

湖沼水質保全システム

佐川 学(さがわ まなぶ)

明瀬 郁郎(みょうせ いくお)

野田 直広(のだ なおひろ)

1 まえがき

国連環境計画 (UNEP) が世界50か国の科学者を対象に実施したアンケートによると、21世紀には淡水資源の不足と汚染が、気象変動とともに最も懸念される環境問題になると報告している。地球上に存在する淡水資源のうち、極地や地下に存在するものを除いた、飲料水として利用できる湖沼・河川水はわずか0.3%程度である。湖沼やダム湖は、淡水資源を蓄え、飲料水を供給する水源として重要な役割を持つ。しかし近年、上流域からの自然または人為的な汚濁負荷流入により、短期間に湖沼の富栄養化が進み、さまざまな利水障害が生じるようになった。

本稿では、湖沼の富栄養化を予防し、将来にわたって貴重な淡水資源を保全するためのソリューション技術として、

- (1) 生態系モデルを用いた水質予測シミュレーション
 - (2) 湖沼水質のモニタリング
 - (3) 湖沼の直接浄化技術
- について紹介する。

2 最近の湖沼環境にかかわる動向

日本には灌水(かんすい)面積が0.1km²以上で、流域面積が1km²以上の湖沼が約1,120個ある。その約8割がダム湖やため池などの人工湖である。閉鎖性の水域である湖沼は、産業系、生活系、農業畜産系など多様な排水による負荷が滞留して富栄養化が進行しやすい。汚濁負荷源のうち産業・生活系などの点源負荷は、下水道普及率の向上などにより減少している。しかし最近、森林、田畑、市街地など面源の負荷である「ノンポイント負荷」(解説参照)の削減が新たな問題としてクローズアップされている。例えば琵琶湖では、ノンポイント負荷が流入汚濁負荷量の44%を占めるといわれている⁽²⁾。湖沼の富栄養化は藻類を増殖させ、著しい場合には、淡水赤潮やアオコ現象を生じて、さまざまな利水上の障害をもたらす。例えば、飲料水を供給する浄水処理プロセスの立場からみると、次の問題点がある。

- 水処理障害(凝集不良、汙過閉そく)が生じる。
- トリハロメタン生成能を高める。
- 異臭味(かび臭)物質を生産する。

藻類はその細胞外物質が浄水処理プロセスにおける凝集・沈殿・汙過効果を阻害するほか、光合成によって水中の重炭酸イオンを吸収利用する結果、pHをアルカリ側にシフトさせて凝集剤の過剰注入という問題を発生させる。また、多量の藻類は、浄水場での塩素接触によって消毒副生成物質であるトリハロメタンの生成能を高める可能性がある。さらに、異臭味の発生に関しては、浄水場の着水井に大量の活性炭を投下する吸着除去や、オゾン処理と生物活性炭を組み合わせた高度浄水処理を行うなど、その除去には膨大な投資を必要とする。このほか、一部の藻類には有毒物質を生産するものがある。1996年には、ブラジルでダム湖に発生したアオコ(らん藻類)の産生する毒素Microcystinが水道水に混入し、透析患者50人が死亡するという深刻な水質事故も発生している⁽³⁾。

湖沼の富栄養化を予防し、水質を保全していくためには、国、地方自治体、企業、住民が連携しながら、さまざまな施策を実施する必要がある。国は、富栄養化の原因物質であるリンと窒素について、1982年に「リン及び窒素に係る環境基準」を設定し、1993年度までに、琵琶湖(2水域)など合計48水域(44湖沼)について類型指定を行った。また1985年には「リン及び窒素に係る排水基準」が設定され、リンについては1,066湖沼、窒素についてはこのうち78湖沼を排水規制対象とした。

しかし、いったん汚濁が進んだ湖沼の水質を改善するこ

表1 湖沼の富栄養化対策

物理・化学的対策	生物学的対策
藻類の直接除去 ばっ気による湖水の強制循環 凝集剤添加による栄養塩の沈殿 吸着材による栄養塩除去 導水希釈 底泥のしゅんせつによる栄養塩 回帰の低減	食物連鎖網を利用した生態系操作 (バイオマニピュレーション)、 例えば藻類を捕食する魚類の投入 と漁獲 水生植物(ウォーターレタス、ホ テイアオイ、ヨシなど)による栄 養塩除去 殺藻ウイルス投入による藻類除去



