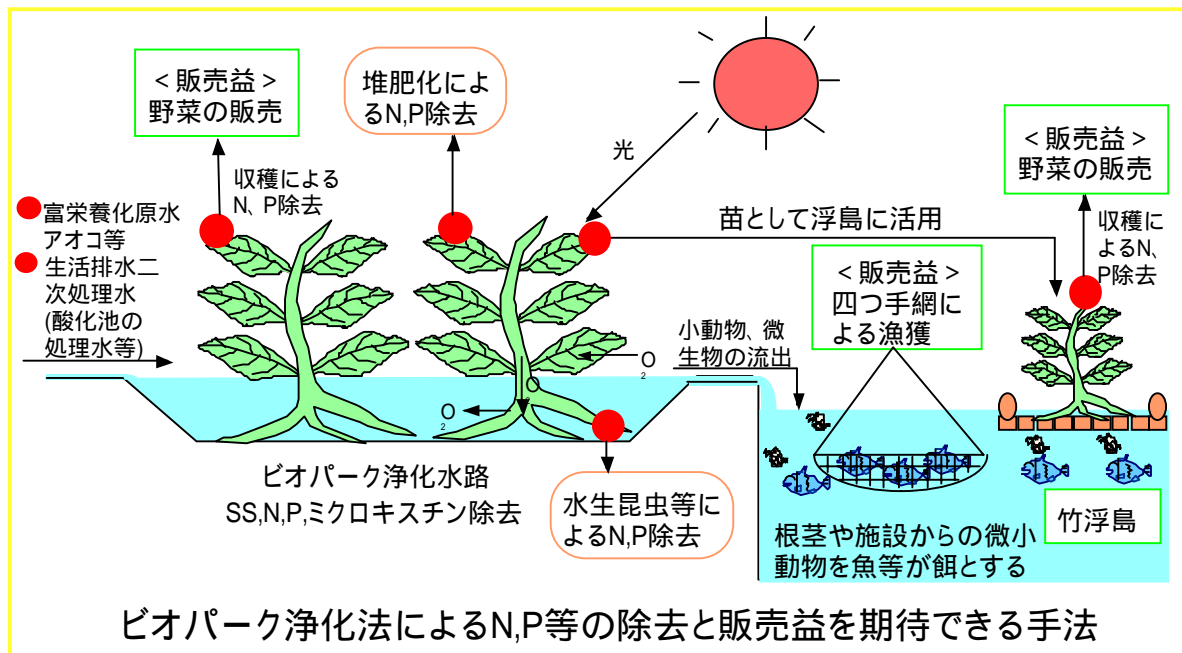
### 8 - 3 ビオパーク水耕栽培浄化

#### 8 - 3 - 1 システムの原理，特徴

##### (1) システムの概要

###### A 総論

維管束植物は，水生浮標植物やエアープランツを除いて，通常土や砂やスポンジ等の栽培床に植えることによって栽培される。しかしビオパークシステムでは浅く水が流れる環境を設定し，植物に自らの根茎で栽培床を自作させ，汚濁水の連続供給で栽培する。ビオパークは，栽培植物の根茎を生物ろ過の濾材として使い，根茎の間をすみかとする生物に生物濃縮，汚泥減容等の役割を負わせ，成長する植物と蓄積する泥及びそこに集まり成長繁殖する魚介類を全て取り出すことによって栄養塩と濁り等を水から取り出し有効利用しようとするシステムである。富栄養化した湖沼水を対象とした栄養塩や汚濁指標物質の除去能力やコストを施設面積当たり及び栄養塩の 1g 除去当たりで比較すると，8-4 で述べる水生植物植栽浄化や水処理プラントよりも低コスト高效率である。出来るだけ高価な植物や動物を生産することによって水浄化費用の一部を回収し，浄化コストを引き下げるとともに，図 8-3-1 (ビオパークシステムによる浄化と生産の両立) に示すように地域の生産性向上や栄養状態の改善にも貢献することを目指している。



開発途上国の導入先での水産業とビオパーク浄化法を組み合わせることにより利益が上がるシステムを確立する

図8-3-1 ビオパーク浄化法による栄養塩類の除去と販売益

###### B 施設構造

ビオパーク水耕栽培浄化は，1～0.5%の傾斜を持ち，幅 1m以上長さ 20m程度のコンクリート等水を透さず植物の根に破壊されない資材で造った浅く広い水路に，水質や気候条件，需要等に応じた植物を配置し，1日 1m<sup>2</sup>当たり 3m<sup>3</sup>程度の原水を流す。数本の水路を平行して設置し，個別に給水量の調節と完全な給水停止，排水が出来る写真 8-3-1 (タイで実験中のビオパーク施設) のような構造を造

る。 処理水の河川湖沼に対する放流口には魚介類が集まるので写真 8-3-2 のようにこれを捕らえる仕掛けを設置することが望ましい(バイオパーク処理水放流口に配置した籠に集まっていたフナ等, 合計 74 匹)。

### C 栽培植物

栽培する植物は常緑多年生で平面的な群落を形成する水生又は湿生性植物が主体で, 需要や景観形成等の目的に応じて直立性の植物や, 落葉性の植物を平面群落形成常緑植物と混植する。富栄養化の結果汚濁した河川湖沼水に対しては温度や COD に応じた植物を選択できるが, 高度処理された下水処理水や栄養塩濃度の高い地下水などの浄化では成分欠乏症を示す種が多く, 塊茎や地下茎を発達させる植物以外は栽培が困難である。群落を形成する植物で温帯における栽培に適しており最も高い浄化能力を示すのは写真 8-3-3 に示すクレソン, 熱帯に適して浄化能力が高いのは写真 8-3-4 に示すクウシンサイである。地下水や下水処理水に適するのは温帯では写真 8-3-5 (下水処理場で栽培中) に示すカラーであることが判っているが, 熱帯では検討が進んでいない。バイオパーク方式は日本, タイ, 中国で実践の経験があり, これらの植物が入手できることが判っている。他の地域に普及する場合は, 最高気温と最低気温を検討してクレソン又はクウシンサイの種子や挿し穂等を入手して栽培し, 同時に現地で消費されている植物を試作するとよい。

## (2) 浄化の原理

### A 生物膜処理

バイオパークシステムの水浄化は, 栽培植物の根茎表面に微生物が生物膜を形成し, 原水の濁りを食べることに始まる。栽培植物の根茎は濃密なマット状の層を形成し, マット  $1\text{ cm}^3$  に含まれる根の総延長が 10m になることがある。この根の表面に生じる生物膜を食べてその代謝を促進し, 活性を保つとともに生物膜に取り込まれた汚濁由来の栄養塩を糞の形で根茎の間に落とすのが写真 8-3-6 に示すサカマキガイ等の小動物である(写真はクウシンサイの根茎に乗って, 生物膜を食べているサカマキガイ)。バイオパーク施設の設置運用に当たって生物膜構成微生物を接種する必要はないが, サカマキガイ等の小型の巻き貝は周辺環境から探し出して水路に放つと浄化の立ち上がりが良くなる。

### B 生態系濃縮と汚泥の減容

巻き貝を食べるヒル, ヒルを食べるザリガニなど多様な動物が生態系を造り, これらの糞や死骸が汚泥となって植物の根の間に溜まる, これを水路で除去される濁りと比べると栄養塩が濃縮されており, 減容も進んでいる。ミズムシや水生ミミズなど腐食性の食物連鎖を構成する動物も現れ, 栄養塩の濃縮と汚泥の減容を進め, 栄養塩を無機化して植物が吸収できる形にする。

### C 栄養塩の吸収と収穫

植物は, 水の濁りに由来し生態系濃縮を受けて形成された泥から栄養塩を吸収し, 水中に新たな根茎を成長させるとともに泥を保持し続ける。栄養塩を吸収して成長した植物を野菜や花として人が収穫する, その結果栄養塩が取り出されると同時に植物が再び生長する余地が生まれて栄養塩の吸収が盛んになる。

### D 泥の堆肥化除去と浄化再開

泥の蓄積が進んだところで施設の水路を交互に給水停止にし, 水を流し出し, 植物に泥の水分を吸収蒸散させる。泥が乾燥し, 植物も枯れたところで水路に残った物を取り出して積み上げると高温発酵して有用な堆肥となる。給水を続けていた水路から植物を苗として導入し, 浄化を再開する。

### E 魚介類の漁獲と除去

水を浄化する微生物や小動物はその一部が処理水に乗って施設から流れ出るので, これを餌とする



写真 8-3-1 タイ王国のバイオパーク施設



写真 8-3-2 放流口付近で捕獲された魚類



写真 8-3-3 クレソン



写真 8-3-4 クウシンサイ

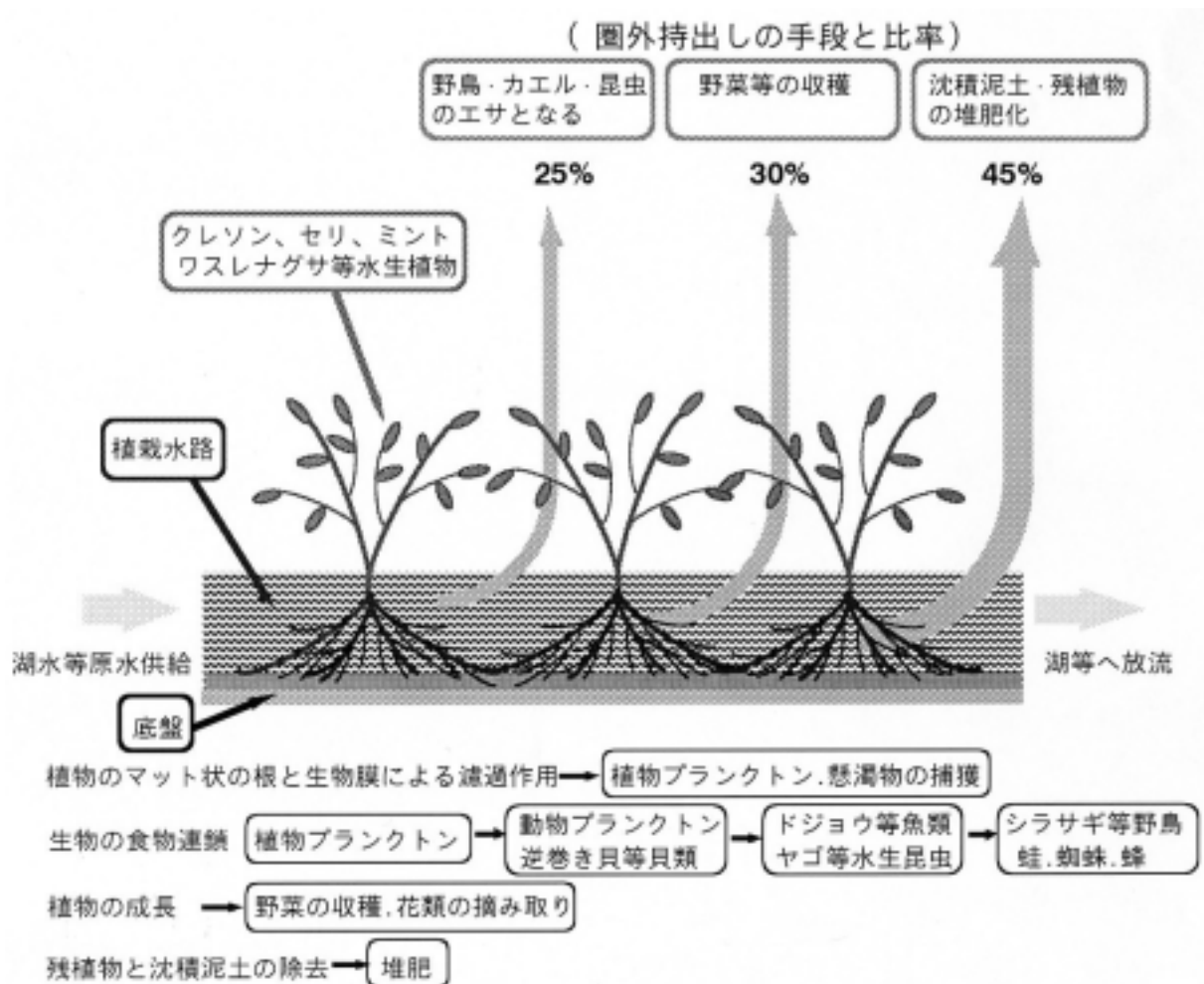


写真 8-3-5 下水処理場で栽培中のカラー



写真 8-3-6 サカマキガイ

魚介類が処理水の放流口に集まる，魚介類を漁獲すればそれらが持っている栄養塩を取り出すことが出来る。卵や幼生として水路に入ったり，処理水放流水路を遡上して水路の中で繁殖成長する魚介類も多く，これを漁獲することも栄養塩の取り出しになる。以上のような仕組みで行われる栄養塩除去の収支は図 8-3-2 のようにまとめられる。



