

排水の土壌への循環

有 水 疆*

Government Forest Experiment Station

Tsutomu ARIMEZU

Government Forest Experiment Station

1. 排水の範囲

ここで取大げる排水は、排水総量の三分の二を占め、しかもいかなる法的手段に訴えても規制不可能な生活排水に限定する。つまり人間の家庭生活から発生する排水をここでは意味しているが、家畜のシ尿を含めてもよい。したがって工場廃水はここでは取扱ってはいない。

2. 土壌浄化による排水の循環的再利用の歴史

人間および家畜からの排水を土壌で浄化するという汚水処理の仕方は人類が古から実行してきたものであって、それでは土地が足りなくなると河川に投入することですませしてきた。このような水処理の仕方は現在でも世界の多くの地域で実行されているのであるが、そうした処理から生ずる疫病の防止等を目的として現在われわれが知っている浄化技術は約 100 年前に既に、開発されていた。しかし河川の水質汚濁の進行を見ながら、新技術としての浄水技術、例えば撤水汙床法や活性汚濁法が取上げられたのは1908年の大英帝国第二次汚水処理委員会の報告書に始まるとされている。そしてようやく土壌処理という自然に依存する方法よりも、物理・化学および生物学的な方法に信頼が集まるようになった。

その背景として、当時の汚水の土壌処理では、今日の水処理の過程での一次処理に相当する処理すら充分に行わなかったため、土地が当時の都市の膨張により不足してきたことが基本的な原因となり、人工的な水処理に移行する段階に入ったのではある。しかしそれにもかかわらず、欧米においても人工的な水処理技術がすべて従来の自然的な方法に取って代ったのではなく、依然として昔からの土壌処理を続けてきた地域がすくなくないことに注意すべきであろう。

しかしそうした新技術の大規模な応用にもかかわらず、水質汚濁は世界的な規模で拡大しつつあって、現在の

水処理技術をもってそれを防止することに疑問を感じる人達が現われたとしても不思議ではなかった。そして古典的な土壌処理によって、大規模に進行しつつある水質汚濁防止を試みた人達が、ペンシルヴァニア大学の研究者であって、その業績は既に筆者によって報告されているので、ここでは割愛^{2,3)}する。その結果、土壌構造、地下水の理水学的性質および気候に支障のない限り、土壌処理は適切に処理された汚水の浄化方法として実用化されうるものであることが示された。

3. 最近の動向

ここで土壌処理が今世紀の初頭になり否定された原因をもうすこし考察してみると、土壌に過大な汚水の負荷を与えると、土壌が浄化能力を失うので、その浄化能力の継続期間が河川や海洋と比較して短いことが指摘されたり、同時にその結果として地下水汚染の生ずることが土壌処理に問題を生ぜしめる原因となったのであるが、それは今日においても変りはない。

さきのペンシルヴァニア大学での実験はこのような土壌処理の問題点を巧みに解決したものであるが、その成功に刺激されてアメリカ・ミシガン州マスケゴンで連邦環境庁、保健省および工兵隊の強力な支持を受けて、地方自治体による最初の二次処理水の土壌処理が事業として試みられた。この事業は別に濃州メルボルン市での長年にわたる土壌処理の成果にも刺激されたといわれている。さらにアメリカ工兵隊は洪水防止問題および航行可能な河川および港湾への不法投棄を防止する権限もっていることを利用し、水資源管理での経験を基礎として、サンフランシスコ、シカゴ、デトロイト、クリーブランドおよびボストン地区にこの技術の実験場を設置し、その有効性を誇示している。

こうした動きを背景にして1972年10月18日水質汚濁防止法の改正法 (PL 92-500) が大統領の拒否権を越えて成立した。この改正法はそれ迄に数回提出されたもので

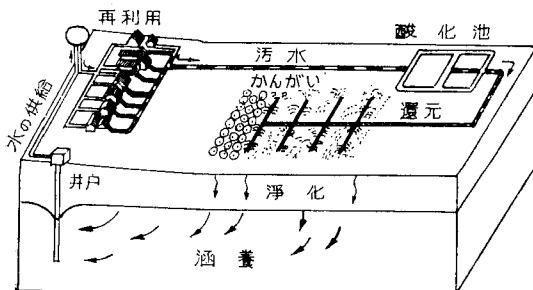
* 農林省林業試験場

あるが、その特徴は、1985年迄に航行可能な河川および沿岸に一切の汚水の放流を禁止する規制の仕方にある。したがって土壌処理が水処理の最後になるが、地下水汚染を防止する関係から水処理の在り方そのものに大きな変革を要求しないわけにはいかないのは当然の帰結であった。

