

土壤による排水の浄化に関する研究 (その2)

—浅い土壤層による高濃度排水の処理—

喜田大三 田中辰明
塩出忠次 平松 功
(本社建築本部設備部)

Purification of Wastewater in Soil (Part 2)

—Treatment of High Concentration Wastewater in Shallow Soil Layer—

Daizo Kita Tatsuaki Tanaka
Chuji Shiode Isao Hiramatsu

Abstract

Although operating at high loading rate and using shallow soil layers are desirable from the standpoint of economy in land treatment facilities, there is risk of insufficient treatment and clogging on the other hand. Therefore, in order to obtain basic data concerning design of these facilities, experiments in which columns filled with soil were dosed with artificial wastewater at high loading rate were performed. Soil depth, hydraulic loading rate and COD loading rate were varied as experimental parameters. Based on the results of this study, the following conclusions were drawn; (1) Clogging is mainly influenced by organic loading rate. (2) Organic substances were almost completely removed in all columns in spite of a high loading rate and shallow soil layer. (3) Total nitrogen content was reduced to a considerable degree and it is considered that more than half of nitrogen reduction was due to biological denitrification.

概 要

土壤処理において、できるだけ高負荷で運転したり、浅い土壤層を用いることは、経済的な面からも好ましい方法であるが、反面、それらは処理が不十分になるおそれや、目詰まりが起こる危険性をはらんでいる。そこで、これらの基礎的データを得るために、土壤充填カラムを用い、各種の運転条件で高濃度の排水を流入させ、目詰まりの生成状態や排水の浄化の程度を調査した。流入原水には合成下水を用い、土壤厚さ、流入水量、COD 負荷を各2段階に変えて実験を行なった。その結果、次のようなことがわかった。(1) 土壤の目詰まりは有機物負荷の影響を大きく受ける。(2) 有機物は、高負荷、浅土壤の厳しい条件にもかかわらずほとんど除去された。(3) 窒素の除去もかなりの程度行なわれ、そのうち半分以上は生物的脱窒によって除去されたと考えられる。

1. はじめに

一般の土壤処理施設では、浸透処理原水として二次処理水を用いる場合が多いが、経済的な意味からはできるだけ高負荷で運転する方が望ましい。また、高負荷にした場合、排水中の CN 比が高くなり、生物的脱窒の可能性も期待することができる。実際に、Fort Devens, Hollister, Werribee のように、一次処理水を長期間にわたって浸透させている施設では、窒素の除去も良好に行なわれていることが報告されている^{1)~3)}。

高負荷で運転するとともに、できるだけ浅い土壤を用いて処理することも有用である。これは、建物の屋上や周辺緑地を利用して土壤処理を行なって、排水を再利用するというような場合に特に有効である。また、土壤層を浅くすることによって、土壤処理を一種の緩速ろ過装置として構成することも可能となる。

以上のように、高負荷で運転したり、浅い土壤層を用いることは好ましいことであるが、反面、それらは処理が不十分になるおそれや、目詰まりが起こる危険性をはらんでおり、これらを考慮して適切に施設を設計しなけ

ればならない。本報告では、これらの基礎的データを得るために、浅い土壤層に非常に高負荷の排水(合成下水)を流入させ、目詰まりの生成状態や排水の浄化の程度を調査し、目詰まりへの要因、あるいは、有機物や窒素の除去効果について検討した。

2. 実験概要

2.1. 実験装置

実験装置の模式図を図一に示す。土壤カラムは内径5cmの透明塩ビ製のカラムを用い、カラムの長さは実験条件に応じて30cmおよび55cmとした。カラムは屋外に出し、まわりを断熱材(押出発泡スチレン25mm)で保温し、上部には覆いをつけて雨の流入を防いだ。

