特集2・土壌による排水の浄化と再利用

排水処理への土壌機能の活用の現状と展望

—自然循環方式（四万十川方式）による浄化方法を例として—

松本 聡*

1. はじめに

「山紫水明」の国として賞されてきた曾てのわが国の美しい自然も、人々が自然から足を遠ざけ、自然に関心になるとともに、次第に汚れが目だつようになってきた。加えて、生活様式の変化や日常生活そのものの考えかたに以前とはまったく異なった生活パターンが導入されるに及び、水圏を中心とした環境にはそれに対応しきれない未曾有の負荷もたらされている。このような負荷はとくに河川や湖沼の水質汚濁にあらわれ、その進行は著しいものがあって、現在、わが国の陸域水圏のほとんど全域が深刻な富栄養化の状態にあるのが現状である。水域の富栄養化をもたらししている主たる原因は生活排水、畜産排水、工場排水をはじめとする有機排水が水域に混入されることにある。大量に排水されるところでは排水処理が行われてはいるものの、完全には富栄養化物質が除去されているわけではなく、一定の排水基準に達すれば放流されるので、水質汚濁につながる原因物質の総量は無視できない量にのぼる。しかし、大規模の処理施設の多くは河川河口域近くに建設されているので、特定のダムや河川の上中流から水道水など生活用水の取水が行われていることが多いわが国では、一部の例を除きこれまでは取り立てて言うほどの大きな問題を呈するには至らなかった。ところが、最近貯水池や河川の上中流域でも水質の悪化が指摘されるようになり、わが国の広範な水域で水質汚濁が着実にしかも急速に進行している実態が明らかになってきた。

本稿では、上記で述べたわが国全域に広まりつつある水質汚濁の原因の背景をわが国における食糧需要・供給からみた物質循環系の変化から考察し、こ

のような状況を克服するために、陸域生態系のなかでもっとも大きな浄化の場である土壌の有する機能を活用した装置を開発した経緯を紹介し、それが具体的にどのような方策で行われたかについて述べてみたい。

2. 河川・湖沼の水質向上を目指した装置の開発

水質汚濁の原因となる有機排水またはその処理水は水量のきわめて多い本流河川に流入すると、浄化する手段はほとんど講じることができないので、有機排水処理水の出口、あるいは有機排水が流出している側溝など流入負荷が比較的小さい箇所でも高次処理することが取りあえず必要であると考えられる。また、従来、処理水の高次処理は窒素やリンの除去を徹底するために非常に高価な処理施設が必要となり、財源確保のきわめて厳しい状況下にある地方自治体では積極的な河川の水質の改善策の遅延を余儀なくさせられる要因にもなってきた。

そこで、浄化資材をなるべく自然素材あるいは簡単に入手できる安価な素材に求め、これらを組み合わせることによって、主として生物的浄化を中心とした浄化方法を達成するための装置開発に着手した。またこの際、装置の稼動になるべくエネルギーを消費しないようにも配慮した。図1はこのような考えを基に開発された装置の構成を示す。すなわち、装置は5つの槽から構成され、これらの槽は約1/11の緩やかな勾配に配置され、これらの槽を排水または処理水が順次自然流下できるようになっている。第1槽および2槽は嫌気槽で前者は沈殿槽、後者は浮遊有機物などを吸着するバイオスと窒素除去のための炭素系有機物（山林から収集された落葉・落枝および椎茸栽培に使用された半ば腐朽したナラ、クヌギ類の落葉樹粉砕物）とニトロライト（生成アンモニア態窒素の吸着を補強した加工鉱物で、

* 東京大学大学院農学生命科学研究科
応用生命化学専攻 Satoshi MATSUMOTO

図一 自然循環方式による水質浄化の基本構造
(傾斜度1/10～1/20に設置するようにする)