元来この法案は従来の水処理技術に対する失望の所産とされているのであるが、水処理関係者の強力な反対にあって、全面放流禁止ではなく、それを目標とすることで落着いた。その改正法の特徴を極めて簡単に説明すると、土壌処理を目的とした広域地下水処理計画の策定およびその実施にあたり、実施可能にして最善の下水処理技術を用いることが要求されるが、それは土壌処理技術を中心とするものである。その場合費用と便益を基準にして評価することが要求されている。したがって土壌処理の費用-便益分析が連邦補助金を受ける意図をもつ水質汚濁防止計画の前提となった。

現在考えられている土壌処理は従来 of 下水道を中心とした排水処理施設を利用して二次処理迄を行い、最も費用を要する三次処理は土壌処理に委かせるという方向にあるが、そうした行き方の他に、1次から3次処理迄も全部土壌処理に頼るという方向もある。

つまり最も費用のかかる3次処理では脱塩迄を含めるとトン当たり200~300円を要する上に、汚泥という極めて処理困難な物質を生ずるのに対し、それを土壌処理による場合は処理する箇所の土壌および地下水面との関係にもよるが恐らく二百分の一ないし十分の一の費用でできるばかりでなく、汚泥が全く生じない上に、農林作物へ有機肥料を供給し、化学肥料に取って代り、その処理水は地下水として再利用できる。しかもこの型の土壌による水処理では維持管理が極めて簡単で、費用もかからないという長所をもっている(第1図参照)



第1図 排水の土壌による循環的再利用 (Journal WPCF, 1975 Vol. 47, No. 11 p. 26より)

わが国でこれを行う場合には、2次処理迄の段階で、毛管浄化法という一種の土壌処理法が発達しているの

で、すべてを土壌処理によって他の如何なる方法よりも排水を有効に処理できる点に注目すべきであろう。

4. 土壌浄化と公害

元来排水の土壌処理とは、生活排水中に含まれる栄養物を土壌微生物が利用して生存繁殖し、その際不純物を除き水質の純度を取り戻す機能に期待するものであるから、熱力学第2法則に反した作用を利用したものといえよう。このような生物的処理は他にも散水沓床法や活性汚泥法にもみられるのではあるが、それらが主として水生微生物や接触微生物を利用しているのに反し、土壌処理では土壌微生物を活用している点に根本的な相異があるというべきである。つまり土壌という環境における微生物の活動の方が、温度・pHを含む外部の環境の変化に対して、より安定し、より活発な生存繁殖が可能であることが、水処理における土壌処理の優位性を保証するものといえる。

ところで土壌微生物にとって、低いエントロピーである排水中の栄養分は貴重な資源であるが、排水の土壌による循環的再利用においてもそこで失われるエントロピーよりも大きな量の低いエントロピーをそこに付加する必要に迫られるのは当然である。つまり排水の土壌による循環的再利用は永久機関ではないので、その場合生物的処理の他に物理的あるいは化学的処理を組合せを考え、その処理方法によって低いエネルギーの量とその価格、およびその処理方法から生ずる拘束エネルギーの量と価格との関係で前者の低いエネルギーの量と価格との積と、後者の拘束エネルギーの量と価格との積との差を最小にする選択方法が求められよう。

水処理の方法別にこの差額を比較した場合土壌処理が最もエネルギー節約型の技術の筆頭になるのは当然であって、同一の土壌処理に属する各種の技術においてもこのような評価基準は尊重されるべきである。

土壌浄化を行った場合に必ず2次処理水を利用するのは、排水の悪臭を防ぎ、排水中の病原菌の伝染を予防するのが目的である。そこで撒布される2次処理水は必ず塩素滅菌を施すのが普通である。