2.2. 実験材料

2.2.1. 土壤 土壤は当研究所敷地内の関東ローム表層土を用いた。この土壤はいわゆるクロボク土と呼ばれる土壤である。表一に、その主な物理化学的特性を示す。

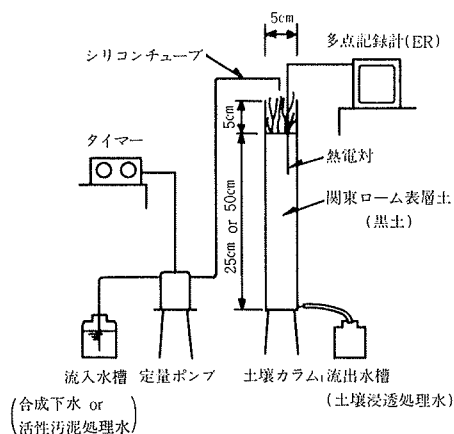
2.2.2. 合成下水 流入原水として用いた合成下水は、肉エキス、ペプトンを主体とした合成下水原液を所定の濃度になるように希釈して作成した。

2.2.3. 活性汚泥処理水 活性汚泥処理水は、上記合成下水を基質として回分的に培養している活性汚泥の処理水を用いた。

2.3. 実験方法

実験は、土壤厚さ、流入水量、COD負荷を2段階に変えて行なったが実験数を少なくするために2水準3因子の直交表(L₄(2³))に割付けた¹⁾。表二に、実験条件と各実験における流入水の水質を示す。

各土壤カラムは、前述の関東ローム表層土を仮比重0.62程度に充填して用いた。実験は昭和56年8月7日から始めたが、最初の17日間は予備実験として活性汚泥処



図一 実験装置の模式図

理水を 100 l/m²・日程度の流入水量で流入させた。本実験は8月24日から開始し、表二で示したような流入水量および流入水質として、合成下水を各土壤カラムに供給した。本実験では、高濃度の排水(合成下水)を流入させたため実験途中で目詰まりが起こったが、カラムが目詰まりによって水深5cm以上の冠水状態になった場合にはその時点で合成下水の流入を停止し、1週間程度運転を休ませたのち再び実験を開始した。一度目詰まりが起こったカラムは、運転再開後も短時間で再び目詰まり状態になったので、その後は流入水量を半分にして運転を継続した。図二に、それぞれのカラムの運転スケジュールを示す。

土壤カラムに供給された流入水は、土壤中で浄化を受けながら浸透したのち流出水槽で集水される。流出水槽で集水した浸透処理水は定期的にサンプリングし、その水量を測定して流出速度を算出するとともに、有機物濃度、窒素濃度などの水質分析を行なった。土壤表面には雑草(主としてメヒシバ)が生えたが、定期的に刈り取り、乾重量を測定するとともに窒素含有量を分析した。また、実験期間中に土壤に貯えられた有機物および窒素の量を把握するため、実験前後の土壤の有機物および窒素含有量を分析した。

2.4. 分析方法

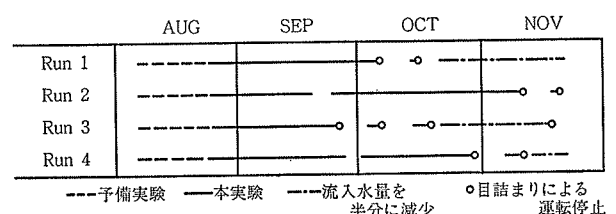
水質、土壤、植物の各分析方法は、下水試験方法、土質試験法、土壤養分分析法、栽培植物分析測定法に準拠して行なった。

色	真比重	粒径分布			pH		強熱減量 (%)	有機物 (%)
		砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	H ₂ O	KCl		
黒色	2.51	18	70	12	5.1	4.5	22.8	12.4

表一 土壤の物理化学的特性

	実験条件			流入水水質					
	土壤厚 (cm)	流入水量 (l/m ² ・d)	COD負荷 (g/m ² ・d)	COD (mg/l)	TOC (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	NO ₂ -N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	Org-N (mg/l)
Run 1	25	100	21.4	214	285	12.8	8.7	94.9	116.4
Run 2	25	50	10.7	214	285	12.8	8.7	94.9	116.4
Run 3	50	50	21.4	428	570	25.6	11.1	189.7	226.4
Run 4	50	100	10.7	107	143	6.4	7.6	47.5	61.5