ゼオライトを主体とする)から構成される。第3槽と4槽は曝気処理を伴う好気槽であり、槽には微生物による有機物分解を促進し、BODを低下させるためにチャコールバイオ(木炭の細孔に微生物が住処を獲得しやすいように、木炭の微細孔隙内壁に存在する針状の繊維や内壁にキトサンを浸漬・塗布したもの)が充填されている。第5槽には無機化されたリンを吸着除去するためのリントール(リン酸イオンの吸着を補強するために加工された石灰岩を主体とする鉱物)がニトロライト、チャコールA(脱色、脱臭などに優れた効果を示す木炭で、主として間伐材や廃材から製造される)とともに充填されている。各槽に充填されている資材はすべて取り替えが簡単にできるように袋詰めされている他に、曝気に要する電気エネルギーは太陽電池で蓄電されたエネルギーに切り替え、稼働している箇所もあり、維持管理がなるべく簡単に行えるように努めている。

本装置の機能上、もっとも大きな特徴は以下の3つに集約される。まず、第1層にあたる沈殿層の部分が他の層の大きさに比べて、2倍の大きさに設計されている点である。これには2つの意味を有している。1つには「多量の有機排水を嫌氣的に貯留することにより、腐敗層としての機能を発揮させ、層内の酸化還元電位を下げることによって、有害金属イオン、とくに重金属類の硫化物としての層内沈殿を促進する」。2つには、「他の層で発生した汚泥をすべてこの層に移し、装置全体から発生した汚泥の引き抜き・搬送を行わないで済むように、維持管理を簡便にする」ことである。確かに、第1層に集められた汚泥は一時的に第1層の容量の1/3程度まで増加することが観察されるが、その後この汚泥体積は順次低下し、現在稼働のすべ

ての本装置設置施設で汚泥を引き抜き、他に搬送したという記録はない。この理由は、汚泥の嫌気分解の他に大量に発生している「イトミミズ」による汚泥の消化が考えられる。2つ目の特徴は炭素系有機物を用いることによる窒素の微生物体内固定化促進である。炭素率(C/N)の高い有機物を土壌に施用すると、土壌微生物の菌体炭素率とのアンバランスによって、土壌微生物が周囲の土壌

の窒素を菌体内に取り入れ、その結果、栽培作物は「窒素飢餓」に陥る現象はよく知られているところである(久馬一剛ら, 1994)。この現象を用いて、筆者は炭素系有機物を汚濁水に浸漬することによって、水中溶存の窒素化合物を微生物菌体に取り込ませ、水中の窒素量の低減を考えた。3つ目の特徴は木炭に天然高分子膜を塗布することによって、木炭への微生物棲息個体数を飛躍的に増加させ、汚濁水中の有機物の分解を従来よりもさらに促進させることを狙ったものである。微細孔隙を有する資材は微生物の原生動物による食餌攻撃を避ける格好のマイクロハビタットを提供することがわかっている(Nishiyamaら, 1995)。天然素材としての木炭も、堅牢なマイクロハビタットを有し、また、広葉樹を用いた木炭の水質浄化能はとくによく知られていたが(木炭利用研究会, 1990)、木炭の微細孔隙に住処として棲息する微生物個体数はたかだか 10^{2-3} 個/g程度と低く、大きなバイオリアクターを発揮させるためには担体資材としての木炭に何らかの修飾が必要であると思われた。さらに、電子顕微鏡による木炭の微細構造の観察から、微細構造の内壁には多くの針状の炭素繊維が見られ、これらが微生物の孔隙深部への侵入を妨げていることが観察された(Matsumoto, 1999)。そこで、木炭を天然高分子の1つであるキトサン(図-2)を用いて、その希釈液で木炭を浸漬処理し、微生物の付着状況を観察した結果、きわめて付着が良好であることがわかった(写真

