特集2・土壌による排水の浄化と再利用

多段土壌層法による土壌生態系を用いた 水質浄化工法

若月 利之*・森 純一*・増永 二之*・工藤 鴻基**

はじめに

多段土壌層法による汚水の浄化機構の詳細については別に述べた¹⁻⁷⁾。本稿では、毛管浸潤浄化法についての誤解を解き、土壌資源の汚水浄化機能を利用するために必要な今後の研究開発課題を中心に考察したい。土壌式浄化法の新しい機能としての環境ホルモン除去と亜酸化窒素やメタン等の温暖化ガスの発生制御法等についても触れた^{8,9)}。新見氏の毛管浄化法¹⁰⁻¹³⁾は日本におけるパイオニアであるが、毛管浄化についての誤解も広め、その後の土壌式浄化法の健全な発展にネガティブな面も生じた。したがって、汚水の土壌式浄化法の第2の発展期にあたって、毛管浄化法の問題点を整理し、その誤解を正しておきたい。

1. 汚水浸透と目詰まり

1.1 毛管浸潤トレンチ法の誤解

毛管浄化法¹²⁾によれば、図-1に毛管浸潤トレンチの構造に示したように、トレンチの底に敷かれた、両端に若干の立ち上がりを持つ不透水性の合成樹脂膜によって、汚水はそれ以上降下できずそこにたまる。そこに飽和の水が溜まりそこから図の矢印のような毛管上昇と誘導毛管水が起こり、汚水が浸潤する。この結果、重力浸透はほとんど関与しない不飽和流となるとしている。その結果、好気的微生物分解が優先し、

かつ、水の重力浸透による運動エネルギーに由来する目詰まりは起こりにくくなる。したがって、欧米等で広く利用されているセピテックタンクー土壌トレンチ法(以下、土壌トレンチ法、図-2)^{12,14-16)}に比べ、格段の技術的進歩があるとしている。

図-1 毛管浸潤トレンチの構造

図-2 米国環境保護局のセピテックタンクー土壌トレンチ法

* 島根大学生物資源学部土壌圏生態工学研究室 Toshiyuki WAKATSUKI, Junichi MORI, Tsuguyuki MASUNAGA

** (株)トップエコロジー Kouki KUDO

しかしながら過去の毛管浸潤トレンチ方式の現実の結果によれば、依然として、予測不可能な目詰まりは深刻な問題であり、その処理性能も欧米のセビテックタンクー土壤トレンチ法と差異がないことは明らかになっている。これは、上記の説明が一種のトリック的な解説になっており、毛管浸潤過程は止水膜に到達した汚水の動きのほんの最初の部分を説明しているに過ぎないことによる。石崎¹⁷⁾が引用しているように、この汚水は図一1に示したように、定常的な運転状態では、一部では、毛管サイホン水¹⁸⁾と考えることができるが、最終的には含水量が最大圃場容水量以上に達して、重量水となって処理水は排水される。したがって、この毛管浸潤トレンチ法は図一2の土壤トレンチ法と本質的な差異はないのである。この毛管浄化の類似製品である毛管浸潤マット法も同様の誤解をベースとしている。

毛管張力の式、 $H(m)=0.03/D(mm)$ 、によれば、土壤層の50cmを上昇したり、50cmの高さの土壤層の重力に抗して保水することのできる孔隙の大きさは $D=0.03/0.5=0.06mm$ 以下の細孔隙である。通常の土壤ではこの細孔隙は保水には寄与するが透水にはほとんど寄与しない。日蒸発散量以上の量の透水(汚水処理)に寄与するのは0.06mm以上より大きい粗孔隙を通る重力水である。したがって、重力浸透と重力排水を前提とした目詰まりと短絡防止対策が必要なのである。