佐川 学

上下水道用電気・計装・コンピュータシステムの設計に従事。現在、電機システムカンパニー環境システム本部水処理システム事業部公共技術部マネージャー。電気学会会員。



明瀬 郁郎

上下水道用の新エネルギー活用システム、湖沼の水質保全システムの企画・開発に従事。現在、電機システムカンパニー環境システム本部営業統括部水環境事業推進室課長補佐。日本水環境学会会員。



野田 直広

水質計測器の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所。

とは容易ではなく、全国の湖沼における有機汚濁にかかわる水質環境基準の達成率は約40%と、海域・河川に比べると低くなっている。規制措置による湖沼外からの流入栄養塩の削減には限界があることから、湖沼内を直接浄化して、富栄養化を防止するためのさまざまな対策が表1のとおり実施されている。

③ 湖沼水質保全システム

湖沼水質保全のための技術を以下に紹介する。

3.1 生態系モデルを用いた水質予測シミュレーション

3.1.1 藻類増殖のメカニズム

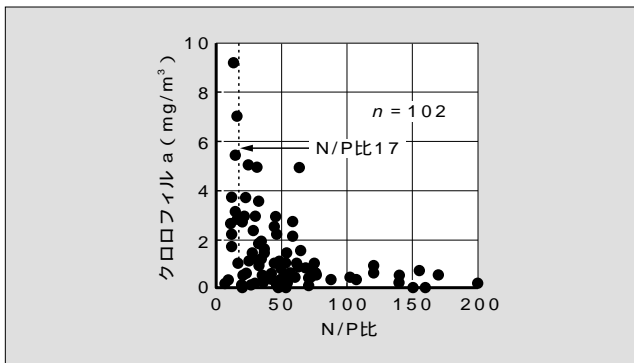
藻類増殖は湖沼水質保全における中心的問題であるため、ここでは特に、そのメカニズムの一端を紹介する。

湖沼は川や海と異なり、閉鎖性、滞留性があるため富栄養化が進行しやすい環境である。湖沼水質は、外部から流入する栄養負荷のほか、湖沼内生物による生産・消費・分解の影響を受ける。利水障害の原因となる藻類の増殖現象も、生物間に作用する物質・エネルギー循環のバランスの上に成り立つ。藻類の増殖には、無機態の栄養塩（特にリンと窒素）、光、水温、滞留時間の四つの因子が影響する。特に、制限栄養塩であるリンと窒素の挙動を把握することは、藻類増殖を予測するうえで重要である。

一般に栄養が十分な条件下で生育している藻類の細胞内には、窒素（N）とリン（P）が16：1（モル比）で含まれている。このため、藻類の増殖を評価するには窒素とリンの絶対量とともに、それらの比率（N/P比）が重要である。OECD（経済協力開発機構）では、このN/P比が17以上で「リン制限」と定義している。日本の湖沼の多くはリン制限型であり、リンの存在量が藻類増殖を左右していると考えてよい。富栄養化により、リンが増加してN/P比が低下すると藻類が増殖しやすい環境に変化する。図1に手取川ダム湖（石川県）におけるN/P比と藻類増殖の指標であるクロロフィルa濃度の相関を示す⁽⁴⁾。N/P比の低下とともに藻類が増殖する傾向から、リンが藻類増殖をコントロールしている様子が分かる。

このほか、藻類種ごとに増殖に適した水温や日射強度が存在することや、洪水調節機能を持つダム湖の場合には滞

図1 N/P比とクロロフィルa濃度の相関（手取川ダム湖）



留時間の季節変動が増殖に影響を与える点などを考慮する必要がある。藻類増殖の機構解明のためには、フィールドで得られたデータを多面的に分析する必要がある。

3.1.2 湖沼水質予測モデル

湖沼水質保全のための施策を立案していく場合には、

- 対象水域内の水質は将来どう変化するのか。
○水質保全対策により水質はどの程度改善するか。

という定量的な情報が必要である。水質予測モデルは、想定される環境条件や保全対策の条件を入力し、保全目標となる水質項目に関する予測値を得るために用いられる。モデルは対象水域内の物理学、化学、生物学的な変化の過程を、時間・空間的に表現し、次に示す三つの部分で構成される。