### (3) 特徴

BOD、COD、SS 等の分解処理で消すことが出来る汚濁指標物質ばかりでなく、窒素・リン等 富栄養化の原因となっている物質を水から除去し、何らかの有用な産物に変え、廃棄物を出さない。浄化施設の景観が浄化された水と丈の低い緑で構成され、快適で危険がなく、市民が踏み込んで浄化能力に悪影響が少ないので、公園として一般に開放することが出来る。

一般への開放で浄化の過程を見せながら、浄化産物である野菜や花、堆肥、魚介類の収穫持ち出しに一般市民を参加させることが出来る。

高価な生産物の販売で浄化経費の一部をまかなうことが可能である。

一般市民の関心が高い野菜や花、子供の関心の高い生き物を使って環境教育を実施できるので評判がよく富栄養化問題への理解が深まる。

## 8 - 3 - 2 システムの性能

### (1) 富栄養化湖沼水浄化

#### A 日本に於ける事例

日本では写真 8-3-7 に示す土浦 Bioパークを最大の例として、10ヶ所で河川湖沼水を対象に野菜や花を栽培して窒素・リンや濁りを水から除去し、野菜や花の収穫消費と蓄積する泥の堆肥化活用で施

設から外に持ち出している。近年シジミの増殖と成長によって、シジミ採りが栄養塩持ち出しの新たなアイテムとなっている。土浦ビオパークは既設のコンクリート面を活用して給水施設や通路を仮設した施設で、基礎から作り上げた恒久施設としては写真 8-3-8 に示す木場潟ビオパークがある。



写真 8-3-7 土浦ビオパーク



写真 8-3-8 木場潟ビオパーク

## B 浄化成績

土浦ビオパークは 7 年間、木場潟ビオパークは 2 年間の実績があり、表 8-3-1 に示す年平均の浄化成績が算出されている。

表 8-3-1 仮設施設土浦ビオパークと恒久施設木場潟ビオパークの年間平均浄化成績

分析項目	施設	原水 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	処理水 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	除去率%	除去速度 $\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$
COD	土浦	9.6	8.3	14	4.3
	木場潟	8.2	5.6	32	7.8
SS	土浦	20.9	9.6	54	50.0
	木場潟	16.0	3.3	79	38.1
T-N	土浦	3.7	3.1	15	1.9
	木場潟	1.7	1.1	36	1.8
T-P	土浦	0.12	0.09	27	0.16
	木場潟	0.13	0.07	47	0.18

## C 浄化能力及びコスト比較

異なった条件の下で実施される浄化技術の効率を比較するのは困難だが、水系の汚濁物質収支に影響を与える能力を比べるには除去速度比較が有効である。除去速度は処理原水濃度に比例するので、各技術の原水濃度除去速度相関直線を同一の図上に表示すると浄化効率が明確に比較でき、各技術で特定の濃度の原水を処理した場合に得られる除去速度が判る。富栄養化した湖沼水を浄化し、窒素・リン等を除去出来る実用段階のシステムは少なく、比較可能なデータを詳しく公表しているのは、バイオモジュールに脱窒とリン除去の装置を組み合わせた方式と、植生湿地で汚濁水を浄化するシステムしかない。ビオパークの土浦と木場潟のデータ及びリンについてはタイで実験したビオパークデータを加えて図 8-3-3~4 に示す。ビオパークシステムは他の方式に比べてこの濃度範囲では除去効率が

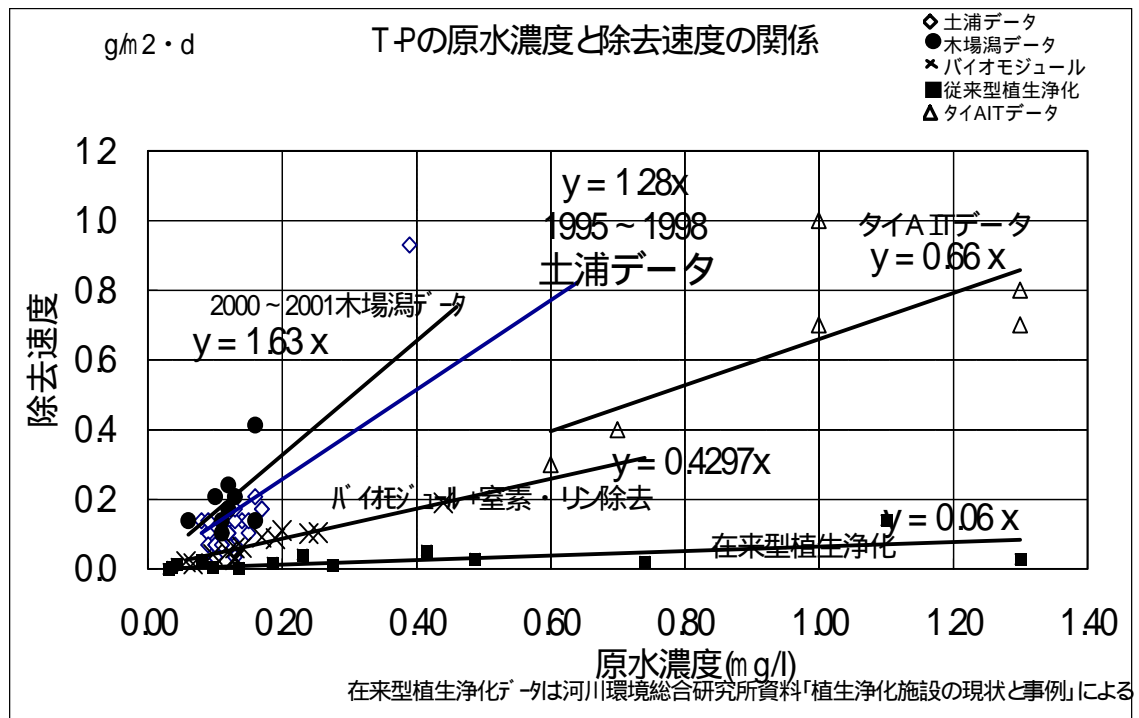
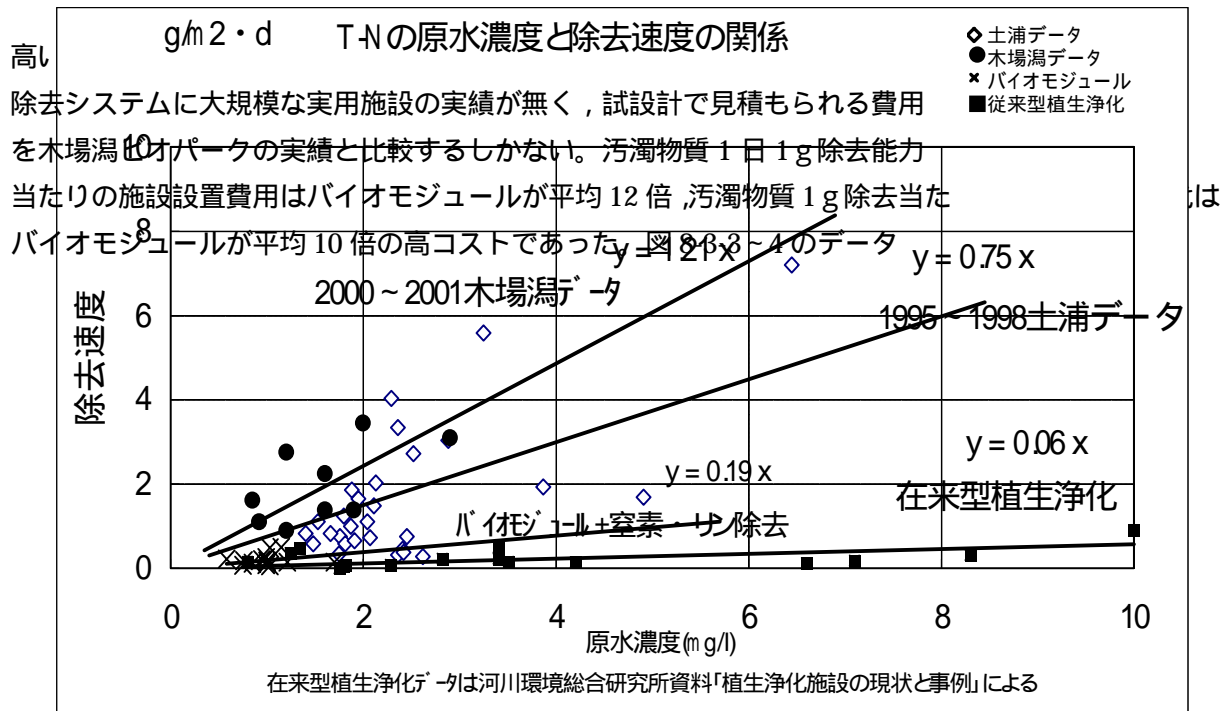


図 8-3-3 ビオパークシステムにおける窒素、リンの除去能



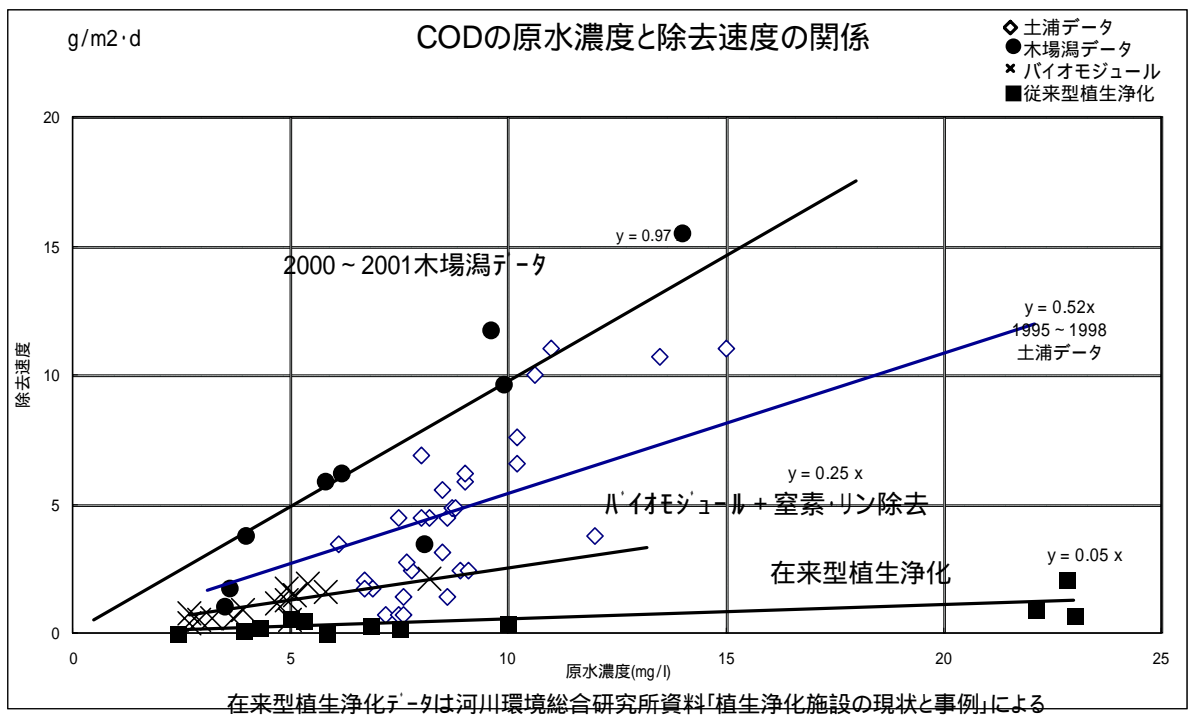
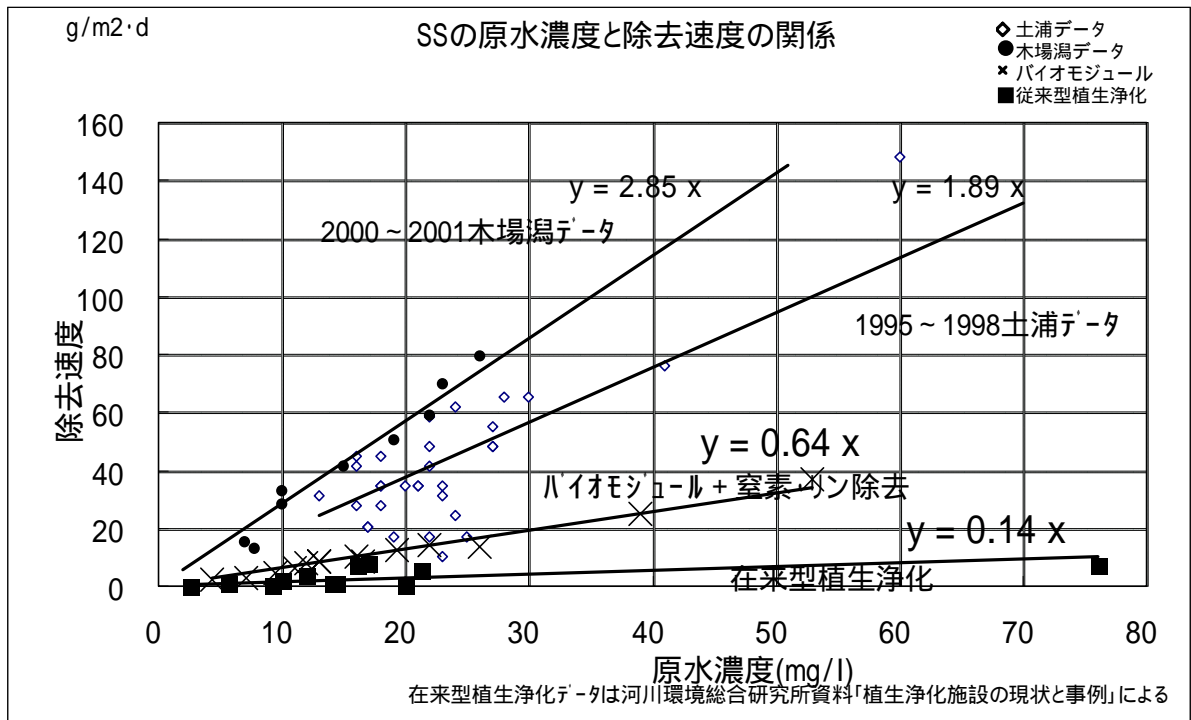


