

土壌浸透法の技術的發展

菅原正孝*・藤川陽子**・濱崎竜英***・新井剛典****

Technical Development of a Soil Percolation System

SUGAHARA Masataka*

FUJIKAWA Yoko**

HAMASAKI Tatsuhide***

ARAI Takenori****

要 旨

古くて新しい土壌浸透法は、自然の浄化能力を利用した水処理技術の一つであり、汚水が土壌中に浸透し流下する過程で、汚水中の汚濁物質が土壌を構成する土粒子などの物理的なる過、化学的な吸着及び生物化学的な分解という分離・分解機能によって除去されるというものである。

浄化が可能な汚濁物質は、浮遊物質、有機物、リンなどが挙げられるが、土壌内において無機性の浮遊物質などによる目詰まりが起りやすく、また処理速度が遅く、所要面積が大きいなど、難点があり、適用されるケースも限られている。土壌浸透法で対象とする汚水は広範にわたり、生活雑排水、し尿や畜産排水の処理水、河川や湖沼の環境水、雨水などがあげられる。

本稿では、こうした土壌浸透法の従来のシステムを概観し、あわせて筆者らがこの10年ほど携わってきた研究調査及び事例について取りまとめた。

自然土壌のみでは浄化能力は、多くは期待できない。よって、浄化機能の改善には混合土壌方式が有望である。具体的には、マサ土、黒ボク土、赤玉土などを浄化材料として利用し、活性炭、木炭、凝集剤を添加して、有機物やリンなどの栄養塩類の分離除去能を大きくする。

ろ過速度を上げるためには、多段階方式や造粒方式が必須であり、そのための様々な技術開発を行ってきた。さらには、廃棄物の有効活用の視点から、充填材の開発もあわせて

平成21年11月24日 原稿受理

*大阪産業大学 人間環境学部生活環境学科教授

**京都大学 原子炉実験所准教授

***大阪産業大学 人間環境学部生活環境学科准教授

**** (株)環境技術研究所所長

行ってきた。それらの成果や実施例を概観するとともに将来に向けての適用可能性について言及した。

キー・ワード：水土の技術， 土壤浸透法， 排水処理， 直接浄化， 混合土壤

1. はじめに

筆者のひとり菅原が編集者・著者として関わった『都市の水環境の創造』（國松孝男・菅原正孝共編著，技報堂出版）は，1988年に出版されたので，既に20年経過したことになる。その著書の「序」によると，都市型洪水の頻発，水域の汚濁の進行など，都市の水循環・浄化機能の喪失は，近代土木技術がもたらしたとの認識のもとに，それを補完する技術が必要となっており，それは従来の経済社会が希求してきた「ハイ・テクノロジー」より，むしろ伝統的な技術「ロー・テクノロジー」にあるという。ここに，あらゆる生物の生命を根底から支えている自然生態系の機能を活用した「水土の技術」の出番があり，「水土の技術」という言葉は，水と土（壤）が本来備えている自然の力を活用して環境の再生と創造をはかる技術の総称である，としている。

菅原は，この出版の2年ほどさかのぼる1986年から大阪土壤浸透システム協同組合活路開拓ビジョン実現化事業委員会に参画し，この技術の普及促進を目指して研究者の立場から研究・調査にかかわってが，そのときの活動を委員会が取りまとめた報告書が契機となって前出の出版となった。

その後も様々な形態を取りながらこの種の研究調査活動は続けられている。研究組織としては，水環境研究会，土壤浸透浄化技術研究会，NPO法人エコ浄化推進機構があり，その間にもこれら研究会活動の成果として『都市の水環境の新展開』（岡太郎・菅原正孝共編著，技報堂出版，1994年），『水をはぐくむ』（大槻均・澤井健二・菅原正孝共編著，技報堂出版，2000年）が出版された。

本稿では，筆者らが関わりはじめて4半世紀になる土壤浸透法に関する研究を取り上げ，とりわけ最近の10年間の成果を中心に技術的な進展を紹介し，さらに将来展望に言及する。

なお，「水土の技術」と位置づけられる土壤浸透法であるが，その他にもいろいろな名称で呼ばれる。例えば，土壤浄化法，土壤浸透浄化法，土壤浸透式水浄化法，土壤浄化浸透法，土壤ろ過法，であるが，「土壤浄化」という用語が入ると「汚染した土壤の浄化」と混同されやすいこと，また言葉が長くない方が良いということで，本稿では「土壤浸透法」で統一した。

2. 土壤の浄化・浸透機能の基礎

2.1 土壤浸透法の概要

土壤浸透法は、自然の浄化能力を利用した水処理技術の一つである。一般的な処理工程は、土壤表面に汚水を散布することによって汚水が土壤中に浸透し、浸透する過程で汚水中の汚濁物質が、土壤を構成する土粒子などの物理的なろ過、化学的な吸着及び生物化学的な分解という分離・分解機能によって除去されるというものである。

浄化が可能な汚濁物質は、浮遊物質、有機物、リンなどが挙げられるが、無機性の浮遊物質は目詰まりの原因となり浄化対象となりにくい。土壤浸透法で対象とする汚水は広範であり、生活雑排水、し尿や畜産排水の処理水、河川や湖沼の環境水、雨水などがあげられる。浮遊物質の除去も可能であるが、特に土壤浸透法に期待する効果は、有機物と栄養塩類の除去である。

土壤浸透法の浄化材料として利用する材料は主として土壤である。土壤浸透法として一般的に日本で用いられる土壤は、マサ土、黒ボク土、赤玉土などで、これに活性炭、木炭、凝集剤を添加して有機物やリンなどの栄養塩類の分離除去能を大きくする場合がある。

水量負荷（ろ過速度）は、数cm/dayから数m/day程度であり、上水道における緩速砂ろ過法の程度に相当する。そのため、他の処理法と比較すると大きな敷地面積を必要とする。