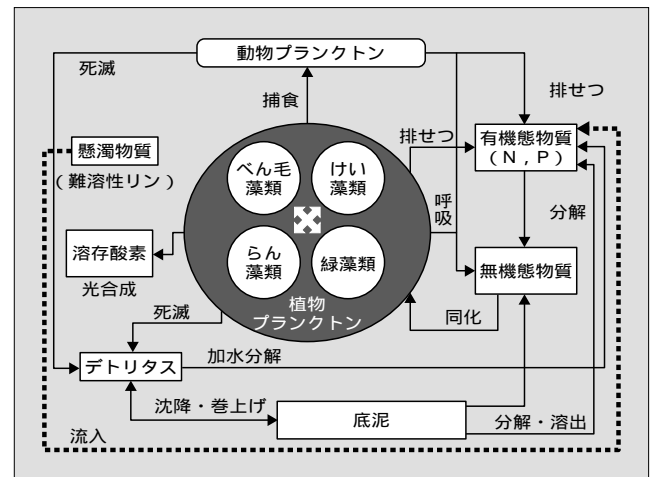
- (1) 水域分割（コントロール、ボリューム）モデル
(2) 水質変化（生態系）モデル
(3) 水理流動（移流、拡散）モデル

湖沼における水質予測モデルでは、(2)の生態系モデルの記述が重要である。藻類は光合成により、無機態のリンや窒素、炭素を取り込みながら増殖していく。この結果、有機物を増加させ、COD（化学的酸素要求量）の増加、炭酸同化に伴うpHの上昇という水質変化が生じる。また、藻類に利用される栄養塩類は、河川から流入するもの以外に、生物の排せつ物や死がい、微生物分解に伴って溶存酸素の消失した底泥からの溶出など湖沼内部の物質循環に由来するものも考慮する。さらに、藻類を捕食する動物プランクトンの動態も藻類生産に影響を与える重要な要素であるのでモデルに組み込む。

図2に、貧ないし中栄養湖である手取川ダム湖の水質予測に用いた生態系モデルの例を示す。本モデルでは、過去9年間の生物・水質観測データや藻類の培養実験に基づき、同定した各種パラメータと、予測対象期間のアメダスデータ（気温、日射量）を用いて、浄水処理上問題となる藻類4種それぞれの増殖速度を連立微分方程式により表現した。

特徴は、特定藻類の優占的な増殖現象を予測できることと、ノンポイント負荷として、河川から流入する濁質に含まれる難溶解性リンの分解過程を考慮（破線部）しており、

図2 生態系モデルの例（手取川ダム湖）



濁度上昇に伴う藻類増殖を予測できることである。

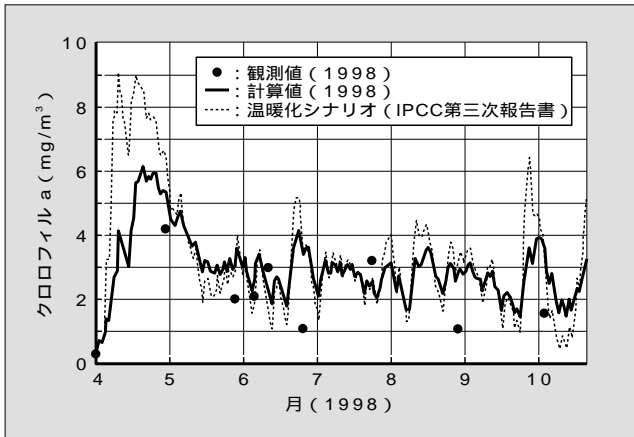
3.1.3 水質予測シミュレーション結果

図2に示した生態系モデルを用いて、手取川ダム湖の1998年4月から10月において水質予測シミュレーションを実施した結果を図3に示す。評価に用いた水質指標は、藻類4種のクロロフィルa濃度(合計値)である。