5. 土壌物理学への課題

排水の土壌への循環では、水量のみならず水質についても同等以上に考慮されなければならないので、土壌化学および土壌微生物との関連において取扱わなければならない。しかし水質といっても水の流れに附随するものであるから、この問題については土壌物理が中心になるのは当然である。

現在のところ、土壌に撒布する方法には、スプリンクラーによる種々の方法、トレンチを利用する方法、溢水灌漑等々の方法があるが、そこでの負荷は1週30ミリから210ミリと可成りの巾にわたっている。それは処理する土壌の個別的な条件の他に、土地利用計画、地形、植生、地質、地下水面迄の距離、地下水の制御方式、地下水の運動、排水発生地点からの距離が考察される。土壌条件としては、土壌型、土壌の浸透能、土壌の深さが主として重視されるのは当然である。

元来排水が浄化されるのは地表から1メートル以内の深さをもつ表層の部分であり、しかも不飽和の土壌湿度が土壌微生物の生存繁殖のために要求されるので、そうした表層で浸透する水量をなるべく大量にしながら、水質が充分改善される方法を考えなくてはならないわけである。つまり地表から浸透した2次処理水が水質基準を満たす迄の期間、表層1メートル以内の所に不飽和状態で停留することが望ましいことになる。

その場合、期間に制約される程度が問題になり、期間が短い場合には投入される2次処理水の水質を予め改善しておく必要が生じてくる。事実そうした要求が強くなっているのが、ミシガン州で灌漑に用いるときの2次処理水の場合には

pH	7.5 ~ 9.2
BOD ₅ (mg/l)	2 ~ 30
DO (mg/l)	7 ~ 11
SS (mg/l)	5 ~ 100
NH ₃ -N (mg/l)	0.7 ~ 5
NO ₃ -N (mg/l)	0.1 ~ 2
有機N (mg/l)	2 ~ 15
T-P (mg/lP)	2 ~ 7

になっている。その結果、既存の水処理工場の処理過程の改善が要求され、現在可成り大きな問題になっているので、そうした水処理過程全体との関連で土壌浄化の方法を考える方向が不可欠になるであろう。

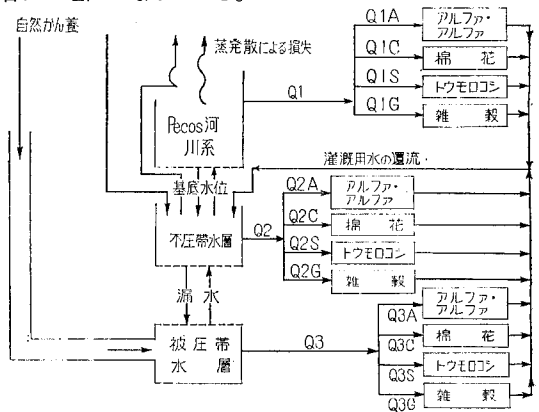
その場合、灌漑に伴うのであるから作物との関係、および地下水汚染を防止する立場を考慮する必要があるので、つぎの諸点に絞られると考えられる。

- (1) 土壌浸透速度の同定
- (2) 土壌粒子のイオン交換反応の同定
- (3) 土壌微生物の活動の変化と土壌物理的諸条件との活動の諸関係の同定
- (4) 目づまりの物理的諸関係の同定
- (5) 相対的浸透速度の最適化

ここで取上げた問題は2次処理水を土壌で浄化する地点での、ミクロの問題であるが、それを含むマクロの問題をつぎに取上げてみたい。

それは地下水学の創設者の一人である、C. E. JACOBの作った地下水資源開発の模型である。それは表流水を部分系とし、2つの連結された漏水性帯水層、つまり不圧帯水層と被圧帯水層、とその間に介在する半加圧層よりなる部分系から構成されている。それを図示すると、第2図の如く示される。その漏水の方向は局地的にはより低い水頭をもった帯水層に向かって流れる。表流水は基底水位を通じて、不圧帯水層に結びついている。

この系は農地の灌漑だけに水を供給している。そこで、アルファルファ、綿花、トウモロコシ、雑穀等4種類の作物がその対象になっている。水源の各々から供給される4つの作物の灌漑面積は既知である。JACOBの場合には12地区になっている。