表二 実験条件および流入水水質



図二 実験スケジュール

3. 実験結果および考察

3.1. 流入水からの窒素および有機物の除去

図-3に、Run 1~4の流入水と流出水についての水量、COD量、T-N量の積算値を示す。図-3からわかるように、CODについては各Runともほとんど除去されており、予備実験期間を除いた本実験期間だけについていえば、Run 1で96%、その他は99%程度の除去率が達成されている。また、T-Nについては、各Runによって多少バラツキがあるが、65~75%の除去率となっている。

今回の実験では、目詰まりが起こった場合に運転を停止したり流入水量を半減したりしているため、当初設定した運転条件で全実験期間にわたって運転されているわけではない。そこで、実験条件の違いによる有機物除去、窒素除去の違いをみるために、本実験開始後から最初の目詰りが起こる前までの流入水、流出水の水量、水質の平均値、および、COD量、T-N量の除去率を示すと表-3のようになる。表-3から、CODは今回の実験条件の範囲では、実験条件の違いにかかわらずほとんど完全に除去されており、流出水の濃度も2~4 mg/lと極めて低い値になっている。すなわち、COD除去量についてみれば、COD除去量は流入負荷に大きく依存していることになる。一方、T-Nの除去量も、COD程ではないが、やはり流入負荷量に依存しているようである。T-Nの除去率は65~85%程度であり、流入負荷の高い方がやや高い傾向にある。

3.2. 土壌への蓄積

実験カラムの土壌分析は、実験終了後各カラムの土壌を12.5 cm厚で分割、すなわち、Run 1と2については2層、Run 3と4については4層に分け、全量をサンプリングし、各層ごとに分析した。

図-4および5に、土壌の分析結果を示す。図中で対照土壌として示したのは、実験前の土壌のことである。有機物の含有量は、Run 3が実験後幾分高くなっている傾向を示しているのを除けば、各Runとも実験前とほとんど差がない。窒素の含有量は、各カラムとも第1層が実験前に比べてかなり高くなっているが、それ以外はそれ程高くなっていない。特に、NO₂・NO₃-Nは、第2層以下では合成下水の流入にもかかわらず実験前とほとんど差がなく、Run 3の第2層、第3層では逆に実験前よりも低くて、ほとんど含まれていないような状態になっている。これらの層、あるいは、第1層の下部においては生物的脱窒が進行しているようである。

表-4に、実験前後の各カラム内の土壌の窒素および有機物の含有量を示す。表-4からわかるように、窒素、

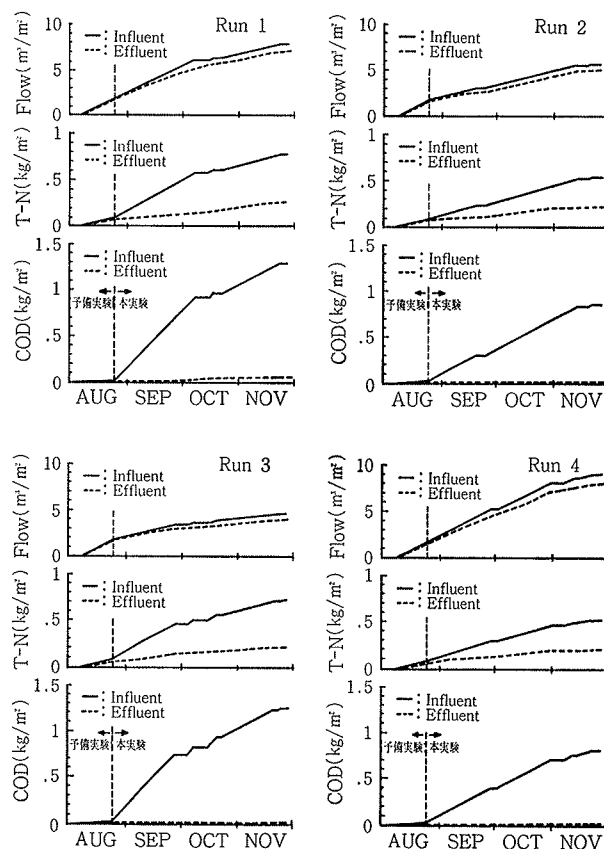
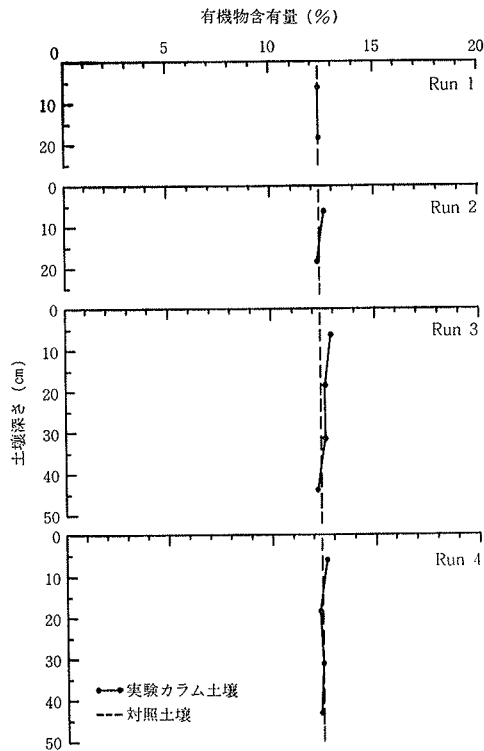