計算値(太線)と観測値(黒丸)はおおむね一致していることが分かる。リンや窒素など他の水質指標に関しても計算値と観測値の傾向は一致した。これらのシミュレ-

ーション結果から、モデルに基づく水質予測が可能であることが示唆される。次に、温暖化シナリオとしてIPCC(気候変動に関する政府間パネル)第三次報告書の予測結果を用いたシミュレーション結果を破線部に示した。温暖化の影響で、所々ピークが鋭くなっている箇所があるが、これは高温を好む種の優占化をシミュレートした結果である。このように、将来の環境変化を想定したうえで水質予測を行うことは、リスクアセスメントや水質保全対策を立案していくうえで、有用な情報となる。

図3 水質予測シミュレーション結果(手取川ダム湖)



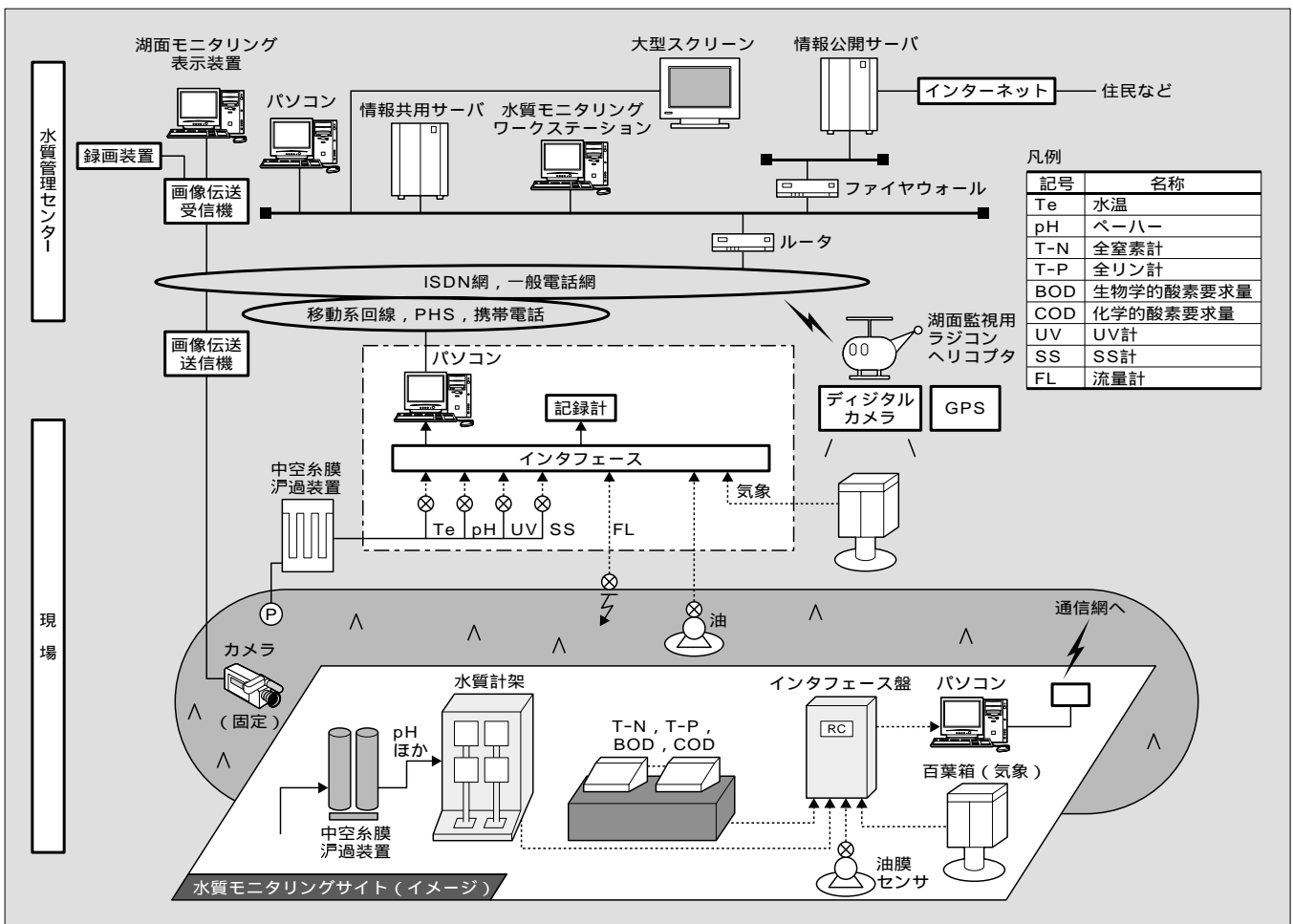
3.2 自動計器による水質モニタリングシステム

3.2.1 水質モニタリングの必要性

前述のように湖沼生態系のモデル化と、水質予測の技術は、昨今、大きく進展した。しかし、個々の湖沼はそれぞれ固有の地理的条件を持ち、その水質は季節、気象条件、河川からの流入水質などさまざまな要因で変化する。したがって、実際の湖沼の生態系を把握し、有限のエネルギーとコストで実効性のある水質保全や利水障害防止を行うには、水質情報に基づいて予測モデルを個々のフィールドにフィットさせる必要がある。

湖沼の水質およびそれを左右する環境要因は、時々刻々変化するため、保全に役立てるための水質情報はリアルタイムに近いデータでなくてはならない。また、有毒物質を

図4 水質モニタリングシステム



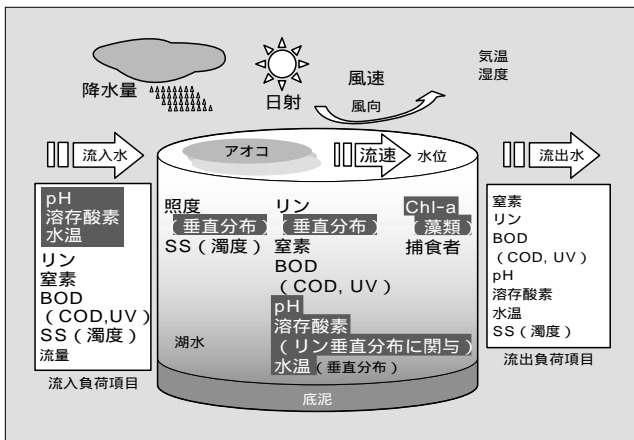
内包していることから問題となっている Microcystis の優先増殖には、日照やリン濃度の垂直分布、アオコの垂直移動が関与することが Okada らによって示されているが⁽⁷⁾、こうした状況を把握するためには、多点でしかも三次元的な水質情報が必要である。今後の水質保全においては、従来以上に高度なモニタリングが求められるようになる。