2.2 ろ過

土壤は、様々な粒径の土粒子と空隙によって構成されている。汚水が土壤に浸透する際、汚水中に含まれる浮遊物質などは土粒子に捕捉されることにより、除去が行われる。ろ過は、空隙の大きさよりも大きい汚濁物質を取り除く機械的なろ過に加え、汚濁物質間、または土粒子と汚濁物質との間で発生する凝集によるろ過が行われ、空隙よりも小さな汚濁物質も捕捉される。土壤浸透処理においては、土粒子が砂ろ過などで代表される清澄ろ過と比較すると粒径分布が大きく、かつ微細な土粒子も存在することから、微細な浮遊物質の除去も可能である。このような浮遊物質の除去は、概ね汚水流入側の土壤表面で行われている。

浮遊物質による閉塞が起きると、計画処理水量を確保することができなくなる。そのため、土壤浸透法を運用するためには、ろ過という機能を可能な限り利用しない方法を検討せざるを得ない。

閉塞した場合には、表面土壤の除去なども検討できるが、一般には浮遊物質を多く含む汚水を対象とする場合は、土壤浸透法の前段で浮遊物質の除去を行うことが適切である。浮遊物質のうち、特に無機性の浮遊物質は閉塞の主たる原因物質である。有機性の浮遊物

質の場合は、例えば、流入を中断し、休止するなどして、後述する生物化学的な分解を待てば閉塞が解決することもある。いずれにしても浮遊物質濃度が高い汚水、無機性浮遊物質の割合が大きい汚水、等を土壌層へ直接流入させることは困難であり、避けた方がよい。

2.3 吸着

ろ過では、浮遊物質など粒径が大きな汚濁物質が除去対象であるのに対し、吸着では溶解物質が対象となる。溶解物質のうちの吸着され易い物質が、土粒子中に含まれる吸着材料に吸着し、処理対象水から分離される。吸着材料となりうる物質としては、鉄やアルミニウムなど一般的に凝集剤として使用されている物質や活性炭のような多孔質で比表面積が大きな物質が考えられる。

土壌により、リンや有機物の吸着が可能であることは、過去の研究や実施例からも知られている。吸着のされやすさは、分子構造や大きさ、界面張力、溶解度、イオン極性、pH、濃度などによって変化する。ろ過と同様に吸着にも限界があり、吸着効果もやがて寿命となり、吸着していた汚濁物質が流出する。

2.4 吸収・分解

古くから土壌浸透法では、土壌中に生息する微生物によって有機物の吸収と分解が行われ、そのメカニズムが主たるものであるとされてきた。日本における年間降水量程度(1600～1800mm/年)の水量負荷であれば、微生物による有機物の吸収や分解は期待できるが、1m/日程度の大きな水量負荷を与える土壌浸透処理では、微生物作用は大きく期待できない。実際に易生分解性有機物と難分解性有機物の除去率を比較しても大きな差は生まれていない。仮に微生物による吸収と分解が起きれば、易生分解性有機物の除去率は大きくなることが予想される。ただし、多種多様な微生物が土壌中に存在することから、土壌微生物の研究が進展すれば、水量負荷が大きい場合であっても微生物による有機物の吸収と分解が起こる可能性があると思われる。また、土粒子に捕捉や吸着によって有機物が土壌中に長く留まることが可能であれば、微生物による吸収・分解は促進されると考えられる。

3. 緩速土壌浸透システム

3.1 緩速浸透法

農業灌漑法に類似のものであるが、都市排水や工場排水などに用いられる方法で、水量負荷は、0.5～6m/年と土壌浸透法では最も小さい。一般的に土壌表面にスプリンクラー等で散水し、土壌中への浸透と蒸発散によって汚水は処分される。図1に緩速浸透法の概略を示す。

欧州では16世紀ごろから採用されており、米国では現在、800ヶ所以上で緩速浸透法が

稼動している。狭窄な日本などでは採用が困難な方法である。

3.2 表面流下法

表面流下法は、草が生えた緩い傾斜のある地表面に沿って、汚水を流下させて処理する方法である。水量負荷は3～20m/年程度である。図2に表面流下法の概略を示す。緩速浸透法の場合、汚水の全量を土壤への浸透もしくは蒸発散としているのに対し、表面流下法は、土壤への浸透と蒸発散に加え、下流部に設置された水路に流入させている。汚水は地表面を流下することから、緩速浸透法より浮遊物質の影響は小さいといえる。

3.3 トレンチ法

トレンチ法は、多孔性散水管を土壤中に埋設し、汚水を土壤中に散水、浸透させる方法である。図3にトレンチ法の概略を示す。排水管を設置しないで、下部土壤層から地下へ浸透させる方法もある。

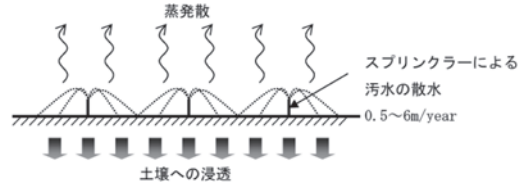


図1 緩速浸透法の概略

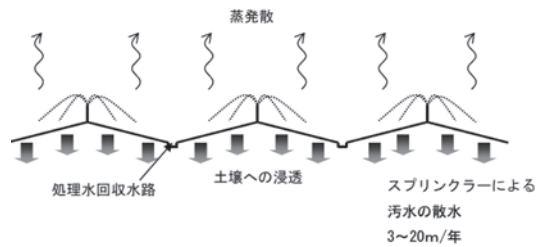


図2 表面流下法の概略

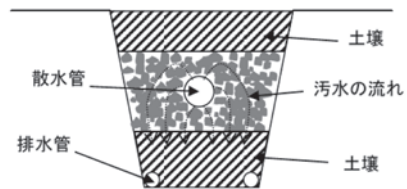


図3 トレンチ法の概略

3.4 混合土壤層トレンチ方式（循環再利用方式）

3.4.1 構造と特徴

土壤による汚水処理法は、浄化機構が定量的に理解できないまま、経験に基づいて使われてきた。その要因にひとつは、現地にある自然土をそのまま利用することにあつたものと思われる。しかも、多くは地下浸透方式か蒸発散方式であり、水循環利用という発想はなく、所要面積も大きく設置場所は制限されていた。