Ac: アセチル基

図二 キトサンの基本化学構造

写真1 キトサン浸漬処理した木炭への微生物
付着状況

図—3 浄化設備配置概念図

1). このように、木炭をキトサンで処理したものをチャコールバイオという名称で呼ぶことにした（特許 1978017）。

3. 自然循環方式の誕生

3.1 設置場所

本方式は、量の少ない汚れた水をその主たる放流口で処理するか、または、小規模の排水路に設置するのが基本である。その理由は、一旦、これらの未処理の放流水が河川の本流に合流すると、その汚濁は一時的に希釈されるが、つぎつぎ起こる汚濁一希釈の繰り返しが結局は河川下流の高濃度汚濁を引き起こしていると考えられ、処理水量が大きくなり汚濁源で処理するのが効率的であると考えたからである。したがって、本装置は、小水路の底部に直接設置するか、または汚濁水を集水した排水管の真下に設置するともっとも効果的である。しかも、このような設置場所であれば、高い降水量が記録される場合には排水の汚濁濃度も同時に希釈されるので、装置の流入口に降水量による増水がある場合には自動閉鎖する装置を付けることによって、装置内の充填物ならびに微生物相の機能が保護される（水路の河床に設置される場合には、装置の上蓋部を流れる）。図—3 には、本装置を設置する位置の概念図を示した。

3.2 第1号基の設置から今日まで

以上述べてきたように、本装置は装置充填資材をなるべく入手しやすい自然の素材に求め、それらに若干の加工を施したものに生物浄化の定着を促した浄化装置であって、設備ならびに維持管理がなるべく低コストになるように設計されている点が特徴で

ある。本装置の最初の設置は平成5年3月、わが国最後の清流といわれるようになった四万十川の中流に位置する高知県幡多郡十和（とうわ）村昭和地区の1集落から排出される家庭排水の浄化に対してであった。設置時期、本装置の設置の経緯からいって、自治体がこのための予算を計上することは不可能であったので、東洋電化工業株式会社（本社高知市）が設計・施工をすべて社費で賄い工事を完成させた。その後、類似の家庭排水浄化のための装置が同村の側溝に数カ所設置されるに及び、充填資材のうち山林から収集される炭素系有機物の調製は村内の高年齢者が中心となって行われることになり、村からそのための労務費が若干ではあるが支払われるようになった。自分達の環境は自分達で守ろうとする積極的な住民参加が次第に定着し、排水流入口に滞留したプラスチックのゴミなどは誰かはなしに取り除かれるようになるほど、この装置が愛着をもたれるようになった（写真2）。自然の素材と生物の働きを浄

写真2 1993年に第1号機として設置されたもの
（日処理量100m³）

写真3 装置を河川床に埋設した例（左：設置前，右：設置後）

（降雨で河川が増水した場合には装置の上を河川水が流れるようにし，装置には濁流は入らないように工夫してある）

化技術の中心に置き，これを地域住民が理解し，直接参加するようになったこの浄化方式は四万十川自然浄化方式，略して四万十川方式と名付けられたが，全国各地に波及するに及び自然循環方式の名前で呼ばれている．さらに，平成6年3月には，高知県高岡郡窪川町内を流れる琴平川の河床に日標準水量4,000m³処理（最大日処理水量10,000m³）の規模のものが環境庁の補助金を受けて完成した．写真3には，本装置が設置される以前の河川状況（左）と本装置を設置した整備後状況（右）を示した．本装置も現在まできわめて良好な浄化能力を示しているとともに，地域の住民に親しまれ，かつ河川環境保全のための住民意識が以前に比べて著しく高揚したことを聞いている．高知県下には平成11年3月現在までに，本方式を基本構造とするものが四万十川流域に16箇所設置され，稼働しているが，高知県外では，本装置は香川県（財田町），岐阜県（高鷲村），神奈川県（横浜市），千葉県（我孫子市，市原市），茨城県（土浦市，石岡市）でも設置されており，いずれも良好な状態で稼働している．さらに，平成10年11月から本年3月までは，千葉県環境部が企画した手賀沼総合水質浄化プロジェクト（応募企業の中から採用された民間企業21社がそれぞれ独自の浄化方法で水質浄化を実施したもので，その結果は後日公表されることになっ