欧米の土壤トレンチ法では、土壤の飽和透水係数(あるいは現場での飽和浸透実験による浸透能)の7-10%、10-15%を汚水負荷量の目安としている¹⁴⁾。本邦の畑土壤としては構造が発達して比較的透水性の良い平均的な黒ボク土の透水性は $10^{-3}cm/sec$ 程度である。この値に基づく、7%では $24 \times 60 \times 60 \times 0.07=60\ell/m/day$ 、15%では $129\ell/m/day$ となり平均では約 $100\ell/m/day$ 程度で、毛管浸潤トレンチ法の平均的な負荷量と同程度になる。しかし、欧米のトレンチ法の場合は使用する土壤の現場での測定値に基づいた施工設計基準が示されている。一方、毛管浸潤トレンチ法では、客観的な測定データに基づく施工ではなかったため、多様な土壤の機能の正しい利用法を妨げ、結果として実務者に誤解を与えた。充填土壤の性質を測定せず、毛管浸潤トレンチの機能を過大に説明して、単に負荷量をトレンチ1mあたり 100ℓ の汚水負荷が可能とすれば、透水性の悪い沖積土や赤土等を用いた場合、適正負荷量はこの10

表1 土壤の充填密度の違いによる飽和透水係数の変化³⁾

	マサ土			黒ボク土		
容積重(g/cc)	1.3	1.5	0.8	0.9	1.0	
飽和透水係数 (cm/sec)	9.8×10^{-3}	9.6×10^{-4}	3.2×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.8×10^{-4}	

分の1の10%程度であるから、目詰まりが発生することになる。

さらに欧米等の土壤トレンチと異なり、野外の自然土壤をそのまま攪乱で利用するケースは稀で、コンクリートやビニールシートによる集水型の浄化装置であるため、以下に述べるように、施工と充填時の避けられない土壤の圧密や塗り固め等により浸透能は著しく低下し、目詰まりが発生する。

1.2 充填土壤の透水性と汚水の浸透能

(1) 土壤の充填時に発生する透水性の低下

構造を壊さない自然土壤の飽和透水係数は、マサのような砂土で $10^{-2}cm/sec$ 、粘土質土壤では $10^{-6}cm/sec$ と一万倍以上の差がある。レキ質の砂土では $1cm/s$ 以上、構造のない粘土質土壤では $10^{-7}cm/sec$ 程度になり、土壤による差異は極めて大きい。土壤の差異を考慮した施工が必要な理由である。

さらに、充填の程度により同じ土壤資材でも飽和透水係数は顕著に変化する。表1にはマサ土を容積重を $1.3g/cc$ と $1.5g/cc$ 、黒ボク土を $0.8g/cc$ 、 $0.9g/cc$ 、 $1.0g/cc$ の容積重で充填した場合の飽和透水係数を示した³⁾。マサ土では容積重 $1.3g/cc$ から $1.5g/cc$ と15%の充填重量の増加が、飽和透水係数で約10分の1の著減、黒ボク土の $0.8g/cc$ から $0.9g/cc$ では約3分の1の減少、 $0.9g/cc$ から $1.0g/cc$ の充填重量の約10%の増加が、同じく6分の1の著しい減少、 $0.8g/cc$ と $1.0g/cc$ との比較では約20分の1まで著減した。現場での施工時には十分注意しても、10-20%程度の充填密度の差異は生じうる。この小さな誤差が透水係数では10倍-20倍もの誤差、減少につながる。欧米の土壤トレンチ法では現場測定データにもとづいて汚水の負荷量とトレンチの設置面積を決定している。安全な負荷量は飽和透水係数の7-15%という欧米の基準をあてはめるとマサ土の容積重 $1.3g/cc$ の充填では汚水の負荷量は $590-1270\ell/m^2/day$ 、一方 $1.5g/cc$ の充填では $58-124\ell/m^2/day$ の負荷量に急減する。黒ボクでは $0.8g/cc$ の充填では $194-416\ell/m^2/day$ の負荷が可能であるが、充填密度1.0

g/cc では11~230/m²/day と文字どおり急減し、処理不能になる。

さらに、施工時の踏み固めの影響は特に降雨時での施工では土の表面をシールしてしまうことがある。田んぼの畔塗りと同じことが起こり得る。この場合は透水性はさらに10~100分の1以下に急減する。このような不透水層が充填土壤中に生成した場合は、即、目詰まりにつながるのである。