図 8-3-4 ピオパークシステムにおける SS, COD の除去能

のばらつきから判るように、ピオパーク方式は処理水の水質保証を求められる事例には不適で、高い除去率のみを求められる事例にも向かない。水から出来るだけ多くの汚濁物質を除去するように求められる事例に適している。

## (2) アオコ除去

### A アオコ除去のメカニズム

ビオパークで根茎マットに形成される生態系には、匍匐遊泳性のワムシや水生ミミズなど比較的分散したアオコを食べる動物が高密度で棲息している。また、通常生物膜を食べているサカマキガイやモノアラガイなどの小型の巻き貝が、大きな固まりを形成して根茎マットに付着したり、水面に浮いて茎などに堰き止められたアオコを好んで食べる。これらの作用によりアオコは消費され、同時にミクロキスチンもこれらの動物による消化あるいは細菌の作用等で分解される。

### B 日本での事例と効果

土浦ビオパークと手賀沼実験ビオパークで原水としてアオコ混じりの湖水が供給され、アオコの処理が行われた。土浦ビオパークではアオコが原水に混じるとSS、T-N、T-P濃度が高まり、表8-3-2に示す高い除去率と除去速度が得られた。このSS除去速度からアオコの水分含有率を98%と仮定して除去されるアオコの生重量を計算すると1m<sup>2</sup>当たり1日7.4kgになる。

表8-3-2 アオコが吹き寄せた際に得られた浄化成績

	原水濃度	処理水濃度	除去率	除去速度
SS	5.6 mg/l	1.4 mg/l	75%	1.48 g·(d·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>
T-N	6.5 mg/l	3.5 mg/l	46%	1.06 g·(d·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>
T-P	0.41 mg/l	0.15 mg/l	64%	0.93 g·(d·m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>

手賀沼でアオコを含む原水の処理中にミクロキスチンの濃度変化を異性体毎に調査したところ、図8-3-5のような結果を得た。原水中の濃度が低いYRの処理水中の濃度が検出限界を下回ったが、LRの除去率は76%で、除去速度は3.84mg·(d·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>、RRの除去率は68%で、除去速度は7.14mg·(d·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>と高い除去効率であった。

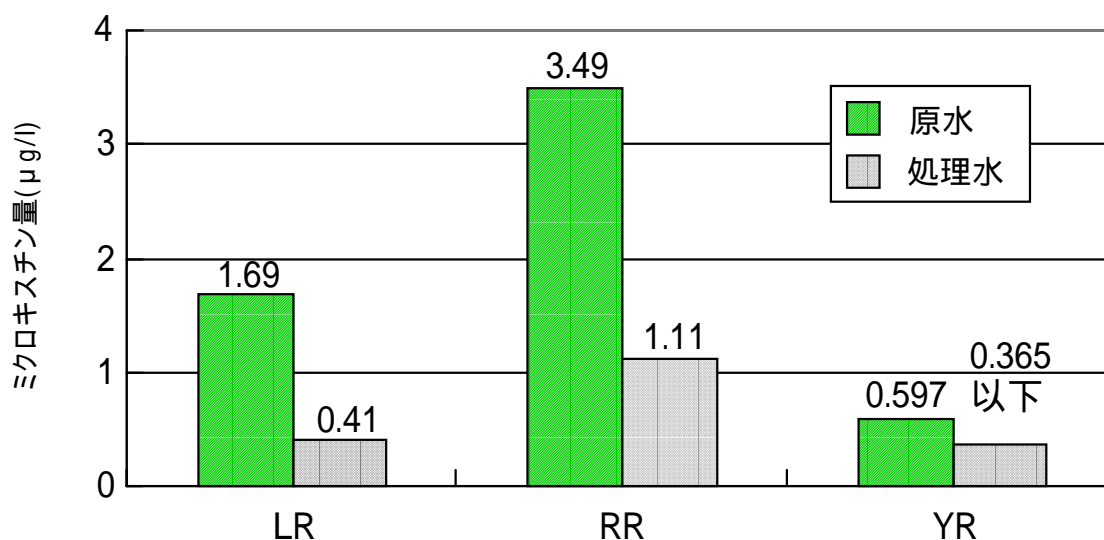


図8-3-5 ビオパーク浄化法の手賀沼におけるミクロキスチンの除去特性

### (3) 下水処理水の浄化

#### A 概要

植物が栽培できる BOD<sub>20</sub>  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下（クウシンサイ使用ならば  $50 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下）まで処理が進んだ水に対しては、ビオパーク方式が応用できる。日本では下水処理場での実験を元に集落排水処理施設 3ヶ所でビオパーク方式を使った最終処理が行われている。水路にカラーを栽培し窒素・リン等を除去しながら花を生産している写真 8-3-5（下水処理水で育つカラー，花の収穫直後）のような事例がある。

#### B 浄化と収入の成績

集落排水を処理原水としているので給水量と質の変動が大きく、断片的なデータの報告しかない。表 8-3-3 はカラーとクレソンなどを混植した施設に於ける浄化成績である。

表 8-3-3 高知県春野町クリーンセンター諸木付属ビオパーク運用 50 日目の浄化成績

	集落排水処理水（原水）	ビオパーク処理水	除去率
SS	$1.8 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	44%
COD	$4.7 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$3.5 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	26%
BOD	$2.1 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.3 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	38%
T-N	$7.07 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$5.56 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	21%
T-P	$1.35 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.11 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	18%

表 8-3-4 は 1996 年 4 月に運用を開始し、カラーだけを栽培して花を収穫販売しているが泥除去を行っていない長野県下伊那郡喬木村富田浄化センター付属ビオパークの、3ヶ月平均の除去速度である。報告には原水濃度や処理量が掲載されておらず、SS、BOD、COD等の汚濁指標は若干悪化したと記述されている。

表 8-3-4 窒素・リンの期間別平均除去速度（単位は  $\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ）

	1997年		1998年	
	窒素除去速度	リン除去速度	窒素除去速度	リン除去速度
1～3月			0.56	0.08
4～6月			1.01	0.12
7～9月	0.54	0.03	0.81	0.15
10～12月	0.57	0.05	0.75	0.15

表 8-3-5 は同じ施設に於ける収入と支出の結果である。施設で使われる電気代と維持管理の人件費を除いた収支であるが、その他の維持管理費を花の売却でまかなえとの結論が報告されている。また売却単価は、消費地から遠く地域の零細な花卉業者に買い取られているため、花市場における生産者価格の  $1/2 \sim 1/4$  であり、他の場所ではもっと多くの収益が期待できる。

表 8-3-5 施設の設置及び維持管理収支（単位は千円）

		1995年	1996年	1997年	1998年
収入	花売却		15	205	362
支出	施設費	15,324		581	189
	資材費		375	283	
	種苗費		1,506	77	
	光熱費		15	67	44

### 8-3-3 システムの波及効果

#### (1) 途上国におけるシステムの普及

##### A 総論

システムの性能でふれたようにビオパーク方式の水耕栽培浄化は低コストで売り上げが見込める場合もある。発展途上国に技術導入した場合、特別な装置や資材及び消耗品を必要としないので現地のやすい資材と安価な労働力を使い、設置費と管理運営費を安くまかなうことが可能である。モデル施設が低コスト浄化に成功すれば自治体等に広く普及するだろう。また、現地で高価な野菜や花を生産できれば経済的にも成功することが可能で、周辺の農家等が進んで取り入れる可能性もある。

##### B タイの事例と試算

タイ王国バンコクの北郊外に位置する AIT(アジア工科大学)構内に写真 8-3-1 に示す 100 m<sup>2</sup>のコンクリート製ビオパークを建設したとき、建設費は約 25 万円で日本で同様の施設を建設する場合の 500 万円の 1/20 であった。バンコク近郊では、暑さのために在来農法ではクレソン栽培が不可能で、スーパーでは 1 kg 当たり約 580 円で売られていたが、ビオパーク方式では栽培可能であった。生産者価格を半額として日本での 1 m<sup>2</sup>当たり月平均生産量 2.5 kg から 100 m<sup>2</sup>の売上を計算して建設費償還期間を試算すると 2 ヶ月になる。現状では品質や生産量が低く償還に 1 年以上かかるだろうが、浮島栽培との連携や漁獲を含めて総合的に活用すれば経済性の確保は容易と思われる。

##### C 中国の事例と試算

中国では、江蘇省無錫市に面した太湖の内湖「五里湖」で湖上に突き出した栈橋上のコンクリート面を使い、写真 8-3-10 のようにレンガを並べ、写真 8-3-11 に示すクウシンサイの畑から溝に伸びだしている茎を買い、溝の中から巻貝を拾って茎と巻貝を水路に配置し、ポンプで湖水を汲み上げて流した。2 ヶ月間にクウシンサイは写真 8-3-12 のようによく繁茂し、アオコ混じりの水が浄化された。本格的な施設の建設は未経験なのでコスト評価はできないが、100 m<sup>2</sup>の建設費を日本の 1/10 である 50 万円として、クレソンとクウシンサイを季節に合わせ交互に栽培する仮定で試算を行った。市場で農民が直売していた価格 1 kg 当たり 150 円と、1 m<sup>2</sup>当たり月平均生産量 2.5 kg から 100 m<sup>2</sup>の売上を計算して建設費償還期間を試算すると 13 ヶ月になる。クウシンサイが真夏には安くなってしまうことと、クレソンがあまり出回っていないことなど問題はあがるが、浮島栽培との連携や漁獲を含めて総合的に活用すれば経済性の確保は容易と思われる。

#### (2) 種苗の供給基地

##### A 浮島向け種苗基地

図 8-3-1 に示したようにビオパークで成長させ、根茎マットで栽培床を自作した植物を苗として浮島に配置することが考えられる。「8-4 水生植物植栽浄化システム」の中で詳しく述べるように浮き植栽

にバイオパーク苗を使うと、浮島を安価にでき、クレークや内湖における浮き植栽の生産性を向上させ、浮き植栽を実施できる水質範囲を広げ、株全体の陸上処分や交換を容易にする波及効果が期待できる。