図-3 流入水、流出水の水量、COD量、T-N量の積算値

	Run 1		Run 2		Run 3		Run 4	
	流入水	流出水	流入水	流出水	流入水	流出水	流入水	流出水
水量 (l/m²・日)	97.0	81.8	47.2	40.2	50.7	39.9	96.9	86.0
pH (—)	—	7.4	—	5.5	—	6.7	—	6.9
Mアルカリ度(mg/l)	—	10.4	—	0.7	—	3.3	—	5.7
COD (mg/l)	214	3.8	214	2.3	428	2.7	107	1.8
NH ₄ -N (mg/l)	12.8	9.4	12.8	3.2	25.6	6.2	6.4	0.8
NO ₂ ・NO ₃ -N (mg/l)	8.7	8.0	8.7	45.0	11.1	62.8	7.6	24.4
Org-N (mg/l)	94.9	1.3	94.9	0.8	189.7	2.2	47.5	0.3
T-N (mg/l)	116.4	18.8	116.4	49.0	226.4	71.2	61.5	25.5
COD量 (g/m²・日)	20.76	0.31	10.10	0.09	21.68	0.11	10.37	0.15
T-N量 (g/m²・日)	11.29	1.54	5.50	1.97	11.47	2.84	5.96	2.19
除去COD量 (g/m²・日)	20.45		10.01		21.57		10.22	
除去T-N量 (g/m²・日)	9.75		3.53		8.63		3.77	
COD除去率 (%)	98.5		99.1		99.5		98.6	
T-N除去率 (%)	86.4		64.2		75.2		63.3	

表-3 最初の目詰まりが起こるまでの測定結果の平均値

有機物とも実験後の方がやや高くなっているが、有機物およびOrg-N(有機性窒素)はもともと土壌中に多く含まれており、それ程高くなっているとはいえない。



図一四 実験カラム各層の有機物含有量

3.3. 植物による吸収

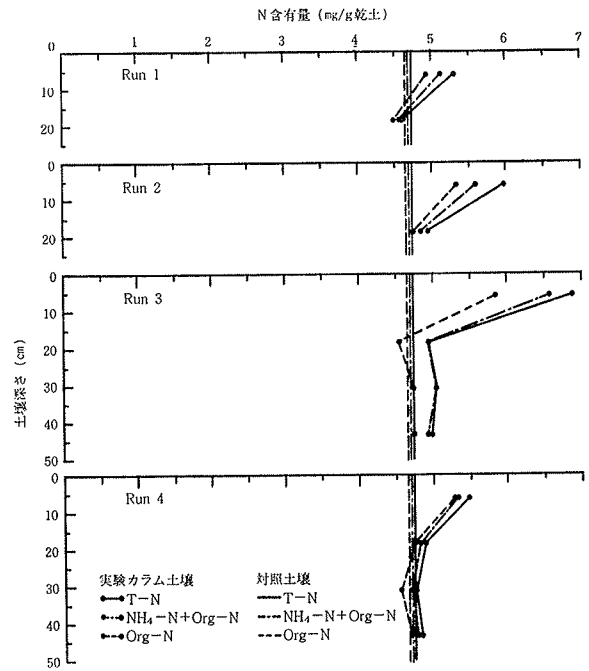
採取した植物の重量および窒素含有量の測定結果を表一五に示す。各実験とも K-N (ケルダール窒素) 含有率と T-N 含有率の値はあまり差がなく、NO₂・NO₃-N はほとんど含まれていないようである。K-N, T-N 含有率とも Run 4 が他に比べて1割～2割程度低い、これは Run 4 の流入水濃度が今回の実験の中で一番低いことに起因しているものと思われる。