前出の従来型のトレンチ方式でも同様であり、基本的には自然土を用い、処理水は地中に浸透させるのが一般であるが、この場合、処理性能は、土壤特性や地下水水位との位置関係によって左右される。しかし、土壤特性は、地域によりかなり異なり、設計や維持管理

を考えると不確定要素が多く、結果として安定的な処理が期待できない。それを改良するための一つの方法は、土壌そのものを壤施設として都合の良いように人工的に改良することである。

本システムでは、土壌を人工的にブレンドする手法を導入した結果、因果関係も定量化できるようになった。その特徴は、次のようにまとめることができる。

- ① 土壌層内の土壌粒子の粒土分布、混合素材の混入割合、層の厚さ等の構造を変えることによって目標とする処理水質・処理量を得ることができる。
- ② トレンチ下方に空気層を設けることにより、より好気的な土壌環境を創出できるので微生物の生息域を拡大、変更することができる。これによる副次効果として、不飽和浸透、団粒化の促進さらには発生する汚泥量や残滓物は少なく、維持管理も容易になる。
- ③ 装置の上部は、土壌被覆されるので植物が植えられる。これは美観の形成と緑地空間の拡大につながる。

土壌浸透浄化技術研究会では、表1に示すような組成でもって混合土壌をつくり、土壌の浄化能、浸透能を高める工夫をしている。無機質としての川砂、軽石、マサ土は、混合土壌の有効径の調整に使われ、主として透水性も高める効果がある。鉄粒は、土壌中鉄物のリン除去能を補完するうえで有効である。活性炭は、有機物の吸着材としてよく知られており、脱色効果も期待できる。有機質としての腐葉土、パーク堆肥、鶏糞は微生物の住処としての役割を担う。このような組成からなる混合土壌であるが、約83%が無機質で占められている。こうした工夫によって、処理機能の持続期間を長くすることが可能となった。

トレンチの構造は、図4に示すが、ここでの新しい試みとして混合土壌層の下部に、ろ過層、通気層および貯留層を設けた。ろ過層は、処理水の安定性を高める意味で効果的であり、通気層は、好気性微生物の活性化のためである。処理水の再利用ができるように貯留槽を設けている。得られた処理水は、トイレの洗浄水としての利用が一般的であるが、消毒工程を追加することにより、さらに手洗い用としての利用も可能である。

表1 混合土の組成・物性および層厚

測定項目	単位	1号トレンチ	2号トレンチ	備考	
混合土の層厚	cm	97	82		
組成	無機質	%	83.22	83.98	真砂土・川砂・軽石・パーライト・鉄粉
	活性炭	%	1.77	1.68	
	有機質	%	15.01	14.32	腐葉土・パーク堆肥・鶏糞・骨粉
混合土の有効径	mm	0.090	0.100	真砂土・川砂による合成粒径	

図4に示すように、二つの型式がある。土壤層の幅は同じであるが、その間にトレンチが1本あるのを1号トレンチ、2本あるのを2号トレンチと称している。ただし、トレンチの1本あたりの長さは、1号トレンチが5m、2号トレンチはが4mである。なお、施工が容易なように、さらには、単位面積あたりの処理量を上げるために、空気層の位置を両者で変えている。また、表1に記載されているように、2号トレンチでは1号トレンチに比較して、混合土壤層の厚さを薄くし、土壤の粒度を大きくしている。つまり、2号トレンチは、1号トレンチの改良型であり、次節ではこの2種類のトレンチの比較検討も含めておこなった実証実験について述べる。

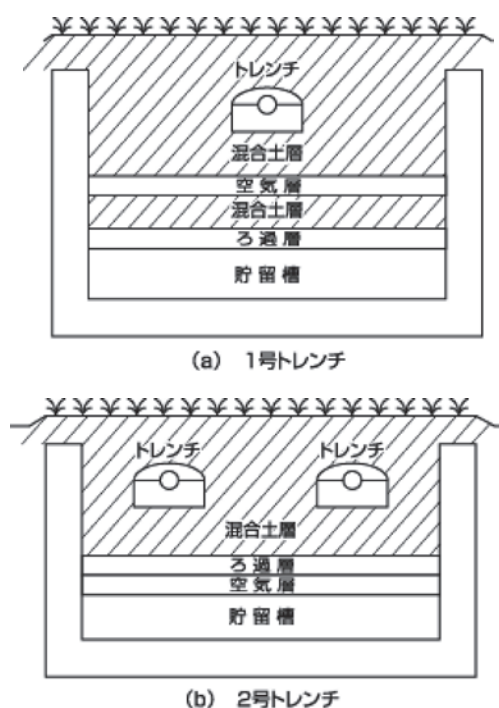


図4 混合土壤層トレンチの概略

3.4.2 実証実験の概要

大阪府下の終末処理場から得た生下水を合併式浄化槽にて処理し、これを流入原水として2種類のトレンチにて処理を行った。トレンチの運転は、1日に、16時間稼働、8時間休止とした。トレンチへの流入水は、1時間に1回、間欠的にポンプで送り込まれた。全実験期間は、夏から春にかけての約8ヶ月であり、その間の運転パターンは、2ヶ月運転、1ヶ月休止とした。