## B 種苗の相互供給

クウシンサイは温帯では夏に成長が早いですが冬越しが難しく、種や根の発達していない挿し穂から育てると初期成長が遅い。クレソンは高温に弱く夏に品質が落ちたり枯れたりし、種からの育成が難しく、挿し穂から育てると初期成長が遅い。両者ともバイオパークで生育中の植物を苗として導入すればはじめから高い成長性を示す。日本ではクウシンサイのバイオパーク苗を亜熱帯から持ち込むことが植物検疫の関係で不可能だが、広大な中国や高原と低地を有するタイなどでは気候に合わせた苗の移動が容易で、適季適作が実現し、生産性と浄化効率の最大化が実行できる。

### (3) 浄化に有用な動植物の増殖と漁獲

#### A 浄化有用動植物の増殖と拡散

土浦バイオパークでは、浄化の対象としている霞ヶ浦でほぼ絶滅状態となっていた二枚貝が5種類定着し、周辺でも復活しつつあることが確認されている。二枚貝は流入河川に生き残っていたが、土浦入りでは底質や低層水質等の悪化で死滅していたもので、流入河川から放たれた卵や幼生がバイオパークで増殖し、現在は周辺に卵や幼生を放っている。バイオパークによる水質改善で、周辺に二枚貝が生存できる環境が出来たことも周辺での復活を助けているようだ。沈水植物についても事情は同じで、処理水を湖に戻す水路に沈水植物が繁茂し、周辺の湖底にも沈水植物の繁茂が散見されるようになった。ワムシやミジンコ、サカマキガイなどが処理水に乗って周辺に流れ出していることも確認されているがその水質改善に対する効果は不明である。発展途上国にバイオパーク技術を導入した場合にも同様の波及効果が期待できる。

#### 魚介類の集合と漁獲

バイオパーク植物植栽水路への原水供給口付近に渦巻きができる、シジミが大量に集まることがわかっている。また写真 8-3-2 のようにバイオパークから処理水を河川湖沼に放流する地点には多数の魚が集結する様子が観察される。これらの漁獲は容易で、これを販売することによって水系から栄養塩を取り出すとともに収益が期待できる。バイオパークから魚介類の卵や幼生を放流し、餌となる微生物を撒き散らしながら成体を漁獲するので、乱獲等漁獲による負の影響を心配する必要のない漁業が成立する。

### (4) ノウハウの蓄積と交流

バイオパーク方式の基本的な原理と効果は判明しているが、施設を設置した環境やそこに供給される水の質によって現れる動物が異なり、植物の成長にも差異が生じる。たとえばシジミは琵琶湖湖岸に設置されたバイオパークではじめて爆発的に増殖し、他の施設での発生予測と浄化利用実験計画作成が可能となった。また、タイ王国の実験施設に海で産卵し川で成長するカニが入り込み成長していた。これは中国で上海ガニとして珍重されているカニと同類で、中国の揚子江流域にバイオパークを設置した場合、上海ガニがバイオパークにひきつけられ進入して成長することを予測させる知見である。中国でウナギ以上に珍重されるタウナギがバイオパークに住み着くことも日本で確認済みで、このような知見を元に浄化施設の収益性を高めることが可能である。

発展途上国でバイオパーク方式を実験し設置する場合、目的や立地条件等の情報を持って巻末の筆者連絡先に問い合わせれば詳細な最新のノウハウを提供できる。

#### <参考文献>

1) 財団法人河川環境管理財団河川環境総合研究所：植生浄化施設の現状と事例，河川環境総合研究

所資料第三号(2000)

- 2) 中里広幸：ピオパーク方式による作物生産を通じた浄化，用水と廃水，40(10)867～873(1998)
- 3) 相崎守弘，中里広幸，皆川忠三郎，朴済哲，大橋広明：水耕生物ろ過法と酸化池の組み合わせによる下水処理水の高度処理，用水と廃水，37(11)，892～899(1995)
- 4) 長野県喬木村環境水道課，日本農業集落排水協会農村水質工学研究所：農集排水処理水を活用した花き水耕栽培の試み，月刊生活排水，Aug，30～35(1998)

(株式会社トップエコロジー：中里広幸)

## 8-4 水生植物植栽浄化

### 8-4-1 システムの原理，特徴

#### (1) システムの原理と分類

##### A 基本原理

富栄養化は，植物の成長に欠かせず，不足すれば植物の生長増殖を制限することのある塩類が，水中に過剰になることによって植物プランクトンが過剰になり，水を濁らせ様々な問題を引き起こす現象である。植物プランクトンにとっての栄養塩は維管束植物にとっては肥料であり，これを互いに取り合う関係がある。また，維管束植物が水面又は水上に葉を茂らせれば植物プランクトンの増殖に不可欠な光が遮られ，この面からも植物プランクトンの増殖が押さえられる。このような観点から水生植物を繁茂させ，植物プランクトンから栄養塩と光を奪う研究が行われ，実用化されてきた。

##### B 分類

水生植物植栽浄化システムは，生育環境造成管理と浮き植栽に大きく分けられ，生育環境造成は，使う植物の生活型によっていくつかに分類できる。沈水植物を使う浄化は8-7で特別に取り上げる。ホテイアオイなどの浮漂植物を使う浄化は日本では各地で試みられているが，雑草化する例が多く効率が悪いことから普及しておらず，途上国では雑草なのでここではとりあげない。浮葉植物を使う浄化は実用化されておらず，ヒシ及びジュンサイの収穫が栄養塩の回収に役立っているようだが，浄化を意図したものではない。中国ではヒシとジュンサイが大量に栽培消費されており，浄化への転用が可能と思われるが詳細は不明である。従ってここで取り上げるのは抽水植物の生育環境造成管理による浄化と浮き植栽である。

##### C 抽水植物生育環境造成管理の原理と利点

汚濁した河川湖沼水を氾濫原や遊水池等の在来又は人工的に造成した植生湿地に導入し，抽水植物による遮光で植物プランクトンの増殖を阻害しながら，植生の根茎に生じる生物膜による有機物の捕捉分解と，植生の栄養塩吸収によって水を浄化し，河川湖沼に放流するシステムである。栽培される植物はアシが主体で，水深が深くBOD濃度が高い場合はマコモやガマが適する。これらを最初に定植しなくても数年でアシに代わって繁茂してくることがあり，水質に適合した植物の方が成長による栄養塩の吸収などが盛んなので，3種を混植して競争させるとよい。給排水システムと水の流れを導く堤防などを造る必要があるが，自然流下で水を供給できるならエネルギー消費はなく，給水又は

排水にポンプを使うとしても維持管理コストは安い。抽水植物には図 8-4-1 に示すように葉から茎根に向けて酸素を供給し、根や茎から周囲の水や泥に酸素を放出して自らの組織を守っている植物が多い。アシ、マコモ、ガマはこの能力を持っており、結果的に泥の中に嫌気好気の隣接状態を作り出し、脱窒を促進する。嫌気状態が解消される結果メタンガスや亜酸化窒素のような温暖化ガスの発生を抑制する効果も確認されている。途上国で簡単に実施できる下水処理方法として酸化池処理があるが、BOD濃度が  $50\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  程度まで処理され、抽水植物が生育可能となった水は酸化池処理ではなく抽水植物生育環境造成管理によって処理したほうが効率的で、温暖化ガスの発生等の弊害を抑えることができる。

さらに温暖化ガスの発生を抑え、窒素・リンをはじめとする汚濁物質の除去率を高める方式として浸透流方式がある。これは処理原水を湿地土壤に浸透させ、湿地の水位を土壤面より低くする方式で、処理中の水が土壤の間隙を満たしている層の上に、水と空気が土壤間隙を分け合う好気層が形成される結果メタンが酸化され亜酸化窒素の発生する還元層が少なくなる等の効果が得られる。水面が土壤

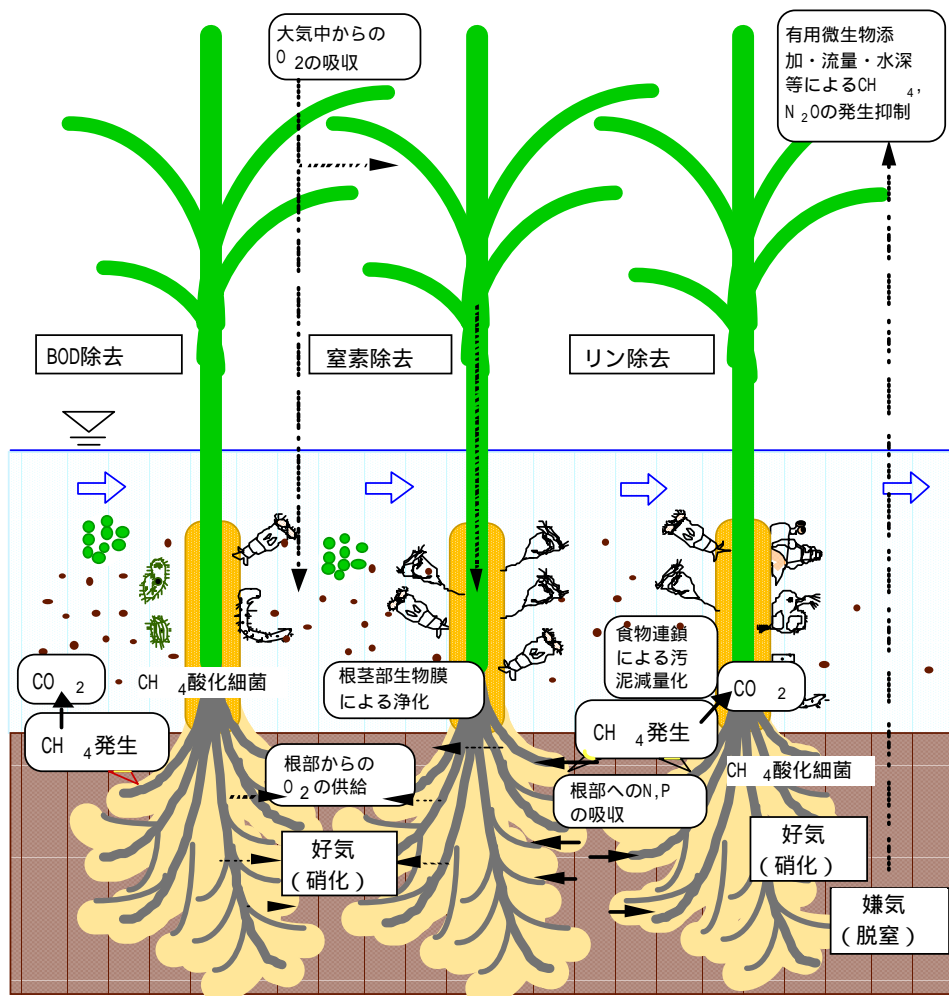


図8-4-1 生態工学手法を用いた植物による浄化および温室効果ガス発生抑制対策の機構

の上にある方式では抽水植物の茎の間をすり抜けてあまり処理されずに流出する水があるが、浸透流方式では土壌粒子の間を通りながら汚濁物質がろ過・吸着されるので高い除去率が得られる。ただし浸透で処理できる水量が少ないために表面流よりも除去速度はるかに少なくなることと、原水供給と処理水の取り出しの間に大きな落差をつける必要があり、施設の造成やポンプの設置と運転などの面で高コスト化が避けられないので、途上国には勧められない。

#### D 抽水植物生育環境造成管理の問題点

植物に直接吸収されたり植物根茎上の生物膜に捕らえられ泥となって水底に沈む栄養塩のうち、窒素は植物の根による酸素供給と消化細菌等による脱窒作用で除去されるが、リンは気化しないので植物に吸収されても湿地生態系の中に止まり、昆虫が飛び出したり鳥が餌を食べて外で糞をするなどの過程でしか持ち出されることがない。他に泥が厚くなると地層化して生態系の循環からはずれることもあるが、抽水植物には堆積した泥からリン等を吸収して地上に持ち上げる「栄養塩ポンプ」と呼ばれる作用があり、水生植物植栽浄化に於いて地層化による除去はあまり期待できない。除去能力を維持するためには植物を刈り取ったり蓄積した泥を掘り出して陸上処分しなければならないが、利用価値が低くて処分費用がかさむために日本ではあまり行われていない。

抽水植物は図 8-4-1 のように酸素を泥の中に供給するが、泥の表面や水中に根を出すことは少なく、湿地を流れる水にはほとんど酸素を供給しない。同時に抽水植物は葉や茎を順次更新し、古くなった茎葉を水に落とす。湿地に導入される水が富栄養化した河川湖沼水や酸化池で処理された水であれば、導入の時点で過飽和の酸素を保持していることが多いが、そのような水は有機物もっており、湿地における酸化分解過程で酸素は消費される。