植物の生育量は、流入水量が多い Run 1 と Run 4 が Run 2 と Run 3 に比べて約2倍になっている。また、Run 2 と Run 3 にしても対照に比べればかなり高くなっている。

3.4. 除去窒素の構成

図一六に、除去された窒素の構成を示す。土壌処理において、流入水中の窒素は、主として、生物的脱窒、植物への吸収、土壌への蓄積の三つの方法によって除去される。したがって、図一六の中でその他として表わされているものの大部分は生物的脱窒によるものと考えられる。

生物的脱窒は、Pseudomonas 等の通性嫌気性菌による硝酸あるいは亜硝酸呼吸のことであり、有機源と嫌気的な環境が必要となる。硝酸および亜硝酸呼吸に必要な理論酸素要求量 (ThOD) を化学量論的に求めると、ThOD/N 比でそれぞれ 2.9, 1.7 となるが、脱窒菌は有機物を細胞合成の炭素源としても利用するので、実際にはこれよりも30～40%余分に必要になる。今回の実験で



図一五 実験カラム各層の窒素含有量

		NH ₄ -N (kg/m ²)	NO ₂ ・NO ₃ -N (kg/m ²)	Org-N (kg/m ²)	T-N (kg/m ²)	COD _{Cr} (kg/m ²)	有機物 (kg/m ²)
Run 1	カラム	0.022	0.017	0.732	0.771	23.06	19.26
	対照	0.006	0.005	0.722	0.733	23.14	19.26
Run 2	カラム	0.027	0.038	0.780	0.845	23.05	19.25
	対照	0.006	0.005	0.719	0.730	23.04	19.17
Run 3	カラム	0.126	0.028	1.543	1.697	46.90	39.25
	対照	0.012	0.011	1.449	1.471	46.41	38.63
Run 4	カラム	0.028	0.024	1.493	1.544	46.16	38.67
	対照	0.012	0.011	1.450	1.473	46.46	38.66

カラム：実験後 対照：実験前

表一四 実験前後の各カラム土壌中の窒素および有機物

採取日	9月25日						11月20日		
	植物重量 (kg/m ²)	水分 (%)	植物乾重量 (kg/m ²)	K-N含有率 (%)	T-N含有率 (%)	N含有率 (g/m ²)	植物重量 (kg/m ²)	水分 (%)	植物乾重量 (kg/m ²)
Run 1	10.95	85.4	1.60	3.22	3.15	50.4	0.00	—	0.00
Run 2	5.24	85.0	0.78	2.99	3.08	24.0	0.27	75.5	0.07
Run 3	6.08	85.5	0.88	3.00	3.06	26.9	0.15	75.9	0.04
Run 4	10.47	83.4	1.74	2.54	2.71	47.2	0.48	72.3	0.13
対照	0.89	81.3	0.17	—	—	—	0.02	15.8	0.02

表一五 植物の重量および窒素含有量

は、各 Run とともに BOD₅/N 比でも 2.7～2.9 程度あり、脱窒に必要な有機物はある程度満足していると考えられる。嫌気的な環境については、冠水状態の時に測定した酸化還元電位の測定結果では十分嫌気的な条件になっており、冠水状態以外の時でも、土壌が飽和浸透に近い状態になっていることを考えれば、ある程度以上の土壌深さになれば、脱窒に必要な嫌気的な状態になっていることは十分想像される。土壌カラムに流入した合成下水は、土壌表