水質測定は、pH、BOD、COD、SS、大腸菌群数、全リン（T-P）、全窒素（T-N）、透視度、濁度、色度とした。

実験結果は、次に示すように、処理水量（ $l/m^2/日$ ）と処理水質の二つからなる。

処理水量については、1号トレンチでは、80（ $l/m^2/日$ ）前後で推移しており、一時70（ $l/m^2/日$ ）に低下したものの、休止による回復効果もありほぼ安定した処理水量が得られた。一方、2号トレンチは、100～110（ $l/m^2/日$ ）と高水準を達成したが、後半期には、汚泥がトレンチ内に流入するなどの不測の事態が起きたことから結果としては、期間平均で1号トレンチ77.1（ $l/m^2/日$ ）、2号トレンチ80.2（ $l/m^2/日$ ）となり、大幅な処理水量増大に繋がらなかった。

つぎに、水質に関する結果について述べる。SSは、流入水において大きく変動してい

表2 用途別目標水質²⁾と実験施設で得られた水質

項目	単位	親水用水	修景用水	水洗便所用水	本施設
pH	—	5.8-8.6	5.8-8.6	5.8-8.6	6.5-8.1
BOD	mg/l	3以下	10以下	15以下	3以下
COD	mg/l	—	20以下	30以下	11以下
SS	mg/l	—	—	10以下	5以下
大腸菌群数	個/ml	0.5以下	10以下	10以下	0.5以下 ¹⁾
濁度	度	5以下	10以下	—	5以下
色度	度	10以下	40以下	—	2.5以下
臭気	—	不快でない	不快でない	不快でない	不快でない
備考		人体の接触を前提としない	人体の接触を前提としない	—	—

1) 大腸菌群数は、滅菌装置との併用による。 2) 用途別目標水質 (H 2年3月建設省)「下水処理水の修景・親水利用水質検討マニュアル(案)」より (H 2年3月厚生省)「再利用水を減水とする雑用水道の水洗便所羊水の水質基準等の設定について

るものの処理水水質は安定しており、おおむね5mg/l以下に収まっている。BODは、流入水ではSS同様に大きく変動しているが、処理水は、1号トレンチ0.5mg/l、2号トレンチ1.2mg/lと良好である。ちなみに、SS、BODともに、再利用水に対する用途別目標水質(表2)を満足している。

再利用水の水質目標との関連で、2号トレンチの浄化能についてその他の水質測定結果を述べる。CODは、処理水は10mg/l以下で推移しており、水洗便所用水、修景用水には問題なく利用できる。濁度についても、3度以下が確保でき、親水用水としても利用可能である。しかし、大腸菌群数、色度は、ともに厳しい目標値が設定されている親水用水の目標値には及ばない。

富栄養化対策として欠かせないT-N、T-Pの除去に関しては、今後ますます重要になってくるが、本システムでは、T-Pはともかく、T-Nに関しては気温が下がる冬季における性能低下は避けられない。

4. 高速土壌浸透システムの開発

4.1 多段土壌層散水方式

4.1.1 構造と特徴

多段土壌層は、排水処理において、0.1～1.0m/日のろ過速度でBOD、COD、窒素、リンを除去するシステムとして開発された。

土壌には、有機物と鉄粒が混合されており、それはブロック状に形成されて用いられる。その構造は、図5に深さ方向の断面図を示すが、土壌ブロックの間にゼオライトが配置され、土壌全体は、いわゆるモザイク状になっている。ゼオライト部(通水層)は、土壌ブ

ロック部（土壤層）に比べて格段に透水性に優れている。したがって、土壤内では、水は土壤ブロック内をゆっくりと時間をかけて浸透するとゼオライト部を比較的早く流下すると、2通りの流れ方をしていくことになる。中ほどにある曝気装置は、有機物やリンの除去を効果的にするためには必要である。ただし、過剰バッキは、窒素除去を低下させる。水の供給は、多孔管による散水方式である。

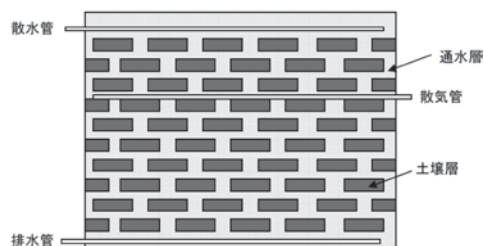


図5 多段層法の概略

この構造によって浸透能は大きく改善されることになり、前述のトレンチ方式の数倍の処理水量が確保できる。その代わり、通水層の浄化力は弱いため、処理水の水質は若干低下することは避けられないこと、また、現場での施工が複雑であり、時間と労力がかかることが短所である。また、浸透水は、浸透性能も浄化性能も異なる2種類の部分（通水層と土壤層）を通過することになるので、両者の分配割合の如何が処理性能を決めることになる。

4.1.2 河川水の浄化への適用例

本方式は、当初汚水処理法として研究開発されてきたが、河川水の直接浄化への適用について種々検討され、現実に遠賀川流域において実用に供されている。以下においては、この事例を中心に報告する。

福岡県飯塚市を流れる熊添川は遠賀川の支川である。遠賀川への流入負荷を削減するために熊添川が流入する地点の河川敷に本システムを設置し、熊添川の河川水の直接浄化を図っている。処理水は、遠賀川に放流される。システムは、前処理施設と土壤浸透施設から構成されている。前処理は、夾雑物やSSを除き、土壤層の目詰まりをできるだけ防止する役割を担っている。通水層は、ゼオライトではなく、軽石を用いるなど対象水の特性を勘案して部分的に改良を加えている。

2005年に本格的に稼働し、現在に至っている。設計では、流入水BODは、15.7mg/l、処理水BODは、1.6mg/lである。一日の設計処理量は、8000m³/日であり、この場合のろ過速度としては、4m/日であるが、本来河川水の直接処理を目的とする場合、河川管理者によれば、10m/日以上とれると理想的であるとのことであり、その意味では今回のシステムではまだ期待に応えられていない。

2007年度の月一回の水質測定結果によると、BODは流入水2.7～11.0mg/lに対して流出

水0.5～1.1mg/lとなり、目標値は達成出来ている。SSについては、流入水1～12mg/lに対してすべての流出水1mg/l未満となり、やはり満足できる結果である。処理水は、一見して無色透明であり、上記のデータはそれを裏付けている。