富士電機は、化学・光学・バイオの技術によって新たに開発した水質計や、ネットワーク技術を用いた遠隔集中監視によって、図4に示すような湖沼水質保全および利水障害解消を目指した水質モニタリングシステムを提供している。

3.2.2 水質保全に向けたモニタリング

図5は湖沼の水質保全に向けた監視項目を図示したものである。ここでは特に、Microcystisの優先増殖に着目し、Microcystisの優先増殖につながる因子を白抜き文字、藻類全般の増殖に正に作用する因子を黒太字、藻類増殖の負因子を黒細字、どちらともいえない因子を小さい字で示している。これら水質項目のモニタリング結果と前節の予測シミュレーションの知見とを併せることで、個々の湖沼に適した保全対策が可能である。さらに、短期的には水質改善が困難なケースにおいても、最低限、Microcystisの優先増殖を防止するなどの対策がとれる。

図5 水質保全に向けた監視項目



3.2.3 利水障害防止に向けたモニタリング

図6は湖沼の水質汚濁から引き起こされる利水障害とそれに対応するための水質監視項目、有効と考えられる設置点を示したものである。これらの項目を常時監視し、その情報を水道事業者や住民など利水者に周知すれば、異常時にも被害が防止できる。

浄水処理は水源水質によってさまざまな影響を受けるが、富士電機は、水源水質に対応して浄水処理プロセスを最適制御する研究に取り組んでいる。その成果として、例えば、藻類量に応じて塩素注入量を制御したり、pHに応じて凝集沈殿プロセスを制御するシステムを目指している。

また、有毒化学物質の漏えいや不法投棄に対しては、バイオ技術を用いた水質安全モニタによるモニタリングが有効である。水質安全モニタはすでに河川を中心に多くの稼働実績を持つ装置であり⁽⁸⁾、湖沼のモニタリングにも適用可能と考えている。