ている）の1つに本方式を参入させ，汚濁湖沼での本装置の評価を行った．

3.3 装置浄化性能評価方法と研究会の設立

本装置の最初の設置を契機に装置の浄化能を評価するための水質分析の体制がとられ，装置の運転状況がつねにモニタリングされるようになった．さらに，常時提出される膨大な水質分析データと運転状況の総合的な評価を行うための委員会として，四万十川自然浄化研究会が組織された．本研究会（委員長：筆者）の委員は農林水産省農業環境技術研究所，高知県文化環境部，四万十川流域各町村（窪川町，十和村，西土佐村，大正町），県畜産試験場，県河川課，東洋電化工業㈱の関係者から構成されており，高知県文化環境部四万十川対策室が事務局となっている．研究会は定期的に会を開催して，現場水質デ

図一4 四万十川方式によるBOD除去効果の時間帯別変化（夏期と冬期）

ータの解析, 装置の技術上の問題点の抽出, 研究会主催のシンポジウムなど会の活動方針などが討議されている。

3.4 装置の浄化評価

図-4 には上記十和村昭和地区に設置された浄化装置のこれまでの水質データのうち, 夏期および冬期の生活排水の BOD 濃度変化とその排水処理後の濃度を時間の経過とともに示した。また, 図-5 には従来分解がきわめて困難とされていた界面活性剤の本装置による浄化能を示した。いずれも, 本装置が変動の大きい流入負荷に対して, きわめて安定した浄化能を発揮していることを示している。

さらに, 夏期の流入口と放流口における細菌数の変化を流入口の汚濁濃度が高い家庭雑排水について, 2 度にわたって調査した結果を表 1 に示した。表の結果から, 本方式は生物膜主体による浄化方式を反映して, 効率的に細菌数を減少させる効果を持っていると判断される。したがって, 本方式の放流水は河川が衛生学上からみても, 改善される可能性があると示唆される。

4. 今後の課題

本装置による BOD, COD, SS(浮遊物), 濁度(透視度), LAS(界面活性剤)など水質の汚濁など外観に関する水質の向上については満足する結果が安定的にほぼ得られ, この点に関しては大きな問題は残していない。しかし, 低濃度の窒素(5 ppm 以下), 低濃度のリン(1 ppm 以下)の除去に関しては安定的に高い除去率を発揮させることはできない状況にある。この問題が解決されないと, 排水を再利用水として積極的に利用する途は難しくなる。現在, 窒素, リン酸の低濃度条件下における脱窒素, 脱リン

図-5 四万十川方式による LAS の除去効果の時間帯別変化

表 1 四万十川方式による浄化装置の細菌除去能 (1 mlあたりの菌数)

	一般細菌数		総大腸菌群数		糞便性大腸菌群数	
	1994.7	1994.8	1994.7	1994.8	1994.7	1994.8
採水年月	1994.7	1994.8	1994.7	1994.8	1994.7	1994.8
流入水	140,000	180,000	1,800	1,800	350	580
流出水	36,000	12,000	480	110	17	9
削減率(%)	74	93	73	94	95	98
培養条件	標準寒天培地 37℃, 48時間		Deso 培地 37℃, 19時間		m-FC 培地 37℃, 24時間	

酸を中心に実験室レベルで, 種々検討中である。

参考文献

- 1) 宗宮 功編著: 自然の浄化機構, 技報堂出版, p.252, 1990
- 2) 須藤隆一編著: 微生物固定化法による排水処理, 産業用水調査会, p.284, 1993
- 3) 食品産業クリーンエコシステム技術研究組合編: 最新バイオ水処理技術, 恒星社厚生閣, p.355, 1993
- 4) 松本 聡: 四万十方式による河川水質の向上構想, 土木学会誌, 79(7), 14-17, 1994
- 5) 松本 聡: 新たな自然循環システムへの企画書—四万十川自然浄化方式の意味するもの—, BIO City, no.3, 42-46, 1995
- 6) 久馬一剛編: 最新土壌学, 朝倉書店, p.216, 1997
- 7) Nishiyama, M., Senoo, K. and Matsumoto, S.: Survival of a Bacterium in Microporous Glass in Soil, Soil Biology and Biochemistry, 27(10), 1359-1361, 1995
- 8) Matsumoto, S.: Fundamentals and Practices of Soil Bioremediation, Soil Sci.Plant Nutr., 45(1), 237-251, 1999