写真 8-4-1 酸化池法流水

湿地に導入されてから植生湿地を出るまでの流れや時間が長いと抽水植物による遮光で光合成は行われないのに、古い茎葉が分解のため酸素を消費して水が嫌気化してしまう例がある。写真 8-4-1 はタイ王国で酸化池処理後の排水をガマを主体とする浄化湿地に導入処理した後の放流口で、流れの底面がすべて嫌気状態を示す白色硫黄細菌で覆われている。

#### E 浮き植栽の原理と利点

河川湖沼の水上にフロート付きの栽培床を浮かべて植物を栽培し、植物根茎に生じる生物膜等により濁りを捕捉して生態系の作用で泥にして落とし、植物が成長する際に栄養塩を吸収し、水面下に対する遮光で植物プランクトンの増殖を抑制することによって汚濁の解消を目指すシステムである。浮漂植物は水に浮かび水中に垂らした根で溶存態栄養塩等を吸収するだけで成長することが出来るが、他の生活型の植物は土壌に根を張り、そこから栄養塩や微量の必須ミネラルを吸収することによって成長するように出来ていて、根が水中に垂れているだけでは成分欠乏によって成長が阻害されてしまうことが多い。水上に抽水植物を浮かべて栽培するには、スポンジや網の束、ヤシ殻マットなどの栽培床を水面下に配置し、そこに植物を植え付けるしかない。栽培床に付着した生物膜とそれを食べる動物や有機物を分解するミミズなどが栽培床に栄養塩や微量必須ミネラルを含む泥を蓄積し、抽水植



物は水中に垂らした根による吸収で不足する分を栽培床から補って成長する。

#### F 浮き植栽の問題点

栽培床に泥が溜まると栽培床の内部で酸素が欠乏して植物の中には枯死してしまうものが出る。また泥の蓄積と植物の成長によって浮き植栽は沈下し、収穫や冬枯れによって浮き上がることになり、



写真 8-4-2 ヨシに覆われた浮島

不安定なためによく生育する植物に限られる。こうしたことから手入れをしない浮き植栽ははじめに多様な植物を配置しても写真 8-4-2 のように数年でアシに覆われてしまうことが多く、苗を導入するなどの栽培管理を行えばクウシンサイが

よく成長する(写真はヨシに覆われた浮島)。植物の根茎は生物膜を発達させる濾材や魚介類の産卵床、稚魚やエビの隠れ家として有用だが、魚介類の漁獲や成長した植物の収穫が行われなければ、苗が生長する 1 年目以降は栄養塩除去対策としてあまり効果がない。

### 8 - 4 - 2 システムの性能

#### (1) 抽水植物生育環境造成管理の性能

##### A 概論

8-3 で述べたバイオパーク方式では植物の根茎の多くが生物膜の巨体として働き、その表面積が莫大なものになるのに対して、浄化に使われる大型の抽水植物は根のほとんどを泥の中に伸ばして水中にはあまり出さないため、生物膜の面積が遙かに少ない。このため単位面積当たり 1 日に浄化できる水量、除去出来る汚濁物質の量などが少なく、水系の物質収支を明確に改善するのに必要な面積が広大になってしまう欠点がある(図 8-3-3~4 参照)。水底に蓄積する泥や成長した植物の持ち出しを行わずに長期間浄化を続けていると、富栄養化の原因である窒素・リンを除去出来なくなる。

##### B 事例

栃木群馬埼玉の 3 県にまたがる渡瀬調整池の水質を改善するために、渡瀬遊水池のアシ原を堤防で区切り、導水路と排水路などを造って調整池の水を写真 8-4-3 に示すアシ原に流し、調整池に戻す施設が 20 ヘクタールの規模で日本最大である(写真は水を流したためによく成長しているヨシ)。1 日 26 万 m<sup>3</sup> を処理し、当初、年平均で窒素 27%、リン 6%、クロロフィル a 57% の除去率を得たが、2 年目以降窒素・リンの除去がほとんど行われなくなっている。他には川から分水してヨシなどの植生を植え付けた水路に導入し、植生水路を通った水を再び川に合流させる施設が各地で建設されている。成長した植物の回収除去が困難で、活用方法が無く、単位面積当たりに除去出来る栄養塩や有機物質の量も少ない。一見自然環境の復元のようなのだが、アシだけが異常に成長して他の植物が失われるなど

の問題が自然保護団体から指摘されている。しかし初期の建設費と維持費が安いことから多くの実践事例がある。

## (2) 浮き植栽の性能

### A 概論

浮き植栽の浄化性能は、評価が難しい。植物根茎に生じる生物膜等により濁りを捕捉して泥にして落とすことは水の浄化ではあるが底質の悪化につながる。植物が成長する際に栄養塩を吸収しても持ち出しがなければ栄養塩はそこに止まる。水面下に対する遮光は湖沼面積に対する比率が低い場合にはほとんど効果が現れない。植物の根茎を餌場や幼生期の隠れ家とする魚介類が水の浄化に果たす役割や成長後の漁獲は評価が困難であるし、水上部分に形成される生態系から昆虫の飛び去りや鳥の糞などの形で陸上に戻る栄養塩の量を捕らえるのも困難である。こうしたことから浮き植栽の効果に関する報告はきわめて少ない。

### B 事例と性能報告

日本では霞ヶ浦に比較的大規模な浮き植栽があり、秋田県八郎潟、千葉県の手賀沼・印旛沼、佐賀平野のクリークなどで実験や実践が行われている。タイの比較的汚濁の進んだクリークでは農民によって水上栽培が広く行われている。杭や水に浮かべた竹にクウシンサイ等をくくりつける方法であるが、汚濁の進んだクリークで水上栽培を繰り返している株の分割によって栽培を始めており、根には生物膜や水生昆虫が付いている。これに対して日本では、筏に栽培床を取り付け、苗又は種を植え付ける方法で栽培を行っており、印旛沼では水の出入りの少ない水路を清澄にしたとの報道もあるが、筏の作成に手間と費用が掛かり、苗や種から収穫できるまで成長するのに時間が掛かり、老化した株の回収除去が困難である。

霞ヶ浦に設置した植栽に於ける植物の生長量を問い合わせ、回答を得た数値から計算したところ初年度成長期の栄養塩吸収量は、除去速度として T - N が  $0.4\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 、T - P が  $0.02\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  であった。同時期に隣接する土浦バイオパークで得られた年平均の除去速度は T - N が  $1.9\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 、T - P が  $0.08\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  であり、除去効率は浮き植栽がおよそ 1 / 4 であった。バイオパークの植物は頻りに収穫され泥も全て取り出されるのでこれだけの差が出ることになる。浮き植栽からの植物収穫は船で渡って足場の悪いところで作業し、かさばる物を船に積んで帰るために困難を極め、ほとんど行われていない。

国土交通省は渡瀬調整池に水面積  $24\text{m}^2$  水深  $2\text{m}$  の隔離水槽 3 基を設置し、1 槽をコントロールとし、他の 2 槽に  $8\text{m}^2$  の植生浮島、 $8\text{m}^2$  の遮光浮島、をそれぞれ浮かべてその後の水質変動等を測定した。その結果クロロフィル a 濃度がコントロールで  $60 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  に増加したのに対して遮光と植生の浮島槽はともに  $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  程度に低下した。トータル窒素濃度はコントロールが  $1.6\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  に対して遮光浮島は  $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、植生浮島槽は  $0.4\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  となり、効果が見られた。

## 8 - 4 - 3 システムの波及効果

### (1) 抽水植物生育環境造成管理の波及効果

#### A システムの普及

抽水植物そのもの及びその生育環境で増殖する魚介類に価値があるかどうかで普及するかどうかが変わってくる。日本ではヨシの茎葉に全く価値が無いが、中国では紙の材料や飼料として利用価値があ



写真 8-4-3 渡瀬遊水池のアシ原



写真 8-4-4 中国玄武湖の浮き植栽



写真 8-4-5 中国太湖の浮島



写真 8-4-6 タイ王国の浮島植栽



写真 8-4-7 簡易植栽筏



写真 8-4-8 竹を活用している中国の建設現場

る。中国では食用マコモが広く栽培されており、このマコモを使えば水を浄化しながら野菜を生産することが可能である。中国から東南アジアにかけての地域では淡水性の魚介類が盛んに食べられており、抽水植物による浄化湿地を漁獲の場として活用することが考えられる。但しこれらの地域では水田耕作に低湿地が活用し尽くされており、休耕地の活用などが考えられる。低湿地の耕作や淡水魚介類の食材利用が進んでいない地域では、低湿地の浄化湿地への転用が比較的容易だが、産物の利用技術や消費ルートがないのでこの面の技術導入が必要になる。

## B 周辺環境への影響

浄化湿地そのものに収益性が無くても、水の浄化に働く動植物の聖域となり、処理水とともにそのような動植物が流れ出して周辺に広がり水の浄化能力を高めることがある。また、有用魚介類の聖域となって周辺に卵や幼生、稚魚などを供給することも考えられる。但し植生浄化施設の流程が長すぎたり滞留時間が長すぎると下流の水が貧酸素になり、有用生物が流下中に死んでしまったり、処理水放流先で酸素が不足するなどの弊害も起こる。

### (2) 浮き植栽の波及効果

#### A システムの普及

湖沼の波浪に耐える浮島は、日本と写真 8-4-4～5 に示す中国で大規模に設置されているが、波浪に耐える構造に費用が掛かる割には経済的に価値のある生産物を得られない（写真 8-4-4：南京玄武湖上の浮き植栽、写真 8-4-5：無錫市に面した太湖の内湖五里湖上に配置された浮島）。それに対してクリークを使ったクウシンサイとミズオジギソウの浮島植栽は写真 8-4-6 のようにタイで盛んに行われており、経済的に成り立っている（写真はバンコク郊外のクリークで栽培されているクウシンサイとその収穫）。但し茎でつながった群落の 2ヶ所を竹の杭などで固定したり、2本の杭の間に竹を浮かべてこれに茎を縛り付けるなどしており、根茎に付く生物膜と動物の作用で栄養塩を得ているために比較的汚濁したクリークでのみ実施されており、畑に溝を掘って栽培される場合は肥料を投入している。

栽培可能な水質の範囲を広げると同時に、古くなった株の除去を可能にする観点から筆者は、簀の子状に竹を編み、フロートを付ける簡易な浮島を考案し、そこにクウシンサイ等を乗せて栽培実験を行い、順調に成長すること、老化した株を筏から引き剥がすことが容易であることを確認した（写真 8-4-7：竹を編みペットボトルの浮きをつけた植栽筏）。水質が清澄であるほど植物の成長に浮島上に形成される泥が必要なので、割った竹の内側に出来る円弧の大きな植生筏を使う。中国で建設現場の足場板や横板として簀の子状に編んだ竹が大量に使われており、広範囲の水質に適応可能な形状を持っている。この中古品を使えば、非常に安価にクリークに於ける水上栽培が実現する（写真 8-4-8：筏に最適の竹簀の子）。また、ピオパークでマット状の根茎と生物膜を発達させた植物を切り分けて苗としてこのような筏に配置すると初期成長が早くなることも確認済みである。

## B 周辺環境への影響

浮島は水の浄化に働く動物の隠れ家であり増殖の場である。動物は増殖とともに周辺に散らばり水の浄化能力を高める。また、有用魚介類の産卵の場となり、幼生や稚魚の隠れ家となっており、周辺の漁業生産性を高める効果がある。浮島は遮光によって水中の光合成を阻害し、酸素欠乏を招く危険が考えられるが、ピオパークシステムの実験でクウシンサイは夜間も水中に酸素を供給していることが判った。浮島にこのような性質を持つ植物を栽培すれば酸欠による魚介類への被害は心配ない。

### <参考文献>

- 1) 田中周平，藤井滋穂，山田淳，市木敦之：ヨシ生育に及ぼす水位及び地盤変化の影響，水環境学会誌，24(10)，667～672(2001)
- 2) 大島秀則，唐沢潔，中村圭吾：人工浮島による水質浄化実験，第35回日本水環境学会年会講演集，146(2001)
- 3) 中村圭吾，島谷幸宏：人工浮島の機能と技術の現状，土木技術資料，41(7)，26～31(1999)

(株式会社トップエコロジー：中里広幸，筑波大学生命環境科学研究科&バイオレックス株式会社：稲森悠平)

## 8 - 5 ばっ気循環浄化

### 8 - 5 - 1 ばっ気循環浄化システムの原理と特徴

#### (1) ばっ気循環浄化システムの特徴

湖沼やダム貯水池において、リンや窒素が充分にある場合（リンでは  $0.02\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上、窒素で  $0.2\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上ある場合、その濃度と面積あたりの負荷量に応じて、一次生産、即ち植物プランクトンの生産が生じ、様々な利水障害が発生する。