3.3 水質保全のための直接浄化技術

湖沼の水質改善には発生源対策が最も効率的である。しかし、前述のとおり、富栄養化が問題になっている湖沼の多くで生活排水やノンポイント負荷が主たる汚濁要因となっており、これらを抜本的に対策、削減するのは困難である。こうしたケースでは何らかの直接浄化技術が必要となる。浄化手法は、目標水質に応じて選定しなくてはならない⁽¹⁰⁾。浄化のレベルは次の5段階に分けられる。

- (レベル1) 固液分離：SS (浮遊性物質)、浮遊成分〔BOD (生物学的酸素要求量)、COD、窒素、リン〕
- (レベル2) 易分解性有機物の除去：溶解性BOD
- (レベル3) 栄養塩類の除去：窒素、リン
- (レベル4) 難分解性有機物の除去：溶解性COD
- (レベル5) 微量汚染物質の除去：細菌、農薬、有害物質全般

近年の取組みの中心はレベル3である。富士電機は、特に、自然エネルギーや生態系が持つ浄化機能を生かしたシステムに取り組んでいる。その事例を以下に紹介する。

図6 利水障害とそれに対応する水質監視項目

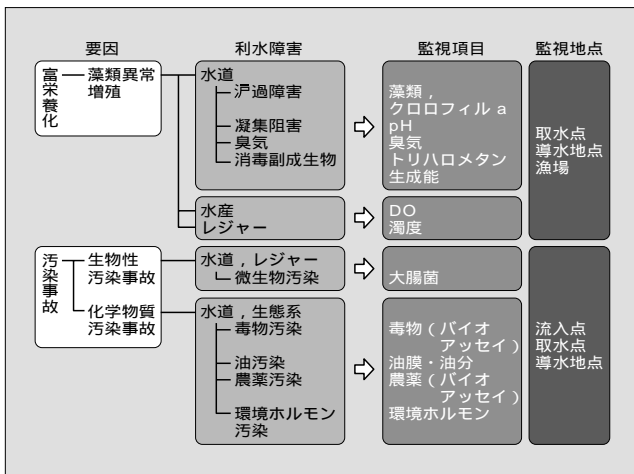
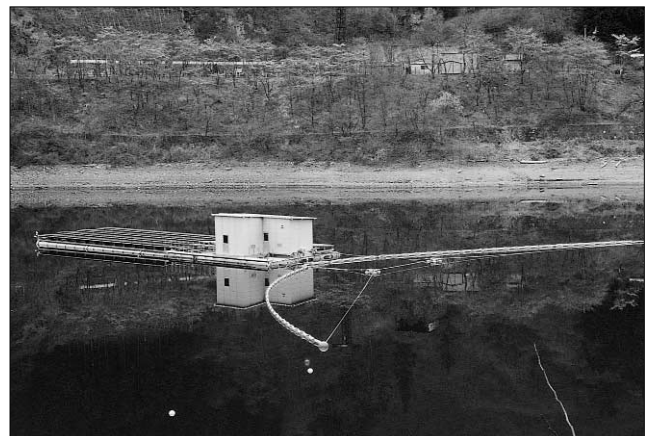


図7 小河内貯水池の水質保全装置



A7530-19-3

3.3.1 小河内貯水池水質保全装置

水道専用ダム湖として、1957年に運用を開始した小河内貯水池（東京都）では、近年、表層の水温が上昇する夏季に、河川流入部を中心に藻類が増殖する現象が見られるようになった。このため、1998年度に富士電機は東京都水道局と共同で、藻類を回収する水質保全装置（図7）を設置し、現在その効果を検証している。

水質保全装置は、湖面の台船に設置した太陽電池のみを動力源とし、最大処理水量は30m³/hである。藻類を藻類回収ポンプで吸い込み、沝過・脱水処理を経て、太陽電池を推進動力電源とした電動船「ひだまり」により陸上に運搬する。藻類回収により、リンや窒素を湖外に効率よく除去できる。また、ダム湖底への有機物の沈降を抑制して、循環期における表層への栄養塩回帰を低減させる効果が期待できる。

3.3.2 水生植物を利用する浄化技術

富栄養化で問題となる窒素とリンを水生植物に吸収させた後、それを収穫し系外に持ち出す浄化方法は、自然の浄化作用を利用する合理的なシステムである。形態は異なるが、前項同様、太陽エネルギーを活用した方法といえる。