こういった施設の場合、河川のゴミ、草、ビニール類などの流下物が多いと、取水口のスクリーン部に付着し、取水自体が困難になることがある。また、施設が高水敷部にあるために洪水時には施設そのものが冠水し、前処理施設内部に濁水が流入するなどにより機能しないことが起こりうる。

被覆土の部分については、雑草の繁茂は避けがたいが、その根が土壌層にまで達することから、ポーラスコンクリートにするなどの対策も必要である。

4.1.3 生活排水への適用

中国の首都北京から西へ約300kmの黄土高原の東端に大同市という人口300万人程度の炭鉱の町がある。大同周辺は、年々水不足が深刻になっており、水の流れない河川が出現したり、地下水位は年に2～3m低下するなど、きわめて劣悪な水事情を呈している。市内にある環境林センターの灌漑用水が不足しているという状況のもと、周辺の住宅団地からの生活排水に多段方式の土壌浸透法が採用されることになった。250m³/日の処理能力があるこの施設は、沈殿槽、ろ過層を経た後に多段土壌層で処理されるシステムである。2003年4月に通水され、その浄化効率はほぼ期待通りであり、有効性が実証された。同年9月の水質分析結果では、流入原水は、COD (Cr) 50.9～76.4mg/l、TOC37.5～38.4mg/l、T-N3.3～5.2mg/l、T-P6.6～6.7mg/l、除去率は、それぞれ65～75%、79～80%、37%、54～56%であった。

4.2 造粒土壌層散水方式

4.2.1 構造と特徴

自然に団粒化している栃木県産の赤玉土を用いると、ろ過速度として数m/日が得られるが、この赤玉土を用いる土壌浸透法は、砂を用いる方式よりも数段優れている。これは、団粒土壌が有する吸着、重力浸透、微生物の保持の作用が、水質浄化に有効に働いているからである。ただ、団粒土壌の課題は、処理性能、耐久性およびコストにある。それらを解決するための研究が、数年来筆者らの研究グループでなされてきた。

造粒土壌層散水方式も多段層法と同じく、通水性を確保することを目的とした構造となっている。造粒法は、自然状態もしくは篩い分けによって粒状になっている赤玉土や鹿沼土を用いたり、造粒加工によって浄化能力の高い材料を粒状にしたものを用いたりする方法である。また、造粒土壌の耐水性を確保するために、造粒加工時にバインダーを利用することがある。この方法を使えば、今まで浄化能があったにも関わらず通水性がないこ

とから利用されてこなかった土壤や廃棄物として処分される汚泥等についても用いることができる。図6に造粒法の概略を示す。

4.2.2 廃棄物の利活用

土壤処理法の中の高速度浸透法に用いる土壤には、通水性が求められる。そのため、今まではマサ土など通水性を持ち合わせた土壤が用いられてきた。しなしながらマサ土は、有機物やリンの吸着性は大きくなく、高い性能を発揮することができなかつた。一方、黒ボク土などは有機物やリンを吸着する能力を持っているにも関わらず、通水性がなく、湿潤状態になると閉塞状態になり、本来持っている能力を発揮しないという問題点があつた。

今後、高速度浸透法の性能を向上させるためには、土壤の改良が必要となってくる。まず、造粒法があげられる。次に、通水性とともに強度を確保するため、焼結加工がある。さらに、土壤以外の材料についてももっと検討すべきである。特に地下水を原水とする浄水場から発生する汚泥は廃棄物扱いであるが、その中には、鉄やアルミニウムなど、吸着剤として十分な能力を持った物質が多く含まれている。このような廃棄物を使用することによって循環型社会への一助となると思われる。

多種多様な廃棄物排出される現状を鑑みて、それらの中のいくらかでも有効活用できれば環境問題の解決に向けて少しでも貢献できるのではないかということから、浸透ろ過材としての可能性について検討した。

第1段階では、数m/日程度の処理速度の土壤浸透浄化を前提にして、土壤、鉍物および各種の廃棄物素材のうちリンや腐植質有機物の吸着特性に優れた材料を探索した。方法は、バッチ試験でのスクリーニングを経て、造粒した試料を用いてのカラム試験とパイロットスケールでの試験によつた。バッチ吸着試験では、火山灰土23種、沖積土12種、鉍物6種、炭5種、堆積物3種、砂2種、汚泥10種を対象にした。フルボ酸については、ゼオライト、一部の炭、リン酸アバタイト、黒ボク土、褐鉄鉍、鉄分の多い浄水汚泥が有望であつた。リン酸吸着能の高かつたのは、黒ボク土、火山灰土、浄水汚泥であつた。カラム試験では、バッチ試験とは異なる結果も出たが、フルボ酸の場合、その要因は造粒の際の団粒形成材（高分子化合物）の阻害とも考えられたので造粒方法の改良が課題となつた。

廃棄物のうち、赤玉土・鹿沼土の園芸用団粒を製造する際に副産物として発生する微粉状の土（廃棄物として処分されている）も吸着性に優れていることから次節で述べるよう

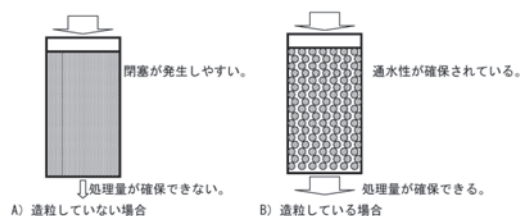


図6 造粒土壤層法の概略

に現地通水試験の対象試料とした。

4.2.3 畜産排水からのリン除去

ダム集水域では、畜産排水を抱えているケースは比較的多い。そうした事例の一つが、国土交通省が管理する八田原ダムである。とりわけダムの富栄養化問題をかかえていることからリン対策が喫緊の課題となっている。そこで赤玉土、黒ボク土に改良を加え、そのリン除去能を強化して実証実験をおこなった。改良の方法として、土壌を高温焼成した後、場合によっては骨格球状ろ材を混合して、造粒化するという方法を採用した。