(2) 充填土壌への通水による土壌の透水性の低下

土壌への汚水の重力浸透により透水性は低下する。これが目詰まりの原因になる。ダルシー則に基づいて飽和透水係数(Ksat)を測定した¹⁹⁾。種々の土壌、添加資材および土壌に各種資材を混合して改良土壌とした場合の飽和透水係数を、10日間連続測定した結果を図-3a)とb)に示した。

マサ土を容積重1.1g/ccで充填した直後の飽和透水係数は、 1.4×10^{-2} cm/secであったが1週間以内に 5×10^{-3} cm/secまで急減した。黒ボク土は 9×10^{-3} cm/secから 6×10^{-3} cm/sec、赤土はこの程度の期間の測定では 4×10^{-3} cm/secであまり変化しなかった。これらの土壌に窒素浄化能やリン酸除去能を強化するために、10~30メッシュ程度の金属鉄粒子とオガクズを各12.5%、計25%混合した改良マサ土、改良赤土、改良黒ボク土を作り、順に容積重1.1、1.0、0.9g/ccで充填して飽和透水係数を測定した結果も同じく図-3a)に示されている。改良黒ボクは 1.2×10^{-2} cm/secから 3×10^{-3} cm/secまで急減し、改良赤土は 5×10^{-3} cm/secから 2×10^{-3} cm/secまで減少、改良マサ土は 2×10^{-3} cm/secから 1×10^{-3} cm/secとなった。各種資材の土壌への混合は、遅かれ早かれ土壌の透水性の低下をもたらす。

図-3 充填土壌の飽和透水係数の変化

図-3b)は粒子径を比較的小さなクリノプチオライト型ゼオライト(イズカ社)の飽和透水係数を10日間連続して測定したものである。粒子径1~3mm, 3~5mm, 4~6mmと粒子半径が大きくなるにつれ、粗孔隙が増加するため飽和透水係数は 10^{-1} cm/sec, 8×10^{-1} cm/sec, 1.6cm/secと増加する。また、それぞれの粒径が比較的均一で、粗孔隙を塞ぐ小さな分散粒子が生成しにくいいため、飽和透水係数の減少割合は比較的少なく、安定した値を示した。

(3) 目詰まり・短絡機構とその対策

a) 可逆的目詰まり

以上の結果等から目詰まり機構は以下のように3つに整理することができる(図-4a), b), c))。まず、土壌の孔隙が有機性のSSや微生物体およびそ

の分泌物により塞がれる場合(図-4a)). これによる目詰まりは可逆的である. 数ヶ月程度の休止期間をおくことにより, 過剰のSSと生物膜を分解すれば目詰まりは回復する. したがって, 土壌式浄化法では交互使用, あるいは数ヶ月から半年程度の休止期間をおくための予備土壌層を用意することは不可欠である. このような目詰まりの発生を遅らせるには, 高濃度のSSやBOD(通常200ppm以下が良い)を含む汚水の場合は希釈して土壌に浸透させて土壌との接触効率を高くしたり, 土壌層に通気する等で, BOD分解を促進することも有効である^{5), 20)}.

b) 無機鉱物粒子による粗孔隙の閉塞とキレツ生成による短絡

図-4のb)に示した, 土壌1m²あたり100ℓの汚水負荷は, 1年間では36000mmの降雨に相等する. このように多量の重力浸透水が不可逆的な目詰まりを引き起こす. また, し尿に由来するナトリウムイオンに富む汚水の浸透は耐水性団粒すら破壊し, 粘土粒子の分散を引き起こす. カルシウムイオンの存在は凝集を促進し, 目詰まり防止効果はある. 多様な粒径分布を持つ通常の土壌では, その小粒径粒子が中-粗孔隙を順次閉塞し, 目詰まりを引き起こす. この閉塞は不可逆的であるが, 乾燥すると, 全体が収縮するのでキレツが生成して, 目詰まりは回復する. したがって, 間欠的な汚水負荷は目詰まり対策になる. ただし, このようにして生成したキレツは, 汚水が短絡する結果となりやすい.

