

B-25 都市内自己水源の活用に向けた下水処理水の地下水涵養土壌カラム実験

○ 佐藤修之¹⁾、中田典秀²⁾、鈴木幹夫¹⁾

伊藤光明¹⁾、田中宏明³⁾、古米弘明⁴⁾

国土環境株式会社¹⁾、(独) 土木研究所²⁾、京都大学³⁾、東京大学⁴⁾

1. はじめに

都市における循環型水利用形態の構築、つまり雨水、涵養地下水利用や下水処理水等排水の再利用に多くの期待が寄せられている。これらの水利用を想定した場合、量的な問題だけでなく用途の違いからそのリスクや許容性といった水の質的な問題について検討することが非常に重要と考えられる。本研究では、都市における水資源のひとつである下水処理の地下水浸透による再利用を想定し、土壌カラム実験を行い、土壌浸透過程における水質変化を栄養塩類や重金属の分析、遺伝子組み換え酵母によるエストロゲン様活性のスクリーニング(バイオアッセイ)により評価を行った。

2. 実験方法

土壌カラム実験に用いたカラムは、内径 200mm、長さ 600mm のステンレス製のものをを用いた(図1)。カラム下部にはステンレス製のフィルター及び加熱処理した石英フィルターを取付けた。カラムへの送水はローラーポンプを用いて行い、原水タンク、受けタンク、配管はすべてステンレス製のものを、ポンプローラー部のみタイゴンチューブを用いた。カラムに充てんした土壌(関東ローム)は、都内の公園より、地表から 90~120cm の深度で採取したものを用いた。

採取した土壌を風乾し、はじめに 2mm 目の篩い、続いて 75 μ m 目の篩いをかけて粒径 75 μ m~2mm の粒子を得た。この土壌を 2 本のカラムにそれぞれ厚さ 20cm、50cm となるように充填した(充填量はそれぞれ 5kg、12.5kg となる)。下水処理水の浸透実験に先立ち、土壌カラムに地下水を流速 1~5mL/min で合計約 60L を断続的に通水し、カラムのコンディショニング、流速の最適化の検討を行った。通水する下水処理水は、標準活性汚泥処理を行っている処理場放流水を用いた。処理場放流水は、カラムへの通水前に塩素濃度を 3mg/L となるように次亜塩素酸ナトリウム溶液を添加し、添加後 24 時間経過したものを用いた。この塩素処理したカラム流入水をローラーポンプにより 5mL/min でそれぞれのカラムに通水した。通水は 20℃の恒温室内で 2003 年 1 月から 3 月までの合計 75 日間、総量としてそれぞれ約 600L を連続的に行った。通水させる処理場放流水は 1 週間ごとに採取した。本研究では多項目の分析を行っているため、分析用試料は、毎週連続する 2 日分の流出水を混合し、分析に供した。

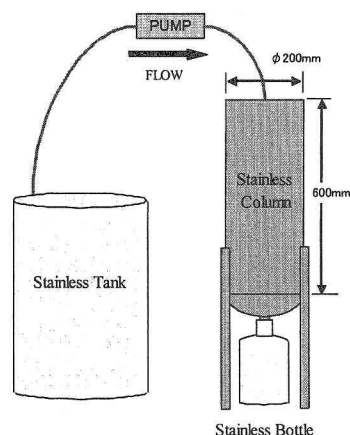


図1 土壌カラム実験装置

3. 分析方法

カラム流入水、カラム流出水の pH、電気伝導度、濁度は実験現場で測定した。COD、BOD、TOC、窒素類、リン類は公定法 JIS K0102 に従って測定した。カドミウム、鉛、銅、亜鉛、クロム、ヒ素、セレン、ベリリウム

ム、ニッケル、バナジウム及びマンガンなど金属類の分析はJIS K 0102 に従い ICP/MS により測定した。また、実験終了後の土壤中 TOC、T-N、窒素類、リン類は、底質調査方法を用いて分析した。エストロゲン様活性は、試料を GF/B ガラス繊維フィルターでろ過後、Sep-Pak C18 カートリッジを用いて抽出し、メタノールで溶出、ジメチルスルフォオキシドに転溶後、アッセイに供した。試験結果より EC50 を算出し、ポジティブコントロールである 17 β -エストラジオールに対する相対値としてエストロゲン様活性を求めた。