造粒赤玉土は、鹿沼産と山梨産のものを使用した。造粒黒ボク土は、広島産である。いずれの場合も、加熱は600℃、15～30分間とした。自然のままの黒ボク土についても実験に供したが、その場合は、骨格球状ろ材としてベントナイト数%を混合して、いわゆるろ材混合型として用いた。土壌層(W0.8m×L約1.2m×H0.5mまたは1.0m)は、有効容積0.5m³あり、通水は、湛水式下向流とした。

畜舎から排水される二次処理水を対象に4～6ヶ月の期間連続実験した結果、リン吸着能は、主に土壌の産地/種類、加熱処理などの加工法に依存すること、および造粒赤玉土及びろ材混合型黒ボク土において、リン、BOD等に対し高い除去率が安定して得られることが分かった。さらに、赤玉土を用いて、畜産排水中に存在する微量物質であるエストロゲン(天然女性ホルモン)に着目してその除去率を測定した。その結果、溶解性有機物全般の平均的除去率と比べて高い除去率が得られることが示唆された。

4.2.4 加熱加工による吸着能の変化

赤玉土および黒ボク土の加熱加工処理が、リン酸とフルボ酸の除去機能に与える影響を調べた。加熱温度は、200℃、400℃、600℃の3段階とし、加熱しない場合と比較した。その結果、加熱なしと600℃加熱が他の加熱温度に比べて良好であった。つまり、600℃加熱では、吸着能への影響はなかった。

なお、造粒した土壌が時間の経過とともにその吸着能が変化することが想定されたために保存条件を変えてその変化特性を調べたところ、以下のような結果が得られた。実験は、赤玉土・鹿沼土の主要成分であり、吸着能の要因であるアロフェンを用いて検討した。アロフェンを600℃、30分間加熱加工した試料の保存方法として、25℃の室内、冷蔵庫内、シャーレに入れガーゼを被せての野外保存の3条件とした。保存期間は半年とした。この結果、アロフェンのリン酸・フルボ酸に対する吸着能の変化特性が、同様にして求めた鹿沼土・赤玉土の変化特性とほぼ一致した。そのことは、土壌の吸着能の変化は、アロフェンに起因するものと推測できる。また、その原因は自身の官能基が風化により変化し、表面電荷を変化させたためであると考えられる。

5. 土壤浸透法の課題

5.1 処理水量の維持

河川水や湖沼水などの浄化に土壤浸透法を適用する場合、除去困難な浮遊物質が含まれているので、その対策が必須である。特にシルト等の無機性浮遊物質は、土壤層に直接流入すると目詰まりの原因となり、本来の機能を低減させることになる。多くは前段に沈殿槽やろ過槽を設け、浮遊物質を十分に除去してから、対象水を土壤層に導入させている。

処理すべき水量を確保して寿命を伸ばすためには、無機性浮遊物質に限らず、有機性浮遊物質についてもあらかじめ除去することが望まれる。方法としては、無機性浮遊物質と同じく、沈殿槽を設けて物理的に分離する方法、ろ過槽を設けてろ材で分離する方法などが考えられる。凝集沈殿や浮上分離といった方法は、構造が複雑になり、環境水浄化法としては採用困難であるが、コストが低減でき、かつメンテナンスが容易となれば、検討の余地があるだろう。また、敷地面積を確保できるのであれば、酸化池に代表される安定池など、システム上目詰まりといった問題が起こりにくい方法も検討されるべきである。

5.2 浄化機能の継続性

滋賀県甲賀町におけるトレンチ方式の土壤浸透システムおよび滋賀県草津市の高速土壤浸透システムの性能評価を行った。

甲賀町の施設は農村集落排水の二次処理水を原水として20年超の稼動実績があり、水負荷率0.16m³/日、土壤層には同町付近に産する湖沼堆積物起源の黒ボク土、マサ土、ポリ塩化アルミニウム等が使われている。稼動後20年を経てもCODを50%、難分解性有機炭素を30%除去できている。ただし、リンについては除去率30%程度と自治体による以前の報告値より大幅に低下しており、リン除去については土壤の容量が飽和に近くなっていることをうかがわせる。

6. 今後の普及に向けて

6.1 住宅地における排水の循環再利用

国内外を問わず都市部を中心に宅地開発が進められているが、様々な問題を起こしてきた。森林や湖沼の喪失、地表の被覆による水循環の遮断など。従来の大規模集中処理がもたらす弊害が明確になって久しいが、生活排水の分散処理と水の循環再利用のシステムへは容易に転換できない。その理由に、技術的な面での遅れがあったのは確かである。しかし、筆者らの一連の研究によりその方向性がある程度見えてきたと言える。

「水土の技術」は、古くて新しい技術であるが、適用場所が下水道未整備地区やアジアなどの海外に限られるものの、技術、コストの点でも有望である。

中国の大同市の場合は、もともと灌漑用水の確保が目的であったが、例えば、宅地開発敷地内では、生活排水の処理と処理水の再利用ができるシステムとなるとその意義は大きい。その土壤浸透システムからの処理水をトイレ用水、花壇への散水、洗車用水などの雑用水としての利用、公園施設の人工のせせらぎや池への親水用水としての利用、土壤浸透装置の上部の低木や芝生での緑化およびヒートアイランド現象の緩和、等々が考えられる。住宅団地開発の際には検討に値する。

6.2 下水の中間処理と有効活用

わが国の大都市、中都市の下水道整備率は高い。下水管路を流れて、集められる下水を有効に活用することは、都市域における水環境の改善、適正な水循環を達成するうえできわめて重要なことであり、今後は避けては通れない。有効活用については、すでにいろいろな都市においてその地域特性を勘案して実際に行われている。しかし、多くの場合は、最下流にある終末処理場で再生水が得られるので、それを利用する方法や利用できる地域に関して一定の限界があるのはやむをえない。現実には、下水は整備地域内の至る所に存在しており、また利用したい地域も広いので、できれば下水発生源と浄化施設ができるだけ近接していることが理想である。