c) 施工時の物理的圧密による孔隙の閉塞

図-4c)に示したように施工時の機械や人間の踏跡等による過度の転圧, ふみ固め, ぬり固め等は粗孔隙を閉塞させ, 不透水層を形成する. この不透水層はたとえ数cm程度と薄くても汚水の浸透を妨げ, 処理を不可能にする. 施工時に降雨があり, 充填土壌粒子が多量の水分を含んだままで充填すると, 特にこの種の孔隙の閉塞が起こり易い.

2. 多段土壌層法における汚水の浸透促進と目詰まり防止対策

2.1 多段土壌層の構造と汚水浸透能の強化法

図-5で示したように透水性が高くかつ粒子径が比較的均一の天然ゼオライトと改良土壌層をレンガ積層パターンで多段に積み重ねる. 粒径1-3

a) 有機性SSと微生物膜による孔隙の可逆的閉塞

b) 粘土の分散, 粘土, シルトの動水による粗孔隙の不可逆的閉塞+a)の可逆的閉塞

c) 施工時の物理的圧密による粗孔隙の不可逆的閉塞

図-4 3つの目詰まり機構

図-5 大型透水係数測定装置の多段土壌層構造

mm, 飽和透水係数約0.1-0.2cm/secのゼオライトと, 飽和透水係数約 4×10^{-3} cm/secの改良黒ボク土とを

図一六 大型装置における飽和透水係数の変化

図のような多段構造にした場合、土壤層全体としての透水係数がどのようになるかを調べるために、約 1 m^2 の大型透水係数測定装置を試作して測定した。結果は図一六に示した。98年7月末から11月6日までは連続測定した。この間は通水しないときでも湛水状態を保った。8月5日と9月21日の急減は不注意で一部落水し、湛水が保てなかったため、気泡等により浸透が妨げられたためかもしれない。11月6日から99年5月4日までは完全に落水した、その後6月21日まで連続測定した。飽和透水係数は安定しているとは言えないが 0.1 cm/sec 程度の飽和透水係数を維持している。

このデータを基準に、たとえば不飽和浸透を確保するために欧米の土壤トレンチの基準、7-15%を当てはめると、1日の最大汚水負荷量は $6\text{--}13\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ という大きなものになる。大型装置の安定した飽和透水係数が上記の半分程度であったとしても $3\text{--}6.5\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ の速度の不飽和浸透が可能になる。一方、自然土壤の場合は 10^{-3} cm/sec の透水係数が限度であるので、多段土壤層により20-100倍の不飽和浸透が可能になる。用いるゼオライト等の通水性土壤層粒子の粒径を大きくしたり、ゼオライト層の厚さや相対比を大きくとればさらに透水性を大きくすることができる。また、ゼオライト粒子をさらに選別して2-3mm、4-5mm、5-6mm等、より均一にすればより安定した透水が可能になる。

次なる問題はこのような高速負荷で十分な汚濁成分の吸着分解能力が発揮できるであろうか、ということである。

2.2 多段土壤層法における汚水の最適面積負荷量

土壤式浄化法の機能は、生物膜法の1つである散水ろ床法に比較すると理解しやすい³⁾。孔隙率はあ

まり変わらないが大きな違いは比表面積である。散水ろ床法の1000-100万倍に達する。しかし、これまでの土壤式浄化法では、負荷量は目詰まりのために高くできない。一方、散水ろ床法では土壤処理に比べ処理水質は落ちるが、 $1\text{--}3\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ の処理が可能である。これに対して土壤処理方式では $100\text{ l}/\text{m}^2/\text{day}$ 程度に留まった。逆にこのため、比表面積負荷量は散水ろ床法の1万分の1から1000万分の1になる。したがって、多段土壤層法により汚水の負荷量が従来型土壤式浄化