植物プランクトンの種類は大きく分けると、藍藻類、緑藻類、珪藻類の三種類に分けられるが、このうち 藍藻類は毒性物質を産生するミクロキスティスや、かび臭物質を産生するホルミディウム等、様々な利水障害となる種が多い。これらの藍藻類は、光強度に敏感であり、光制限を受けやすいとされている。この性質のためミクロキスティスが代表種であるように湖水の表層に集積したり、種類によっては比較的透明度が良くなる時期に発生したりすることが知られている。

このため、珪藻類や緑藻類に比較して光強度の弱い条件で藍藻類の増殖が抑制されやすいことになる。湖水の鉛直方向の循環を促進すると、平均的な光強度を低減させることができるため、有毒アオコやかび臭を産生する障害プランクトンのコントロールには都合がよいことになる。

一方、近年になって富栄養化が進んだ湖沼では、溶解性有機物の増加が問題となっている。この原因として、植物プランクトンが増殖時に溶解性有機物を生産することと、死滅した植物プランクトンが長期には、腐食質として水中に溶解してくることによると考えられている。

これらの有機物は、塩素作用により発ガン物質のトリハロメタンを生成することが知られており、水の安全性確保の観点から問題視され、これらの発生防止や抑制は急務となっている。

このほか、大量に植物プランクトンが発生した場合、それが死滅すると、水中の溶存酸素を消費するので、無酸素水塊を形成しやすい。また、湖底に蓄積し、深水部での嫌気化を促進する要因となる。湖底の嫌気化により、種々の栄養塩類の再溶出や重金属類の溶出が生じる。ばっ気循環法は、底層部への酸素供給機能も大であり、底層水の好気化対策も兼ねることができる。

なお、植物プランクトンを抑制する必要がある理由をあげると下記のようにまとめることができ、ばっ気循環法はその対策抑制手法として原理的に有効な方法である。

- ・ 微量毒性物質の生産の抑制
- ・ 魚類の鰓障害、斃死事故の防止
- ・ 無酸素水塊の形成の抑制
- ・ 栄養塩の最回帰の促進防止
- ・ 無酸素化による重金属類の溶出促進防止
- ・ 溶解性有機物の増加にともなうトリハロメタン生成能の増加の抑制

#### (2) ばっ気循環浄化システムの浄化原理

ばっ気筒（間欠式空気揚水筒を以下「ばっ気筒」と称する。）による湖水循環の原理は、下記のような、気泡弾による噴流形成と連行混合による密度流の形成過程による。

湖水循環の機構は下記のような素機構で構成されている。

圧縮空気の送気

ばっ気筒下部の空気室への圧縮空気の充満

空気充満後、サイホン効果により気泡弾が上昇

気泡弾上昇と同時に下部より湖水を連行

次の気泡弾の形成で筒内水塊を押し上げ、同時に下層水塊を連行  
とを間欠的に繰り返す。

筒頭部から吐出した気泡弾は、上昇と同時に、水圧が下がるため膨張し、水の抵抗のより  
気泡が裁断され気泡群となって上昇する。

同時に、筒内の水が吐出し、気泡群と水が一体となり、噴流として上昇する。

このとき、表層水を連行し、下層の吸い込み水の水温と連行水温とにより、下層水より軽  
い密度の水塊が形成され、水面上部に到達する。

この水塊は、密度流となり表層より少し下部の等密度層を水平密度流として分散していく。

以上の湖水の機構を模式的に示したのが図 8-5-1 である。ばっ気筒から吐出した噴流状況は写真  
8-5-1 に示した。水面での噴流領域の直径は 20m ~ 20m である。なお、この噴流領域ではボート等  
の転覆等の危険性が当初考えられたが、気泡噴流であるため手漕ぎボートでも安全であることが確かめ  
られている。

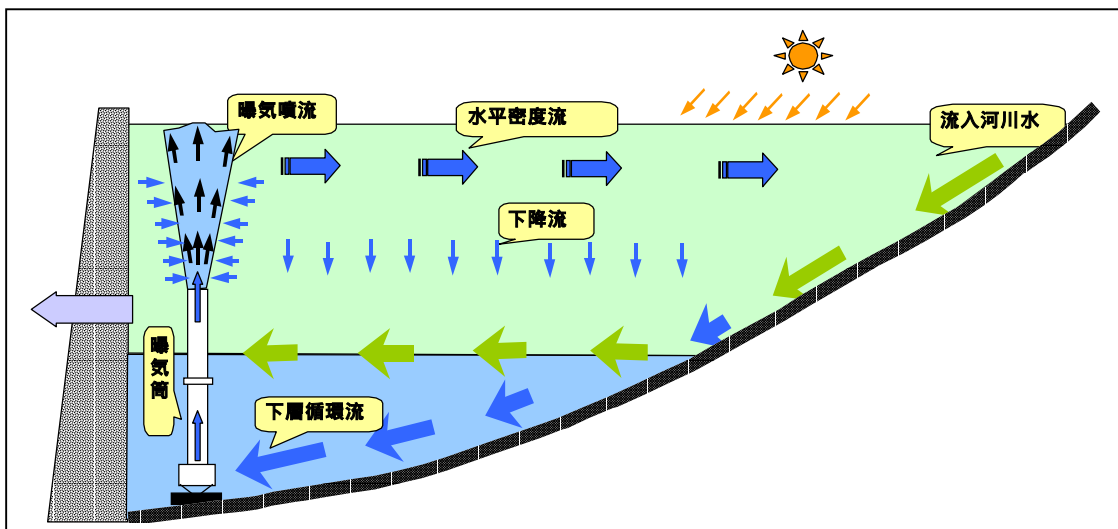


図 8-5-1 ばっ気循環流の模式図



写真 8-5-1 ばっ気筒による噴流状況

## 8 - 5 - 2 ばっ気循環浄化システムの性能

湖水循環による植物プランクトンの増殖抑制原理は、以下三つである。

- ・ 光コントロール効果
- ・ 表層水の希釈効果
- ・ 沈殿促進効果

このうちどの効果が最も大きいかは、流入栄養塩類の形態とか湖沼やダム貯水池の水理的な条件や発生する植物プランクトンの種類によるが、一般的には、「光コントロール効果」が大きいとされている。以下、上記の対策原理のそれぞれについて、ばっ気循環浄化システムがどのような性能をもっているかを述べる。

### (1) 光コントロール効果

光は表層から水深が深くなるにつれ、水による光エネルギーの吸収および懸濁粒子による光の散乱により、指数関数的に光強度が減衰する。一般に光が届く範囲（植物プランクトンの生産にとって）を生産層と称し、透明度の2~2.5倍の水深が経験的な関係とされている。これらの関係からすると、生産層は富栄養化の程度によりおおよそ下記の値をとる。

栄養状態	透明度(m)	生産層(m)
過栄養湖	1 m以下	2 m以下
富栄養湖	1 - 1.5m	2 - 3 m
中栄養湖	1.5 - 2 m	3 - 4 m
貧栄養湖	3 m以上	5 m以上

このように、富栄養化した湖沼では、水深3m以深は光が届かない層（無光層）となっており、この層に植物プランクトンを循環させることができれば、平均的な光強度を低下させ、植物プランクトンの増殖を抑制することができる。この増殖抑制の程度は、対象とする植物プランクトンの光特性によることとなる。

図8-5-2に水深と光強度、植物プランクトンの増殖速度および、単位面積あたりの植物プランクトンの現存量の関係を示した。

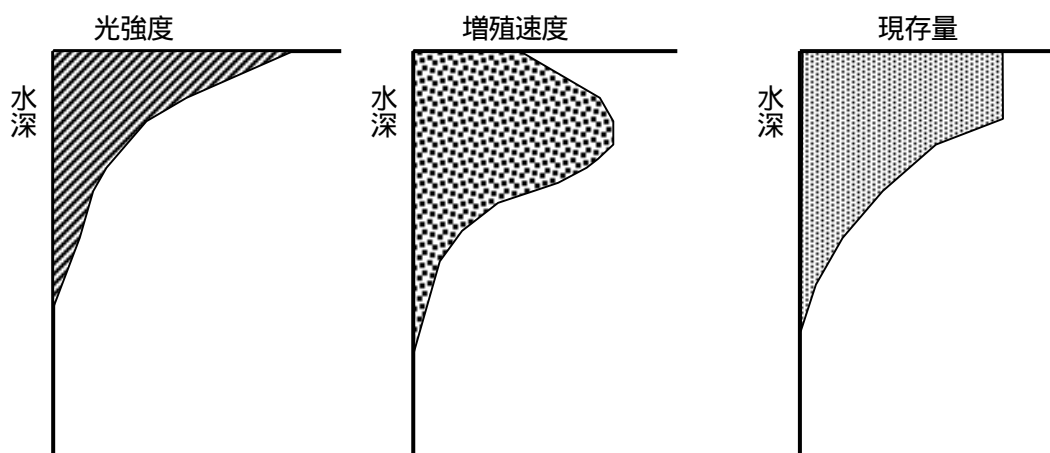


図8-5-2 水深と光強度，増殖速度，現存量の関係

図8-5-2から、混合水深と藻類濃度の関係を模式的に示すと図8-5-3のように示される。これらの

関係から，さらに水深と現存量の関係を模式的に示したのが，図 8-5-4 である。この関係から，人為的に混合水深を深くすることにより植物プランクトンを抑制することができる。

混合水深を深くする方法として

ばっ気筒（間欠式空気揚水筒）

連続バッキ（散気式ばっ気）

ポンプ循環法

表層水循環法

等の各方法がある。

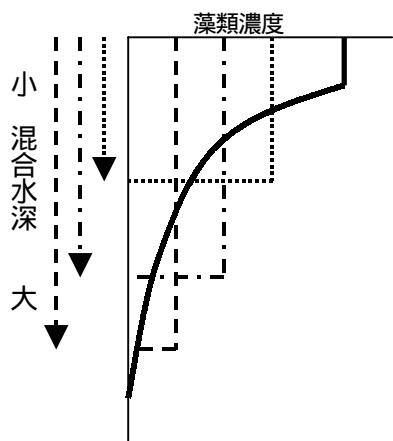


図 8-5-3 混合水深と平均光強度

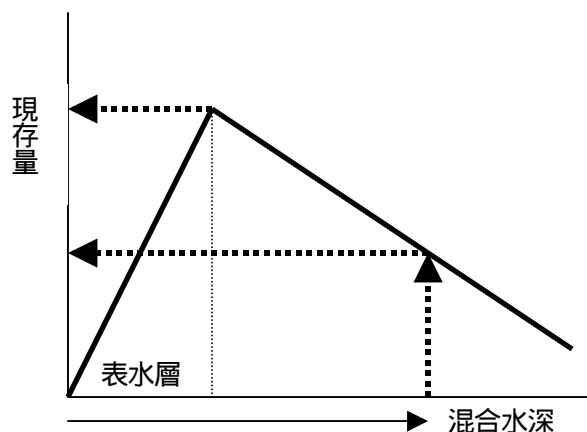


図 8-5-4 混合水深と現存量の関係

混合水深と現存量の関係からすると，一般の湖沼の表の深さは，吹送流や気温の日周変化による自然対流混合で混ざる深さが 3 m 前後であるため，水深はその 2 倍以上，即ち，数 m 以上の水深がないと，光制限効果を発揮させることが困難な場合が多い。したがって，湖水循環による植物プランクトン抑制が効果的なのは，水深数 m 以上の深水湖沼が基本的な対策の対象となる。

しかしながら，先に示したように，湖水循環法の効果は，光コントロール効果以外にも，底層水の DO 改善効果や鉛直循環流による沈殿促進効果があるため，改善しようとする湖沼の水質や地形および植物プランクトンの発生状況等に応じて適切な計画設計を行うことが重要である。

## (2) 表層水の希釈効果

湖水の循環により有光層である表層部分は植物プランクトンの少ない下層の水で希釈されることとなる。ばっ気循環法の場合，水深が同じであれば，循環水量は送気量すなわちコンプレッサーの定格電力に比例することとなる。ばっ気筒方式の湖水の循環水量はおおよそ下記のような値が実測されている。