再生下水の利用目的については、都市内に広範囲に分布するものとして、公園等にあるせせらぎ、池その他の維持用水・親水用水、公園などのトイレ水洗用水、樹木・道路への散水用水、洗車用水その他多くの用途が考えられる。このように利用先を列挙してみると、再生下水をつくる地点としては、数が多く、かつ分散している公園、学校など公共の場が必要面積を確保する上でも、維持管理をする観点からも好適であるが、何よりも市民や小、中学生の環境教育の場としての位置付けが可能である点においてぜひとも実現したい。土壤の有する水の浸透浄化機能を活用することにより自然の浄化機能の大きさや自然との共生作用を知るうえでこうしたフィールドは好適である。

具体的には、公園等の近くに敷設されている下水管路中を流下している下水を原水として、公園等の一角に設けられた土壤浸透型施設において再生水をつくりだし、その近辺において上記の目的に利用するというシステムである。この場合、再生水の貯留槽も設置されることから、神戸淡路地震の際の苦い経験を持ち出すまでもなく地震、火災その他の災害時の緊急用にもこの再生水は利用可能となることも期待できる。つまり、一種の公共のリスク管理という意味合いもある。

7. おわりに

わが国では敷地面積の制約のため土壤浸透法の適用例は比較的少ない。しかしながら、せまい土地で適用可能な高速浸透法や、自然土壌との混合材として廃棄物を利用する手法の研究が進み新しい技術開発が行われている。今後一層の研究開発が期待される。なお、本テーマに関して筆者らは次の競争的外部資金を受けた。

- ① (財)琵琶湖・淀川水質保全機構 公募実験 2001年「土壤浸透浄化材の比較実験」
- ② 文部科学省 科学技術振興調整費 2002～2004年「廃棄物・新素材による土壤浸透システム開発」

引用文献・資料

(財)下水道新技術推進機構, 2000, 下水道技術・技術審査証明報告書「土壌式高度処理装置エコ浄化システム」

(株)環境技術研究所, 2002, ユニット型エコ浄化装置解説書

土壤浸透浄化技術研究会, 2003, 「自然生態系を利用した河川の直接浄化法」, 土壌浄化法解説シリーズ5

(財)九州管理協会, 2008, 環境未来国際公開講座シリーズおよび環境技術交流会資料, 「遠賀川水系における水質の現状」

(以下、本テーマに関する筆者らの著書及び主要論文(年代順)より)

國松孝男, 菅原正孝編著, 1988, 技報堂出版, 『都市の水環境の創造』

岡太郎, 菅原正孝共編著, 技報堂出版, 1994年, 『都市の水環境の新展開』

菅原正孝, 1999, 「混合土を用いたトレンチ式浄化法による汚水の高度処理」, 『環境技術』, 28巻, 11号, pp.814-818

大槻均, 澤井健二, 菅原正孝, 編著, 2000, 『水をはぐくむ』, 技報堂出版

菅原正孝, 2000, 「都市における水管理」, 『都市問題研究』, 52巻, 8号, pp.23-32

大西博之, 新井剛典, 2002, 「土壌式多段構造による尿尿の高度処理」, 『環境技術』, 31巻, 12号, pp.53-56

藤川陽子, 濱崎竜英, 菅原正孝, 尾崎博明, 他, 2003, 「土壌浸透法による環境水中腐植物質難分解性有機物の除去の基礎的検討」, 第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会, pp.272-275

藤川陽子, 濱崎竜英, 菅原正孝, 尾崎博明, 他, 2003, 「土壌浸透水浄化システムの再評価・再

- 構築」, 『環境衛生工学研究』, 17巻, pp.35-40
- 菅原正孝, 2004, 「水環境改善に向けた土壌の浄化機能の活用」, 『都市問題研究』, 56巻, 7号, pp.3-11
- Sugahara M., Fujikawa Y., Imada R., Ozaki H., Prasai G., Hamasaki T., 2004, “Basic Experimental Research for the reconstruction of water purification system using soil - Sorption isotherm of fulvic acid and phosphate ion for selected materials under different pH”. Proceedings of International Conference on Isotopes in Environmental Studies -Aquatic Forum 2004, Monaco, IAEA-CN-118/137P
- Hamasaki T., Fujikawa Y., Imada R., Nagatomo, M., Sugahara, M., Ozaki,H., 2004, “Basic experimental research for the reconstruction of water purification system using soil -Changes of sorption of fulvic acid and phosphoric acid by heating processing.” Proceedings of International Conference on Isotopes in Environmental Studies -Aquatic Forum 2004, Monaco, IAEA-CN-118/143P
- Sugahara M., Fujikawa Y., Hamasaki T., Ozaki H., Arai T., 2004, “Soil percolation system for wastewater and river water treatment in Japan I.History of technical developments”. Proceedings of the 4th International Conference on Watershed Management and Urban Water Supply. Shenzhen, China, pp.666-671
- Hamasaki T., Fujikawa Y., Sugahara M., Ozaki H., Yano T., Imada R., Prasai G., Tainaka Y., Nakamura W., Haruki F., 2004, “Re-evaluation and reconstruction of water purification system using soil II. Removal of pollutants from infiltrating water.” *Water Science and Technology*, 50: pp.369-372
- Fujikawa Y., Hamasaki T., Sugahara M., Ozaki H., Prasai G., Yano T., Imada R., Tainaka Y., Nakamura W. and Haruki F., 2004, “Re-evaluation and reconstruction of water purification system using soil I. Assessment of soil as a sorbent of humic substances and phosphate ion”. *Water Science and Technology*, 50:pp. 363-367
- 藤川陽子, 今田綾介, ギャネンドラ・プロサイ, 尾崎博明, 池田恵美, 矢野哲也, 高信恵, 濱崎竜英, 菅原正孝, 池本昇, 2004, 「土壌浸透水浄化システム再構築のための基礎的検討-通水条件下と静的条件下での新しい浄化素材の難分解性有機物・リン酸吸着能の比較」, 『環境衛生工学研究』, 18巻, 3号, pp.214-218
- ギャネンドラ・プロサイ, 藤川陽子, 濱崎竜英, 今田綾介, 尾崎博明, 菅原正孝, 2004, 「Diagnosis of DOM based on the biodegradability and potential mutagenicity -Development and application of a novel fractionation scheme (生分解性と潜在的変異原性に基づく溶解性有機