法の100倍程度まで高速になっても、なお、散水ろ床法等と比べて、その面積負荷量は100倍から10万倍も確保できるため、土壤粒子と汚水との接触浸透効率さえ高める工夫があれば、土壤浄化法の基本的利点は維持できるのである。

多段土壤層法では図一七に示したように、上部の

①～⑥と通水用ゼオライト層を優先的に流下短絡した汚水は、順次浄化用改良土壤層に優先的に接触浸透して、浄化される。

図一七 汚濁河川水や下水処理水の高速超高度処理のためのモデル多段土壤層

多段土壤層構造による短絡防止と汚水と浄化用土壤層の浸透接触効率の向上の構造

表2 多段土壤層装置による処理能力

負荷量 ($\ell/\text{m}^2/\text{日}$)	pH	ORP	BOD(mg/ℓ)		COD(重クロム酸法)		T-N(mg/ℓ)		$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	T-P(mg/ℓ)	
	平均値	平均値(mv)	平均値	除去率(%)	平均値	除去率(%)	平均値	除去率(%)	平均値	平均値	平均値	平均値(%)
原水	7.40	27	32.7		43.9		6.13		0.92	3.26	0.714	
500	7.49	126	1.3	94.0	3.4	89.8	4.00	34.7	2.03	0.05	0.201	71.9
1000	7.47	115	1.3	94.4	4.9	85.2	3.15	48.6	1.97	0.05	0.216	69.7
1250	7.45	117	1.2	94.5	5.0	84.2	3.08	49.8	2.07	0.05	0.195	72.8
1500	7.36	123	1.0	95.1	4.0	87.4	3.47	43.4	2.19	0.04	0.209	70.7
2000	7.36	120	1.5	91.8	4.5	86.7	2.63	57.1	1.82	0.05	0.207	71.0
原水	7.41	-33	62.8		103.6		9.63		0.88	6.55	1.253	
500	7.48	125	1.1	97.5	4.3	94.5	5.27	45.3	3.94	0.05	0.106	91.5
1000	7.38	121	2.2	93.0	6.1	91.5	4.28	55.6	3.28	0.06	0.146	88.3
1250	7.38	83	2.1	94.1	7.3	90.2	4.17	56.7	3.25	0.09	0.219	82.5
1500	7.31	91	2.8	93.7	8.7	89.6	5.05	47.6	3.80	0.21	0.274	78.1
2000	7.30	41	6.5	86.2	11.5	86.1	4.05	57.9	2.60	0.46	0.320	74.5

汚水流入管と下部の処理水の排水の間に、通水用土壤層と浄化用土壤層をレンガ積層パターンで、多段に積層する構造を有する。これにより汚水の短絡を防ぎながら、かつ浄化土壤層へ有効な浸透接触が促進できる。図に示したように、浄化用土壤層に浸透しなかった汚水は浸透速度の早いゼオライト層を浸透するが、次の段の土壤層へはこの汚水が優先的に浸透できる。次の段でも同様であり、多段の各層で効率的な接触浸透が可能になることが分かる。

3. 多段土壤層法による汚濁河川水や下水処理水の高速超高度処理のための基礎実験の例

3.1 多段土壤層法の構造と負荷量

10cm×50cm×139cmのサイズのアクリル水槽に図一7に示したような構造の実証モデル多段土壤層を10セット作った。多段積層の中央付近に2本通気管が設置してあり、必要により送気する。汚水流入管、送気管ともに塩化ビニール管にドリルで多数の穴をあけてあるだけである。このような多段土壤層にコミュニティ排水処理プラントの原水を希釈してBOD約30ppmと約60ppmの汚水を調整して実験に用いた。2種類の汚水を各々、500 ℓ 、1000 ℓ 、1250 ℓ 、1500 ℓ 、2000 $\ell/\text{m}^2/\text{day}$ の負荷量で浸透させ、各々の装置の処理性能を比較した。実験は1998年8月17日に開始し、99年8月27日までの約1年間の平均値を表2に示した。この間BOD約60ppm汚水の1日2000 ℓ 負荷装置では目詰まりが発生したため99年2月19