第2図 JACOB 模型

不圧および主要被圧帯水層は降雨によって確率的な涵養をうける。更に不圧帯水層には漏水および灌漑から還元された浸透水の投入量がある。また不圧帯水層は河川への自然流出という型で水を失うこともあれば、河川からの自然流入によって水の供給をうける場合も生ずる。また河川は蒸発によって水を失う。この系では、2つの帯水層からの揚水と表流水からの水を灌漑に用いその水量を決定変数とし、灌漑によって収穫される作物の収益を長期間にわたり最大化する最適地下水管理の方式を求めている。地下水の運動は偏微分方程式の境界値問題になっている。

この模型の灌漑に生活廃水の2次処理水がここでの問題では加わるが、山地の林地に撒布する場合には、山地地下水の運動をこれに加えることになろう。

このように地下水盆の最適管理という立場から、排水の土壌への還元を考える必要があると思われるが、そうになると数学の問題としては多次元の偏微分方程式の極値問題と同定という技術を要することになろう。

5. おわりに

この模型に地盤沈下防止という問題を持ち込むとき、この表題の関連する範囲は更に広がる。

参 考 文 献

- 1) Z. A. Saleem and C. E. Jacob (1971) Optimal use of Coupled Leaky Aquifer, Water Resources Research, Vol. 5 No. 2
- 2) 有水 彊 (1973) 汚水再利用の循環機構のシステム化 (I) 水利科学 94号
- 3) 同 上 (1974) 汚水再利用の循環機構のシステム化 (II) 水利科学 95号
- 4) 同 上 (1974) 汚染水の循環的再利用 環境情報科学 3巻1号
- 5) 同 上 (1975) 地下水資源開発とORオペレーションズ, リサーチ 20巻11号
- 6) 同 上 (1976) 地盤沈下防止と最適地下水管理 オペレーションズ・リサーチ 21巻1号

コメント

農士試 大井 節男

土壌処理について具体的研究をしたことのない私にとって有水さんのコメントターは任が重すぎます。しかし、農林省に入省し農村の汚水処理に取組む中で土壌処理の問題を避けては通り得ないとの結論に達し、今回はその意味で、自分自身の考え方の整理も兼ねながらコメントターを努めさせて頂きます。

さて本題の「排水の土壌への循環」の考え方を、有水さんが最初に強く主張されたのは、「汚水再利用の循環機構のシステム化 (I) (II)」(水利科学, 1973~1974)であったと思います。そこでの主張の概要は、まず土壌を、その中の微生物と地上の植生を加えて、生物フィルターとしてとらえる。その生物フィルターは単に汚水処理(3次処理)だけでなく、地下水涵養と農作物や材木の生産をも目的とする。従って、水処理技術だけでなく、地下水資源開発の技術および生物制御技術が必要とされる。それをたくみに総合化することが、汚水再利用の循環機構のシステム化である。このようなものであったと記憶しています。そして特に地下水資源開発と管理に重点を置かれ、ペンシルバニア大学の研究事例を引用されながら、森林への汚水還元について詳しく論じられていたように思います。

さて、日本で土壌処理に対する関心が高まってきた背景は、富栄養化対策等から3次処理まで必要となってきた都市における下水処理の行きづまり、あるいは農村での畜産汚水対策等の行きづまりからであります。特に捨

てる場所に困った人達からの問題提起であり、土壌肥料の側からの、即ち、農業生産を發展させる側からの土壌処理の主張は弱いのが現状であります。

とにかく汚水を液肥として使ってくれなくては困るといのが本当のところですが土壌処理問題は避けて通り得ぬものと思われまます。今回は特に有水さんが1次2次処理をも土壌に頼るという事を主張されて土壌処理の内容が複雑化したので、筆者なりにその整理をさせて頂きました。これには「土壌の汚染と浄化作用」(高橋一三著:産業用水調査会)を参考とさせて頂きました。