- 物質の診断—新規な有機物分画法の開発と適用)』『環境衛生工学研究』, 18巻, 3号, pp.192-197
- 菅原正孝, 2004, 「環境水浄化技術の現状と今後の展望」『環境水浄化技術』, 菅原正孝監修, シーエムシー出版, pp.3-6
- 菅原正孝, 2004, 「土壤浸透浄化技術」『環境水浄化技術』, 菅原正孝監修, シーエムシー出版, pp.7-23
- 藤川陽子, 2004, 「廃棄物利用の吸着材」『環境水浄化技術』, 菅原正孝監修, シーエムシー出版, pp.119-142
- 藤川陽子, 濱崎竜英, 米田大輔, 櫻井伸治, 山崎力, 菅原正孝, 2005, 「造粒土を用いた高速土壤浸透法による畜産廃水処理—パイロットスケール試験結果と使用土壤の特性の対比から」, 第11回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.287-292
- 八島浩, 藤川陽子, 殿界和夫, 菅原正孝, 福井正美, 2005, 「Mn焼結コーティング砒素吸着濾材の砒素吸着試験」, 第11回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.167-169
- M. Sugahara, Y. Fujikawa, T. Hamasaki, G. Prasai, R. Imada, H. Ozaki, S. Sakurai, M. Fukui, 2005, “Proposal of a Rapid Infiltration System Using Granulated Materials for Wastewater and River Water Treatment —A System Design Guide.” Proc. of the 1st International Conference on Pollution Control and Resource Reuse for a Better Tomorrow and Sustainable Economy, Part 2, pp.87-88, Shanghai
- T. Hamasaki, Y. Fujikawa, M. Sugahara, G. Prasai, 2005, “Characteristics of Sludge and Soils as Purification Materials for the Rapid Infiltration Method When Heated”, Proc. of the 1st International Conference on Pollution Control and Resource Reuse for a Better Tomorrow and Sustainable Economy, Part 1, pp.292-295, Shanghai
- 藤川陽子, 菅原正孝, 濱崎竜英, ギャネンドラ・プロサイ, 尾崎博明, 米田大輔, 山崎力, 今田綾介, 他, 2005, 「高速土壤浸透法水浄化システム実用化の検討」, 『環境衛生工学研究』19巻, pp.175-178
- ギャネンドラ・プロサイ, 藤川陽子, 阿部悠子, 濱崎竜英, 原侑子, 尾崎博明, 菅原正孝, 今田綾介, 2005, 「高速土壤浸透法による畜産廃水からの難分解性有機物除去のモニタリング」, 『環境衛生工学研究』, 19巻, pp.179-182
- 櫻井伸治, 藤川陽子, 福井正美, 濱崎竜英, 菅原正孝, 弘瀬陽子, 原田明佳, 2005, 「使用済み浸透ろ材における植物育成」, 『環境衛生工学研究』, 19巻, pp.183-187
- T. Hamasaki, Y. Fujikawa, D. Yoneda, M. Sugahara, 2006 “Search condition of purification materials and their proper processing for the rapid infiltration method”. *Chinese Journal*

of Geochemistry, 25 (Suppl) , p.114

Fujikawa Y. , Sugahara M., Hamasaki T., Prasai G., Imada R., Arai T. and Ozaki H., 2006, "Development of a rapid infiltration system for wastewater and river water treatment in Japan using granulated materials". *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41: pp.1355-1361

菅原正孝, 2006, 「水質浄化における自然浄化機能の強化」, 『水資源・環境研究の現在』, 成文堂, pp.481-496

藤川陽子, 櫻井伸治, 阿部悠子, 菅原正孝, 折立文子, 原 侑子, 濱崎竜英, ギャネンドラ・プロサイ, 尾崎博明, 梶山陽介, 岩島一美, 2006, 「高速土壌浸透法における微量有機物と主要汚濁物の除去効率の比較検討」, 第6回環境技術学会研究発表会予稿集, pp.91-92

櫻井伸治, 藤川陽子, 福井正美, 濱崎竜英, 菅原正孝, 2007, 「畜産廃水の土壌浸透システムにおける飼料作物の育成－土壌中のリン・栄養塩類の挙動および塩類集積に関する考察」, 『環境技術』, 36巻, pp.571-579

藤川陽子, 濱崎竜英, 菅原正孝, 2007, 「廃棄物を利用した吸着剤による排水処理技術」, 『排水汚水処理技術集成』, エヌ・ティー・エス, pp.228-241

藤川陽子, 菅原正孝, 任 亮, 楊 路, 2009, 「火山灰土のリン・フルボ酸吸着性能が保管条件により変化する理由の検討」, 第9回環境技術学会研究発表大会予稿集, pp.49-50

(以下, 新聞その他より)

NPO法人緑の地球ネットワーク機関誌, 2003, 5, GREEN EARTH「汚水浄化, ものすごい効果！」

朝日新聞「微生物で中国黄土高原での灌漑施設」2003,6,22, 朝刊第1面

日中友好協会機関誌, 2003,7,25, 日本と中国, 「微生物で大量浄化, 育苗に再利用」

産経新聞「ローテク下水処理」2008,12,14, 朝刊第8面