日から5月20日までの3月間、BOD約60ppmの汚水1250と1500 ℓ 負荷装置とBOD約30ppmの汚水2000 ℓ 負荷装置は99年3月末から5月20日の2月間休止した。その後、汚水浸透を再開し9月末の段階でも目詰まりは発生していない。したがって、上記の目詰まりは有機性SSと微生物体による可逆的な目詰まりであったことがわかる。

多段土壤層法における送気と浄化機能との関係は別に報告した²⁻⁵⁾。

3.2 多段土壤層における汚水の滞留時間

全10装置における汚水の滞留時間も測定した。別にBODがゼロの井戸水による滞留時間の測定も実施した。各装置の定常負荷運転時における全水分量を汚水流入速度で割って求めた。1日あたりの面積負荷量500 ℓ では17-19時間、1000 ℓ では9-10時間、1250 ℓ では6.7-7.3時間、1500 ℓ では5.3-6.2時間、2000 ℓ 負荷では4.0-4.4時間であった。井戸水よりBOD成分を含む汚水のほうが平均で8.5%、0.6時間滞留時間が長くなった。BOD30ppmと60ppmの汚水の差はほとんど見られなかった。

3.3 浄化性能

表2に示したように、BODは30ppmの汚水の場合はすべて1ppm台、COD(重クロム酸法)でも5ppm以下まで超高度処理されていることがわかる。BOD約60ppmの汚水の場合は2000 ℓ 負荷でBOD、CODとも比較的高くなっており、処理水のORP(酸化還元電位)などを見ると比較的lowく、酸素供給量がや

や不足していることが、推定される。そのかわり、処理水の硝酸濃度も全窒素濃度も最低で60%近い浄化能を示した。アンモニアもほぼ完全に硝化しているが、BOD 約60ppm の污水、2000ℓ負荷区のみが処理水のアンモニア態窒素濃度が0.46ppm とやや高くなっている。リン酸の浄化能もそのため BOD 約60ppm 污水2000ℓ負荷が BOD 約60ppm の污水の中では最低の浄化率74.5%であった。一方、BOD 約30ppm の污水の場合は全体が好氣的になりすぎているため、金属鉄のからの二価鉄イオンの溶出が進みにくいため、リン酸の除去能は70%程度になったものと考えられる。

多段土壤層における污水中の汚濁成分の浄化機構は別に解説した^{2,3)}が、環境ホルモンの除去も含めた推定機構を図-8 に示した。また、以下に示すようにメタンや亜酸化窒素等の温暖化ガスの発生量も低く制御できる。

3.4 亜酸化窒素やメタン等の発生特性

孔・稻森等は従来型の毛管浸潤型の土壤トレンチ法では亜酸化窒素やメタン等の温暖化ガスの発生率が高く問題であるとしている。Masunaga 等(1999)は、本多段土壤層方式ではこれら温暖化ガスの発生率が従来型の毛管浸潤浄化トレンチに比べて格段に小さくなることを見出した。負荷した全窒素に対する装置より発生する N_2O の転換率は1-5%程度に過ぎなかった。メタンの発生率は炭酸ガスの0.013%に過ぎなかった。本多段土壤層における亜酸化窒素やメタンの生成割合が低いのは、毛管浸潤方式の誤解のもとである。不透水性の合成樹脂膜の有無と関係があると思われる。毛管浸潤方式では、導入された污水は不透水性膜により污水が飽和水として溜まり、トレンチの下部が必然的に嫌気性污水の溜まり場になるためと思われる。多段土壤層方式ではこのような污水の滞留部はないのでこのような問題は少ないものと思われる。孔・稻森・水落等²¹⁾によると従来型の毛管浸潤トレンチ法に通気することにより、30-50%程度これらのガスの発生量が抑制できた。したがって、このような温暖化ガスの発生という点からもこの不透水性膜(図-1)は有害無益と思われる。