1 基のコンプレッサー電力容量 2.2 kW 揚水量 80 万 m<sup>3</sup> / 日

(注) 揚水量は，ばっ気筒による純揚水量と連行推量を含む

湖面積 1 km<sup>2</sup> に 1 基のばっ気筒を導入した場合についてみると，表水層の厚さを 3 m として，下記のように計算される。

$$\begin{aligned}
 \text{希釈効果} &= (\text{ばっ気循環量}) / (\text{表水層の体積}) \\
 &= (800000 \text{ m}^3 / \text{日} \times 1 \text{ 基}) / (1000000 \text{ m}^2 \times 3 \text{ m}) \\
 &= 0.26 / \text{日}
 \end{aligned}$$



となり、一日に26%の水の交換を促進することとなる。湖水循環を行わなかった場合の表層水の滞留日数が仮に1ヶ月としても、希釈により滞留時間は4日以下に短縮されることになる。

### (3) 沈殿促進効果

湖水の循環は、上述したように表層水の滞留改善につながるが、水自体は下層へ鉛直循環流として移行するため、平均的な下降流を形成することになる。この下降流は、懸濁物質についていえば沈殿効果を促進する要因となり、移動性のない植物プランクトンも同様に沈降が促進される。

ちなみに、上述の例と同様に湖面積1km<sup>2</sup>に22KWのばっ気筒を1基導入した場合の試算をすると下記のとおりとなる。ただし、下降流を計算する場合は、純揚水量を用いる必要がある。純揚水量は、約11万m<sup>3</sup>/日である。

$$\begin{aligned}\text{平均下降流流速} &= (\text{純揚水量}) / (\text{表層水の面積}) \\ &= 110000\text{m}^3/\text{日} \times 1\text{基} / (1000000\text{m}^2) = 0.11\text{ m}/\text{日}\end{aligned}$$

の沈殿促進効果となる。ミクロキスティス等の沈降速度の小さい植物プランクトン群の場合、沈降促進効果は非常に大きいと推定される。

## 8-5-3 ばっ気循環浄化システムの計画・設計法

### (1) 計画・設計の考え方

湖水の人工循環の目的には、下記のように改善すべき水質問題により主として6種類をあげることができる。

藍藻類等の特定障害植物プランクトンの増殖抑制

内部生産(植物プランクトン)の増殖抑制

COD等の環境基準項目の水質改善

底層水のDO改善

Mn, NH<sub>4</sub>-N等の溶出防止

ミクロキスティン等の有毒物質の希釈拡散

これらのいずれの問題解決にも曝気筒が具体的対策方式として適用されるが、それぞれの水質問題毎に対策原理は異なっているため、基本的には必要な曝気筒の必要筒数や必要曝気エネルギーあるいは必要空気量は異なってくる。

本マニュアルでは、設計法が概ね明らかにされていると について、その計画・設計法を概説し、設計事例を示すものとする。以下それぞれについて、計画・設計の基本的考え方について述べる。

#### a. 藍藻類等の特定障害植物プランクトンの増殖抑制

光制限、表層水の滞留改善、成層破壊の三大原理にしたがって、カビ臭生産などの利水障害植物プランクトンの増殖を抑制するために必要な、設計条件を以下に示した。

##### ア、光制限

光制限条件は障害植物プランクトンの光強度と生産特性の関係から(図8-5-3)、必要な混合水深を維持するための曝気量および曝気筒数を設計するものである。

この場合、必要な設計因子は、コントロールする障害植物プランクトンの個体数、必要混合水深、必要混合水深に温度躍層を維持するための曝気量の三つとなる。このためには、図8-5-4に示したような、混合水深と藻類現存量との関係が得られている必要があるが、通常このような関係を

実際の湖沼やダム貯水池で得るのは現実には困難である。また、室内の増殖実験等のデータから関係式を導き出したとしても、実際の湖沼条件に適用できるかどうかは別問題となる。

したがって、光制限の効果を適正に反映した曝気循環の計画設計においては、生態系モデルを適用した予測シミュレーションによる計画・設計が必要となる。

#### イ、表層水の滞留改善

表水層は、吹送流や気温の日周変化による自然対流混合により、鉛直混合が進んでいる水温躍層の上部をいう。通常は観測が容易でかつ対策原理との対応からこの定義が適用される。

この表水層部の水を下層水によって希釈し、増殖速度を抑制するために必要な希釈水量から算定しようとするものである。

植物プランクトンが増殖するのに通常の栄養塩類の濃度条件では、最大増殖に達するまで、約1週間から10日が必要である。これより3分の1程度の時間に増殖日数が短縮されると増殖が抑制されることになる。したがって表層水が2～3日に入れ替わる速度で循環水量を確保すればよい計算となる。なお、この希釈率は増殖速度より大きいことが前提であり、植物プランクトンの種類や栄養塩濃度の条件によって増殖速度が異なるため、上述の希釈日数は一つの目安である。

#### ウ、成層破壊

成層破壊とは、水温成層が完全に破壊されることを意味し、鉛直方向の密度が同じになる状態まで混合することをいう。水温成層が発達している状態では、比重の軽い水塊が密度の上に乗っている状態であり、重心の位置が下層の方にある状態といえる。成層破壊とは、密度が全体に均一となる状態まで位置エネルギーを上げることに他ならない。

したがって、成層破壊のために必要なエネルギーは、位置エネルギーの変化速度に相当するエネルギーを曝気による注入することが設計計算の基礎となる。

#### エ、底層水のDO改善

曝気循環によってDO改善を行う場合、いわゆる気泡曝気によって直接酸素を水中に溶け込ませる方法とDOの豊富な表層水を下層に移流させて補給する方法の二つがあるが、エネルギー効率的には、後者の方法のほうが優れている。このため以下の設計法では、この方式を前提としたものとして述べる。

底層水のDO改善は、基本的に下記のDO収支式を満足するように、酸素量を補給するための水量確保が設計計算の基礎となる。

$$\text{必要酸素量 (O)} = \text{底泥の酸素消費速度 (R}_s\text{)} + \text{水中の酸素消費速度 (R}_w\text{)}$$

$$\text{必要循環量 (Q)} = \text{必要酸素量 (O)} / \text{表層の酸素濃度 (C)}$$

上式においてもっとも重要な設計条件は、底泥の酸素消費速度であり、これは原則として実測によらなければならない。実際の湖沼では、DOの鉛直分布の観測値から、現存DO量の変化を求め、酸素消費速度の実測値としてあたえる場合があるが、ここで注意が必要なことは、実際のDOの変化は、律速となっている条件のもとでの値であるということである。通常、DOの変化は、拡散律速になっている場合が多く、この場合は底泥の消費速度が拡散によって規定されているため、見かけの消費速度が小さいことがあるため、過小設計となりやすいので注意が必要である。

## (2) 設計計算の方法

前節で述べた計画・設計の考え方に基づいて、ここで具体的な設計計算法について示す。

## a . 光制限効果

ア, シミュレーションによる設計

光制限効果を複数の植物プランクトン種を取り扱える生態系シミュレーションによる設計フローを図8-5-5に示した。

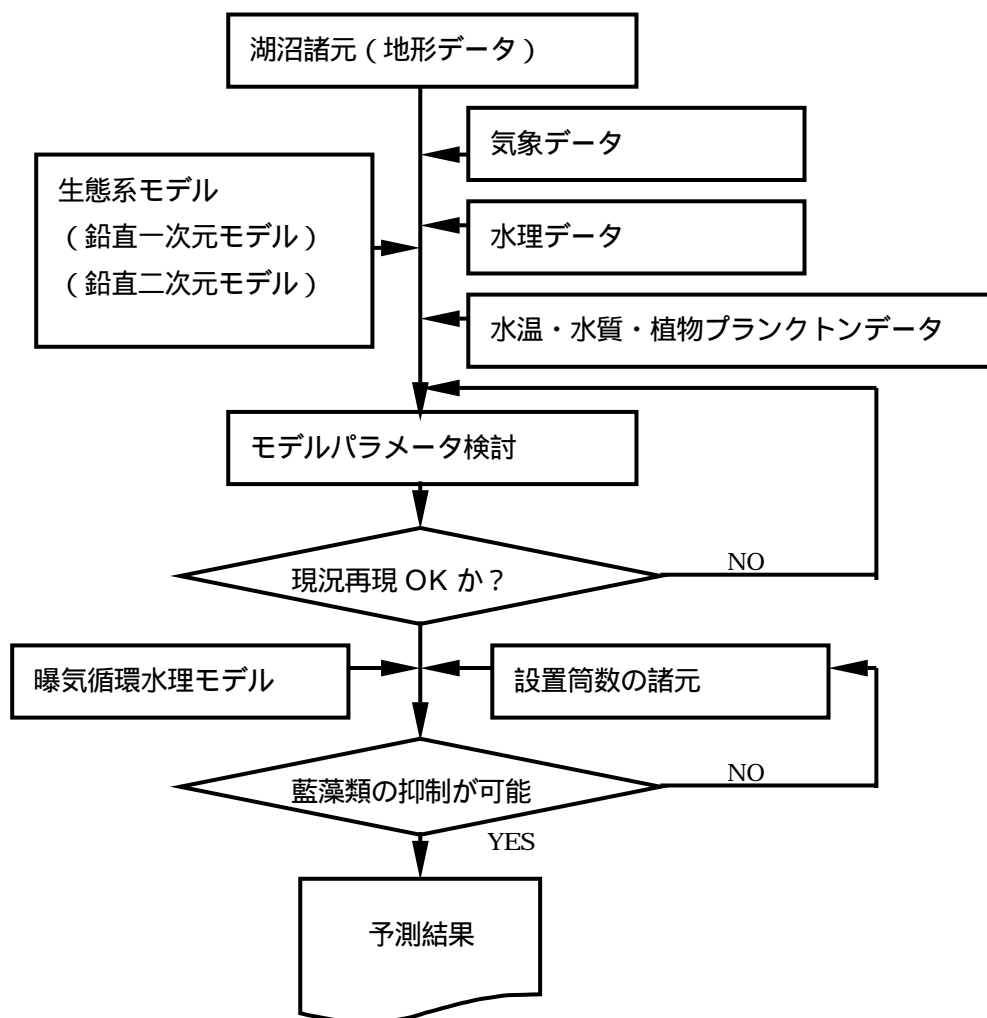


図8-5-5 曝気循環による光制限効果予測計算フロー

生態モデルの増殖速度式は次式で示すように水温・光・栄養塩濃度の各制限因子の関数式で与えられる。

$$\text{増殖速度} = f(\text{水温}) \cdot f(\text{光}) \cdot (\text{栄養塩})$$

曝気循環による、光条件の変化、水温条件の変化、鉛直移流の変化に対応した効果を予測し、曝気筒の必要諸元を決定するものである。

### [ 設計事例 ]

設計事例として、東北地方整備局・釜房ダムの事例を示す。釜房ダムは有効貯水量 3600 万 m<sup>3</sup>、最大水深 27 m の多目的ダムである。

1985 年の現況に対する曝気筒導入による予測計算の結果を図8-5-6に示した。22 kW の曝気筒を3基 (単筒タイプでは12筒に相当) 導入することにより、藍藻類のホルミディウムをほぼ完全に抑

制することができる結果となった。この計画によって現在，9筒相当の曝気筒が設置されているが，異常気象年以外は「かび臭」の発生をほぼ抑制できており予測結果の妥当性が実際に確認されている。