汚水の土壌処理については大きく三つに分類して考えるのが適当でしょう。

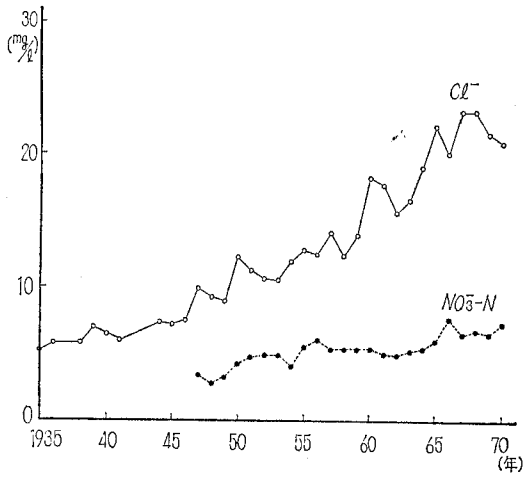
その第一は土壌微生物の分解作用そして植物の養分吸収作用を利用して汚水中の栄養分を除去する方式です。いわゆる土壌還元あるいは農地還元といったものがこれであり、汚水を利用する土地によって林地・草地・畑・水田・樹園地還元等が存在します。しかし、我国では草地還元以外はあまり普及していないのが実状です。今後、林地・畑・水田・樹園地等への汚水還元技術の確立がのぞまれます。

さて、このかんがい法の技術的問題点は、まず生汚水から利用可能な汚水に変える安定化技術、次に集まった汚水を汚水利用地まで運ぶ搬送技術、最後に液肥としての施用技術に分類されます。そして従来の清水のかんがい技術に比べ、汚水かんがい法は、より複雑な管理技術が要求されるでしょう。

又、植物による吸収を主体として汚水中の栄養分を取り除こうとするこの方式は、非かんがい期にどうするかとか、広大な面積を必要とするとかの種々の問題をかかえています。この面積の問題で行きづまって古いかんがい法が近代的処理方法に切りかえられてきた経過もあります。最後に注意すべき点は、かんがい法は、一部地下浸透するものを除き排水は系外に排出するのが原則であるということです。

第二に、地下浸透による汚水処理です。汚水を排除するために土壌の透水性を利用してはいますが、土壌の河過作用や、土壌微生物による分解・安定化作用も期待し得るものです。これは普通、沈澱池で目詰りの原因となるSSを除去してから行なわれますが、浸透水のゆくえとその水質が問題です。

地下浸透式の浄化槽は衛生的見地から、我国では普及していません。しかし、吸込み井戸にみられるような簡易施設が、家庭雑排水に対しては普及しています。これは予備沈澱させる事もなく、直接、堅穴に流入させ透さ



せるものです。しかし、吸込み井戸はあくまでも公共下水道のできるまでの暫定的なものとして位置づけられています。

最後に、地下浸透方式の問題点をあげると目詰りと地下水汚染があります。図に示す武蔵野台地の地下水の水質変化も吸込み井戸の影響と思われます。

第三に汚水処理施設の材料として土壌を利用する場合があります。これは土壌を大地から隔離して、その中で処理を行うものであり、好気性条件下で土壌表面の生物膜と汚水の接触作用を利用するものです。又、滲過作用は土壌に期待せず、SSをあらかじめ沈澱池でおとしておくのが普通です。

このような方式の例として、新見提案の毛管浄化法、あるいは尾形提案の散水汙床の変法（土壌をかごにつめそれを積みあげた形）などがあります。

ここでの問題点は、接触材に碎石等を用いる散水汙床に比べて、土壌を用いるので、目詰りや酸素不足の問題がより深刻である点であります。各々、その工夫がなされていると思いますが、これに対しては、今後、土壌物理学的・土壌化学的・土壌微生物学的検討が必要でしょう。

最後に土壌処理はこのように完全に分類され得るものではないでしょう。有水さんの主張するように、かんがい法において、汚水の浸透を強調し、水資源的立場から、アプローチする必要もあるでしょう。私の主張したかったのは、理念として、いわゆる汚水を液肥として用いる土壌還元を推進すべきであり、地下浸透方式あるいは土壌を利用した処理施設は、それを補完するものとして位置づけるべきではないかという事です。

廃棄物であった汚水を農業生産の中で資源の位置までひきあげる事はかなりむずかしい事でしょう。糞尿の農地還元方式の崩壊の過程が現在まで続いている中で、どんな技術でもって、どんな体制でもって新しい農地還元方式を還元し得るのか、土壌還元を主張される方々に、単なる可能性を主張されるだけでなく、具体的な、現実の技術体系として確立して頂く事をお願いして私のコメントを終りに致します。