水生植物を利用するシステムには次のような長所がある。

- 光合成を利用するため、栄養塩吸収に関するエネルギー効率がよい。
 - 枯渇が懸念されているリンの回収・再利用が可能である。
 - 植物による直接的な浄化作用以外にも生物相の多様化など副次的な効果が期待できる。
- 一方、課題としては次のような点が挙げられる。
- 浄化能力が植物生育面積で制約され、処理の絶対量を増やすには広大な面積が必要（これまでの実験検証例では処理量が少ない）である。
 - 回収を行わないと枯死した植物体が汚染源になる。
 - 水分含有量が多くなると、輸送の負担が大きくなる。

富士電機は、回収した植物が付加価値を持った商品となり、経済的な面からも、資源の循環利用が成り立つシステムを追求している。

そうしたシステムに適した植物として、ケナフ、ウォー

ターレタス、カラーなどが青井らによって検討されている。⁽¹²⁾ 特にウォーターレタスは10日で2倍の質量になるほど成長が速く、梅雨期の低日照時、夏季の高温時いずれの場合も、従来広く検討されてきたホテイアオイより高い増殖速度を示す。⁽¹³⁾ また、単一の株で水面に浮かんでいるため回収が容易である。

図8は太陽電池ボートによるウォーターレタス自動回収装置と組み合わせた水質浄化システムである。回収されたウォーターレタスはカリウム濃度の高いたい肥にすることができる。一般に汚泥たい肥は窒素・リンが豊富でカリウムが不足しているため、ウォーターレタスたい肥との混合によって栄養バランスのよいたい肥を製造できると考えられる。

3.3.3 湖水の強制循環による浄化技術

ばっ気による湖水の強制循環法は、深層の溶存酸素濃度を上げることで、底泥からのリンの溶出を防止し、また、表層の藻類を光の届かない深層に引き込むことで、その増殖を抑える。湖沼の浄化技術は、評価の複雑さから定量的効果が未確認のものが少なくないが、その中で、ばっ気による強制循環法は浄化能力が確認されている技術である。⁽¹⁴⁾

図9は釜房ダム、相模湖などで行われている全層ばっ気法を模式的に表したものである。

ばっ気による強制循環法には次のような長所がある。

- 浄化のメカニズムが把握されている。
- 実施例が多数あり、かなり確実に効果が予測できる。
- ばっ気、循環という人為的操作で系を制御できる。

図9 ばっ気・循環による浄化

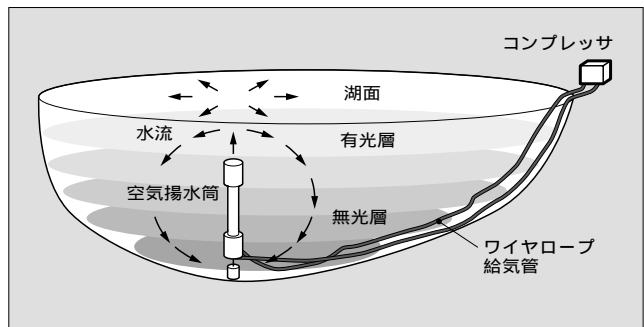
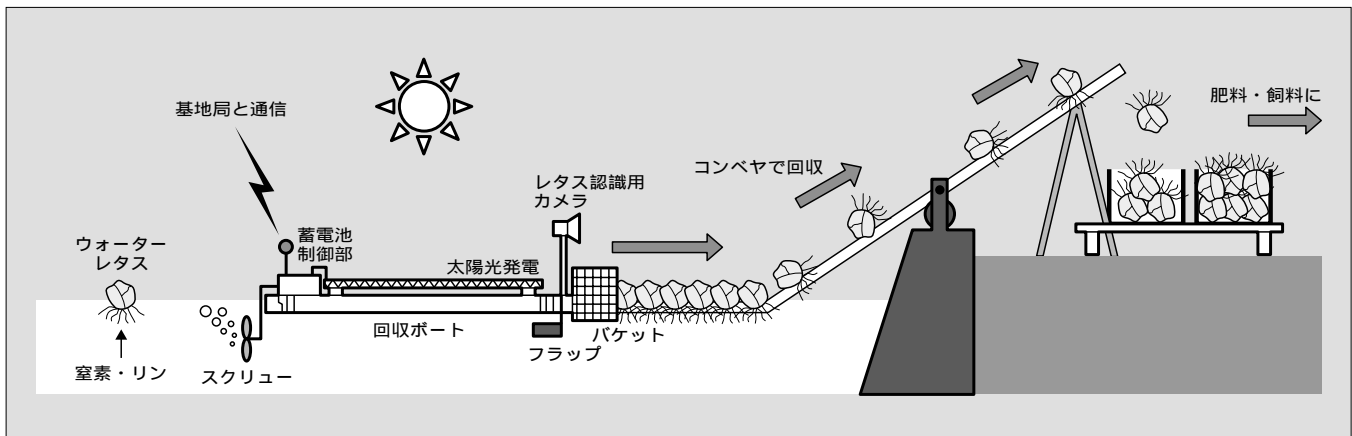