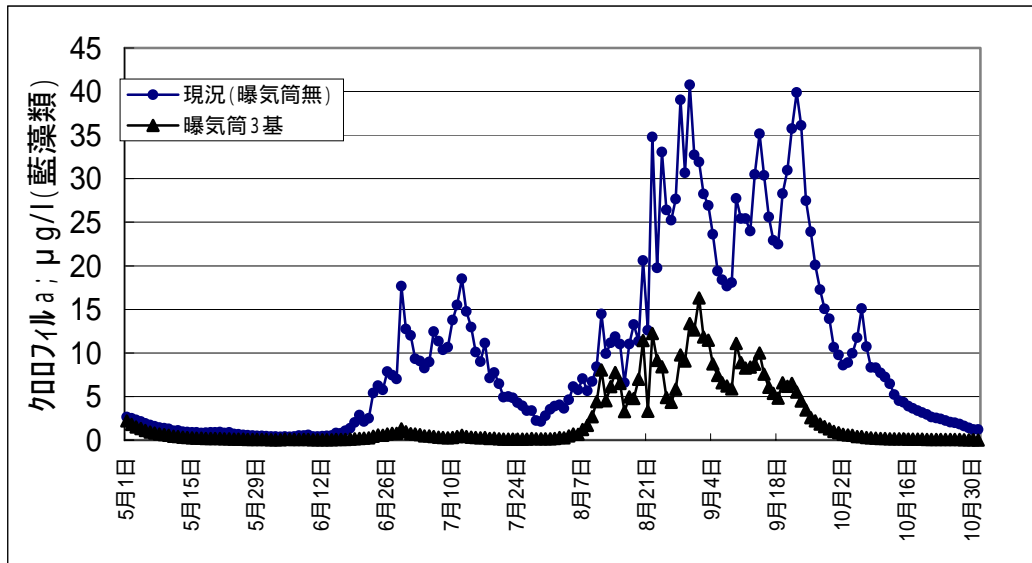


図 8-5-6 釜房ダムの曝気循環による藍藻類の抑制効果

## b. 水層の滞留改善による設計

表水層の滞留改善の設計計算手順を以下に示す。

### ア，設計変数

- ・ 表水層の容積（水温成層の上部の水深×湖面積）； V
- ・ 設定滞留日数 ； T（日）

### イ，設計諸元

- ・ 単筒タイプ ；出力 7.5 KW の曝気筒の揚水能力； Q = 25,000m<sup>3</sup> / 日
- ・ 複筒タイプ ；出力 22.5 KW の曝気筒の揚水能力； Q = 110,000m<sup>3</sup> / 日
- ・ 表層水の連行率； = 5 （実測係数）

### ウ，必要曝気筒数の計算

（1），（2）の条件から，

$$\begin{aligned} \text{必要曝気筒数 (N)} &= (\text{表水層の入れ替え必要量} / \text{揚水能力} \times (1 + )) \\ &= (V / T) / (Q \times (1 + (1 + ))) \end{aligned}$$

### エ，設計事例

相模湖を事例として計算する。

$$\text{表水層の容積 (V)} = \text{湖面積 (2.58 km}^2 \times 3 \text{ m)} = 7.74 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{設定滞留日数 T} = 2 \text{ 日}$$

必要曝気筒数

$$\begin{aligned} N &= (V / T) / (Q \times (1 + )) \\ &= 7.74 \times 10^6 \text{ m}^3 / (110,000 \times (1 + 5)) \end{aligned}$$

$$= 11.7 \text{基} \quad 12 \text{基}$$

### c. 底層水のDO改善効果の設計

底層水のDO改善は、下記のDO収支式を満足するように、酸素量を補給するための水量確保が設計計算の基礎となる。

$$\text{必要酸素量 (O)} = \text{底泥の酸素消費速度 (R}_s\text{)} + \text{水中の酸素消費速度 (R}_w\text{)}$$

$$\text{必要循環量 (Q)} = \text{必要酸素量 (O)} / (\text{表層の酸素濃度 } C_u - \text{下層の酸素濃度 } C_d)$$

ここでは例題として、下記の酸素消費特性を有する湖沼の計算例を示すこととする。

[例題]

湖面積 =  $2.58 \text{ km}^2$ 、表層水のDO ( $C_u$ ) は  $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、下層水のDO ( $C_d$ ) はゼロとした場合の設計計算は下記のとおりである。

$$\text{底泥の酸素消費速度 (R}_s\text{)} = 120 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{日}$$

$$\text{水中の酸素消費速度 (R}_w\text{)} = 25 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{日}$$

$$\begin{aligned} \text{必要酸素量 (O)} &= (120 + 25) \times 10^{-6} \times 2.58 \times 10^6 \\ &= 374 \text{ (kg/日)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{必要循環量 } Q &= O / (C_u - C_d) \\ &= 374 \times 1000 / (9 - 0) = 41600 \text{ m}^3 / \text{日} \end{aligned}$$

$$\text{必要曝気筒数} = 41600 / 25000 = 2 \text{ 筒}$$

という計算結果となる。ここで注意が必要なのは、揚水量は連行後の水量ではなく、曝気筒下部からの純揚水量をもって計算することにある。

上述の例題は、相模湖の規模を想定したが、下層のDO改善を目指した場合、単筒タイプで2筒で充分であるという結果になった。

### (3) 気筒の設置計画

曝気筒の配置計画は、平面配置計画と曝気筒の設置間隔の二つの計画が必要となる。

#### a. 平面配置計画

曝気筒による曝気循環を効率よく行うためには、適切な設置位置を確保することが重要となる。この設置位置も改善する水質現象が何かによっても異なることは言うまでもないが、基本的には、湖水の人工循環の原理が密度流を利用した方法であることがカギとなる。すなわち、水平密度流を効率よく生じるための条件として。

- ・ 最も高い密度の水を揚水する。
- ・ 表層のできるだけ密度の低い水と混合させる。

前者は、最も高い密度、換言すると最も重い水を揚水することによって循環流が最下層までの範囲で生じさせることになる。また後者の条件は、密度流として、改善の必要な水温が高く軽い表層水の部分をできるだけ入れ替えるための水平密度流を起こすためである。

このため、曝気筒の配置計画では、湖沼あるいはダム貯水池の最深部から設置していくことが原則となる。ただし、湖底地形が平らな場合には、停滞部の解消等の別な滞留改善の理由が必要である。

#### b. 曝気筒の設置間隔について

曝気筒の筒頂から吐出した気泡噴流は、上昇しながら周囲の水を連行混合しながら水面に達する。この乱れが十分に発達した領域を「噴流領域」と称するが、この噴流領域が重なると、水温の低い水

塊同士が混合するため、比重の重い水が形成されやすい。このような状態では、水温が周囲の水より低い水塊であるため、下層へもぐる結果となり、水平循環流を引き起こすことができなくなり、エネルギーをロスする結果となる。

したがって曝気筒の設置間隔は、少なくともこの気泡噴流領域の直径より大きく設定する必要がある。この噴流領域の直径は20 mから30 mであるため、安全をみて、50 mから70 mの間隔を置いて設置することが望ましい。

#### 8 - 5 - 4 対策事例

##### (1) 釜房ダム貯水池の事例

曝気筒による藍藻類の抑制効果でわが国の大規模ダム貯水池に本格的適用がされたのが、釜房ダムである。総貯水量 4530 万  $m^3$ 、湖面積 3.7  $km^2$  の多目的ダムであり、1975 年以降藍藻類ホルミディウムによる「カビ臭」発生により、水道原水に多大な被害を与え、浄水処理に活性炭注入が必要となった。対策原理から、曝気筒が導入され、現在 7.5 kW が 5 筒、22 kW が 1 基設置されている。なお、釜房ダム貯水池の「かび臭」は「2 M I B」であると特定されている。



写真 8-5-2 釜房ダム貯水池の曝気筒の位置

釜房ダムの設置位置は循環効率を考慮して写真 8-5-2 に示したとおり、旧河道筋の最深部に沿って設置されている。曝気循環装置の設置は、1984 年 9 月に行われたが、図 8-5-7 に示したようにその年以降、ホルミディウムは激減し、「かび臭」2 M I B」も  $5 \text{ ng} \cdot \text{l}^{-1}$  以下に抑制されている。

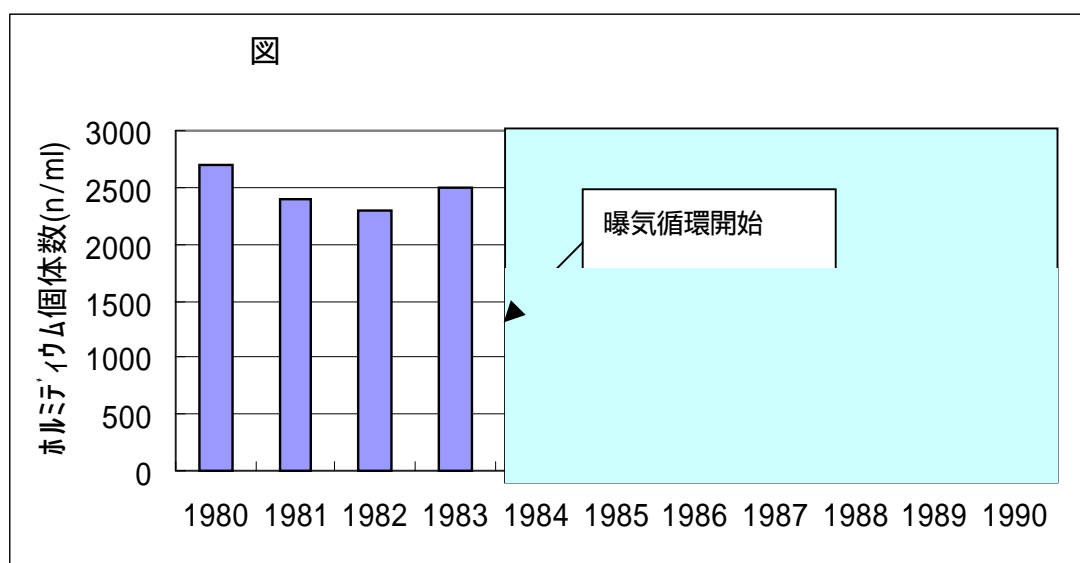


図 8-5-7 釜房ダムのホルミディウム抑制効果

## (2) 相模湖・津久井湖の例

相模湖・津久井湖は、貯水池容量がそれぞれ 6320 万 $m^3$ と 6230 万 $m^3$ で主として水道水源と発電を行っている多目的ダム貯水池である。相模ダム、津久井ダムの築造はわが国でも古いですが、1965 年ごろより富栄養化の進行が著しくなり、写真 8-5-3 に示すように、毎年「アオコ」の発生が著しい状況から、本格的対策が急がれていた。平成 1 年より本格的調査が行われ、相模湖については平成 3 年～5 年にかけて、曝気筒の導入が行われた。また津久井湖ではその後、散気式の曝気循環装置も浅層曝気用として併用導入され効果をあげている。最盛期のマイクロキスティスの経年変化を示すと図 8-5-8 のとおりで、曝気筒の設置により、マイクロキスティスは激減している。



写真 8-5-3 相模湖のアオコ

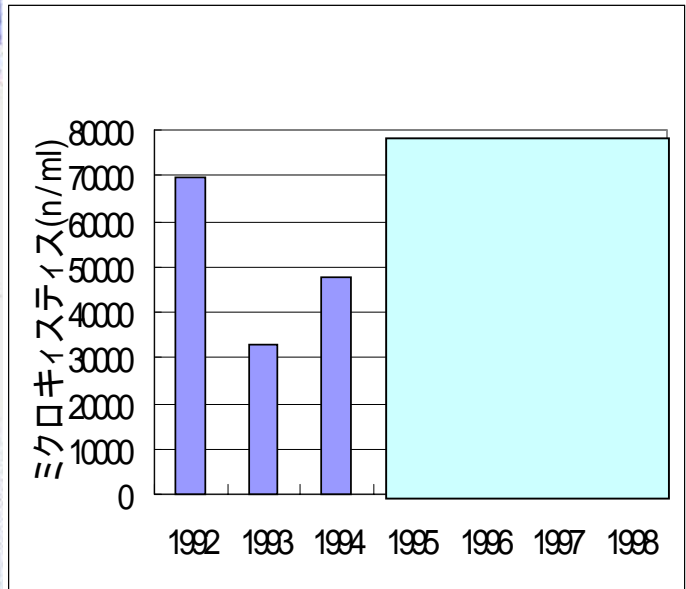


図 8-5-8 津久井湖のアオコ抑制効果

### < 参考文献 >

- 1) M.W.Lorenzen ,R.Mitchell " An Evaluation of Artificial Destratification for Control of Algal Blooms " journal AWWA, JULY, 1975
- 2) 小島貞男；富栄養化対策としての湖水強制循環法．産業公害，18(9)：68～75，1982
- 3) 小島貞男；富栄養化対策としての湖水人工循環法 - その原理と実績．日本水処理生物業会誌,24(1)9～23，1988
- 4) 加藤，嶋，野正；湖水のばっ気循環による利水障害プラクトンの制御」第 31 回環境工学研究フォーラム講演集，土木学会，1994.11
- 5) 日本水道協会，；湖沼・貯水池を対象とした水道水質保全マニュアル，1989
- 6) 森川，嶋，加藤；ばっ気循環による藻類の制御効果に及ぼす貯水池形状の影響」世界湖沼会議 ' 95 霞ヶ浦，1995
- 7) 沼尾他「釜房ダム水質保全対策（湖内循環）」世界湖沼会議 ' 95 霞ヶ浦，1995
- 8) 森川，嶋，加藤「ばっ気循環による植物プランクトンの制御について」第 31 回水環境学会講演集。1996.3

( 株式会社日水コン：加藤善盛 )