4. 多段土壤層法による環境ホルモンや農薬等合成有機化合物の除去例

表3 に粉末木炭層や活性炭を積層した多段土壤層

図-8 木炭/活性炭積層多段土壤層法のBOD、窒素、リンおよび環境ホルモン活性物質の吸着分解機構

による環境ホルモン活性物質⁹⁾や各種農薬、あるいはテトラクロロエチレンの除去の例²²⁾を示した。環境ホルモンの代表として女性ホルモンのβエストラジオールの除去効率は通常の下水处理水²³⁾の約10分の1の超高度処理が可能であることが分かる。また、シマジン、フェニトロチオンやナプロパミド等も活性炭の積層で99%程度の処理ができる。嫌気と好気状態の両方の処理が必要なテトラクロロエチレンの処理も、多段土壤層における好気と嫌気層の共存により、高い効率で処理できたものと考えられる。本稿では、窒素、リンの除去という高度処理に加え、本多段土壤層法ではBODを1ppm程度までに処

表3 木炭/活性炭積層多段土壤層法による環境ホルモン活性物質の除去効果の例(処理速度は17βエストラジオールが1500, その他は400ℓ/㎡/日)

	原水 (μg/ℓ)	処理水 (μg/ℓ)	除去率 (%)
17βエストラジオール*			
建設省法	0.0682	0.0017	98
環境庁法	0.1548	0.0053	97
シマジン**	200	nd	100
フェニトロチオン**	910	14	99
ナプロパミド**	2000	nd	100
テトラクロロエチレン**	93	3	97

*粉末木炭層を黒ボク土に対して8重量%積層した(図-8参照)⁹⁾ **活性炭を黒ボク土に対して5重量%積層した

理できること、さらに上記のような環境ホルモン活性物質等の除去も行っているという意味で、超高度処理という言葉を使用した。

おわりに：多段土壤層法の今後

土壤の機能を利用する汚水や水環境の改善に関する水質浄化工法の例として多段土壤層法の基礎と応用例を述べた。この工法はさらなる改良の余地が大きい。実施例を積み重ねながら、基礎実験も並行させながらバージョンアップを重ねる必要がある。土壤の質に応じた添加資材の選定や添加量の調整、通水用土壤層と浄化用土壤層の最適な構造の探索、送気法等の維持管理法の改良が必要である。また、低濃度汚水の超高度処理の場合、面積負荷量はさらに4m³/m²/日、あるいはそれ以上向上させることが可能と思われるが、どこまで可能か。そのときの水質はどこまで超高度処理できるのか。環境ホルモンや各種合成有機化合物の処理にどこまで対応できるのか、等の検討が必要である。また、本法の原点は尾形の積層式薄層土壤の畜産廃棄物処理への研究²⁴⁾にあるが、BODの高い高濃度畜産汚水処理への応用も重要な挑戦課題である。

多段土壤層法の利点は汚水と土壤資源の循環利用にある。水の循環利用という点では超高度処理が可能であるからである。また、本装置に充填し浄化能に寿命のきた土壤は、逆に肥沃な農園芸用土壤として今度は生産に用いることができる³⁾ことも本多段土壤層法のメリットとなる。このようにして、土壤を用いる本浄化法は、水環境の再生だけでなく、近年の食糧や飼料の輸入という、農業の衰退の中で失われた、人/家畜と作物と土壤圏との循環系を再生する契機となり、人と土壤圏を結ぶ新しいリサイクルシステムを作ることに繋がるのが期待される。