面の好気的環境で硝化を受けたのち、土中の嫌気的環境下で合成下水中の有機物、あるいは、合成された生物細胞を水素供与体として脱窒されると考えられる。このことは、土壌分析の結果、各 Run とも第2層以下の NO₂・NO₃-N 含有率が非常に小さくなっていることから確認できる。

今回用いた土壌は窒素含有量(大部分は Org-N)が非常に高く、土壌の分析誤差を考えれば、土壌中に蓄えられた量が必ずしも精度よく表わされているとはいえない。したがって、各実験間の比較を行なうことは困難であるが、図-6より各実験とも除去された窒素のうち半分以上は生物的脱窒によって達成されたと考えられる。

3.5. 目詰まり要因

目詰まりに対する影響因子をみるために、目詰まりが起こるまでの運転日数を、土壌厚さ、COD 負荷、流入水量を因子として要因分析を行なった。ただし、目詰まりが起こるまでの運転日数は、必ずしも所定の流入水量で運転できなかったこと、あるいは、トラブルにより流入水の供給が停止したことがあったことなどから、目詰まりまでの総流入水量を表-2で設定した流入水量で除した値を用いた。

表-6に、要因分析の結果を示す。実験数が少なく、統計的に処理するにはやや無理があるが、影響因子を浮かびあがらせるためにあえて行なったものである。表-6からわかるように、目詰まりは COD 負荷の影響を大きく受けており、また、COD 負荷の流入水量に対するF検定を行なった結果、5%の水準で有意であることが示された。一般に土壌の目詰まりは、固形物などの蓄積によるものと、発生したガスが気泡として土壌中に封入されることによって起こることが知られているが、いったん目詰まりが発生したならば急速に浸透性が衰えるようである。今回の実験で用いた合成下水には SS 成分はなく、目詰まりの原因は合成された生物体と発生した CO₂ や N₂ ガスなどによるものと考えられる。

4. 結論

浅い土壌層に高負荷の排水(合成下水)を流入させ、目詰まりの生成状態や排水の浄化の程度を調査した結果、次のようなことが分かった。

(1) 有機物の除去は、高負荷、浅土壌の厳しい条件にもかかわらず、すべての実験条件でほとんど完全に除去された。

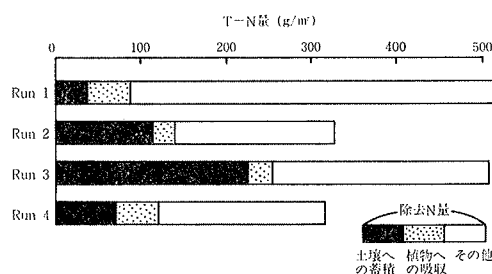


図-6 除去された窒素の構成

	変動	自由度	不偏分散	寄与率(%)
土壌厚さ	85.56	1	85.56	7.4
COD負荷	1072.56	1	1072.56	92.5
流入水量	1.10	1	1.10	0.1
T	1159.22	3		100.0

表-6 要因分析表

(2) 土壌の目詰まりは有機物の負荷量の影響を大きく受ける。土壌の条件によっても違おうが、高有機性排水の流入は、有機物の流出ということよりも目詰まりの発生という点で先に問題になるようである。

(3) 窒素の除去は、T-Nの除去率で、全実験期間では65~75%、目詰まりが起こる前までは65~85%となっており、実験条件によって多少違いがある。また、除去された窒素のうち、半分以上は生物的脱窒によって達成されたものと考えられる。

(4) 土壌中の窒素は、実験期間中に T-N で 5~15%とやや増加した。一方、有機物の方は、一部でわずかに増加している他は実験前とほとんど変わらなかった。

参考文献

- 1) Satterwhite, M. B., et al.: Rapid Infiltration of Primary Sewage Effluent at Fort Devens, Massachusetts, CRREL Report 76-48, (1976)
- 2) Pound, C. E., et al.: Long-term Effects of the Rapid Infiltration of Municipal Wastewater, Prog. Wat. Tech., 9, (1977), pp. 1019~1029
- 3) Hallows, P. J.: Tertiary Land Treatment of Wastewater with Particular Reference to Albury-Wodonga, 3d National Chemical Engineering Conference, (1975), pp. T104~106
- 4) 田口玄一: 実験計画法(上), 丸善, (昭和49)