図8 水生植物を利用する水質浄化システム



一方、課題は次のとおりである。

- 水深 5 m 以浅では効果がない。
- 底泥の巻上げにより水中の栄養塩濃度が高まり藻類増殖を増長する場合がある。
- ダム湖の場合、放流水温低下による影響に注意が必要である。

4 あとがき

21世紀は地球規模での環境の世紀といわれている。水分野においては「水環境」を悪化させる要因をとらえ、水循環の仕組みを理解し、有効な水質保全対策を実施していくことが強く望まれる。

本稿では、湖沼水質保全システムについて述べた。富士電機は、今後も水道水源とする湖沼の保全について取り組んでいく所存である。

最後に、湖沼の直接浄化における水生植物利用について有益なご助言をいただいた群馬工業高等専門学校青井透教授に謝辞を申し上げる次第である。

参考文献

(1) UNEP . Global Environment Outlook 2000 Overview . 1999 , p.9-15 .
 (2) 日本水環境学会編 . 日本の水環境行政 . ぎょうせい , 1999 ,

284p .
 (3) Dunn, J . British Medical Journal (BMJ) . vol.312 , 1996 , p.1183-1184 .
 (4) 石川県企業局 . 水質試験年報 . 第 5 ~ 11 集 , 1990-1998 .
 (5) 明瀬郁郎 , 中森義輝 . 藻類除去によるダム湖の水質保全効果予測シミュレーション . 第35回日本水環境学会年会講演集 . 2001 , p.370 .
 (6) 明瀬郁郎 . ダム湖の水質保全を目的とした藻類増殖モデルの構築と制御 . 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科修士学位論文 . 2001 , p.81 .
 (7) Okada, M. et al . Biotechnol. Bioeng . vol.24 , 1982 , p.143 .
 (8) 岡安祐司ほか . 硝化細菌を用いた毒物モニタによる河川水質モニタリング . 土木研技術資料 . vol.41-9 , 1999 , p.44 .
 (9) 宗宮功編著 . 琵琶湖 . 技報堂出版 , 2000 .
 (10) 田中宏明編著 . 河川 , 湖沼 , ダム貯水池等の浄化手法についての総合的検討 . 建設省土木研究所 , 1998 .
 (11) 山本総一郎 , 小野正敏 . 太陽光発電利用貯水池水質保全システム . 富士時報 . vol.73 , no.4 , 2000 , p.253-256 .
 (12) 青井透 . 上流域における水生植物による水環境の浄化 . 環境施設 . Vol.82 , 2000 , p.74-78 .
 (13) 大月伸浩ほか . ウォーターレタスの回収技術と堆肥化の検討 . 第34回環境工学研究フォーラム講演集 . 1997 , p.49-51 .
 (14) 小島貞男 . かび臭対策としての湖水人工循環法の経験 . 用水と廃水 . vol.26 , 1984 , p.837-844 .

解説 ノンポイント負荷

湖沼に流入する汚濁負荷のうち、事業所や家庭からの負荷と違い負荷源が特定できない面源負荷のことを「ノンポイント負荷」と呼ぶ。一般に、森林、田畑、

市街地などから雨水を通じてもたらされる負荷を指す。ノンポイント負荷はその汚染源が把握しにくく、流出を抑制することが現状では困難である。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。