参考文献

- 1) T. Attanandana, B. Saitthiti, S. Thongpae, S. Kritapir-om, and T. Wakatsuki: Multi-soil-layering systems for cafeteria wastewater treatment, *Ecological Engineering*, Elsevier, 1999 (in press)
- 2) 若月利之・増永二之・喜田賢・白浜松重・善波孝人・原田剛臣：土壤生態系を用いた水質浄化—土壤圏の生態工学一、*用水と廃水*, 40(10): 874-882, 1998
- 3) 若月利之：土の水質浄化機能, 岩田進午・喜田大三監修「土の環境圏」所収, p444-454 (1997)
- 4) 若月利之：土壤圏の生態工学の試み—多段土壤層法による土壤資源の汚水浄化機能の強化と制御の試み, RITE 優秀研究企画平成8, 9年度研究成果報告会要旨集, pp89-93, pp85-89, 1997, 1998
- 5) 若月利之・江角比呂郎・小村修一：多段土壤層法による脱窒脱リン合併排水処理装置, *水質汚濁研究*, 14(10), pp709-719(1991)
- 6) 若月利之・小村修一・沢田吉晴：非湛水下における硝酸態窒素とリン酸の同時除去に対する金属鉄粒とジュート資材の効果, *日本土壤肥料科学雑誌*, 62(4): 417-423, 1991
- 7) 若月利之・小村修一・安部裕治・泉一成：多段土壤層法による生活排水の浄化システムの開発, *日本土壤肥料科学雑誌*, 60(4): 335-351, 61(1): 74-84, 1989, 1990
- 8) T. Masunaga, T. Wakatsuki, M. Shirahama, and T. Inaishi: High quality water remediation by the Multi-soil-layering method, in Z. Cao and L. Pawlowski ed. In "Proceedings of the 12th International Conference on Chemistry for Protection of the Environment", Nanjing Univ. Press, pp303-309, 1999
- 9) 藤本充・若月利之・増永二之・喜田賢, 水中のペータエストラジオール等の除去方法, *NS 環境科学*, 特願平11-085722, 1999
- 10) 新見正・有水彊：汚水の土壤浄化法研究—総論, 毛管浄化研究会, pp495, 1977
- 11) 毛管浄化研究会編：土壤圏の科学—土壤浄化法の基礎, 毛管浄化研究会, pp352, 1983
- 12) 毛管浄化研究会編：土壤浄化法の実際, pp233, 1987
- 13) 松本聡：土壤処理法, 須藤隆一編著「微生物固定化法による排水処理」所収, p156-191, 1988
- 14) Sherwood C. Reed, Ronald W. Crites, and E. Joe Middlebrooks: *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, second ed., pp433, 1995
- 15) Lars Thofelt and Andreas Englund: *Ecotechnics for a Sustainable Society*, Proceedings from Ecotechnics 95, International Symposium on Ecological Engineering, MID Sweden University, p101-282, 1996
- 16) Duncan Mara: *Low-cost Sewerage*, Wiley, pp225, 1996
- 17) 石崎勝義, 地下埋管を用いた汚水浄化と地下水函養に関する基礎研究, 建設省, 土木研究所, pp63, 1981
- 18) 秋葉満寿次, 砂のサイホン作用と誘導毛管水, *農業土木研究*, 10: 147-157, 1938
- 19) 波多野隆介, 土壤の物理性, 久馬一剛編「最新土壤学」pp96-118, 朝倉書店, pp216, 1997
- 20) 江鷹・松本聡・羽田野一幸・小島豊, 空気導入による汚水の土壤処理における目詰まりの防止, *日本土壤肥料学会講演要旨集*, 第42集, 203, 1996
- 21) 孔海南・稲森悠平・水落元之：生活排水を処理する土壤トレンチからの地球温暖化ガスの発生特性, 第31回日本水環境学会年會講演集, p36, 1997, 生活排水の土壤トレンチ処理プロセスからの地球温暖化ガスの排出とORPとの関係, 同第32回講演集, p251, 1998
- 22) 若月利之・福田俊治・山本広基・中村利家：活性炭積層多段土壤層による排水中のテトラクロロエチレンと農業成分の除去法, 第27回日本水環境学会年會講演集, p216-217, 1993
- 23) 田中宏明, 水環境における内分泌攪乱物質の実態調査, *水環境学会誌*, 22(8): 629-632, 1999
- 24) 尾形保, 畜産廃棄物の土壤処理, 近代農業における土壤肥料の研究, 第3集, 日本土壤肥料学会編, pp121-130, 養賢堂, 1972