4. 分析結果

実験開始時から実験終了時までの間で通水した流入水の各分析項目の濃度はほぼ一定の値であった。カラム流出水では、いずれも開始から 40 日後までいくつかの項目で濃度変動が見られたが、その後はほぼ一定となった。表 1 に実験期間中のカラム流入水、流出水濃度の平均値、偏差を示す。なお、流出水濃度は、開始から 40 日以後の値である。図 2 に濁度、COD、BOD、TOC、T-N、T-P、金属類のカラムにおける除去率を示す。COD、BOD、TOC は除去率の変動が大きく、実験開始から 10~40 日間では負荷した流入水と比べ流出水濃度が高くなる結果となったが、通水開始 40 日後以降で安定となり、除去率は 20cm、50cm カラムともに 80% 程度となった。また、T-N の変動も大きく、開始後 10~20 日目までで除去率がマイナスを示す結果となった。一方、濁度、T-P については実験期間中を通じ 100% 近い除去率を示した。窒素類は複雑な挙動を示しており（図 3.1、3.2）、下水処理水通水開始 10 日から 30 日後にかけてアンモニウム態窒素および亜硝酸態窒素濃度の上昇が確認された。その後、両無機態窒素は減少し、それにかわって硝酸態窒素が増加し、実験終了時までカラム流出中総窒素のほぼすべてが硝酸態窒素となった。このことは、土壤中の微生物（硝化細菌）の作用によりアンモニウム態窒素から亜硝酸態窒素、硝酸態窒素へと変化していることを示唆しており、処理水負荷後に土壤中の微生物群集の活性促進が起こっていると考えられる。

金属類は流入水、カラム流出水とも銅、亜鉛、ニッケル、マンガンが検出された他、その他金属は検出されなかった。土壤カラム通過による金属類の除去率は、銅を除き 50~98% と比較的高い除去率を示した。銅除去率の変動は大きく、20cm カラムで 0~100%（平均 33%）、50cm カラムで 33~100（平均 59%）であった。実験終了後土壤の TOC、T-N、T-P 鉛直プロファイルを図 4 に示す。図に示

表 1 実験期間中のカラム流入水及び流出水中の各成分濃度

Constituent	Unit	Concentration $\pm$ S.D.					
		Influent (n=11)		Effluent 20cm-column (n=5)		Effluent 50cm-column (n=5)	
pH	-	7.4	$\pm$ 0.2	7.2	$\pm$ 0.1	6.94	$\pm$ 0.2
EC	mS/m	59.1	$\pm$ 1.2	47.1	$\pm$ 1.2	46.0	$\pm$ 1.4
SS	mg/L	1.5	$\pm$ 0.5	—	—	—	—
Turbidity	-	3.1	$\pm$ 0.9	0.4	$\pm$ 0.3	0.3	$\pm$ 0.4
COD	mg/L	8.93	$\pm$ 0.7	1.84	$\pm$ 0.2	1.44	$\pm$ 0.2
BOD	mg/L	2.74	$\pm$ 0.6	0.78	$\pm$ 0.4	1.03	$\pm$ 0.4
TOC	mg/L	5.73	$\pm$ 0.4	1.62	$\pm$ 0.2	1.38	$\pm$ 0.2
DOC	mg/L	5.42	$\pm$ 0.4	1.30	$\pm$ 0.2	1.14	$\pm$ 0.2
T-N	mg/L	35.1	$\pm$ 3	29.6	$\pm$ 3	29.8	$\pm$ 2
NO ₂ -N	mg/L	0.02	$\pm$ 0.02	0.01	$\pm$ 0.02	0.00	$\pm$ 0.00
NO ₃ -N	mg/L	0.02	$\pm$ 0.01	25.6	$\pm$ 2	26.3	$\pm$ 2
NH ₄ -N	mg/L	33.2	$\pm$ 4	0.15	$\pm$ 0.09	0.02	$\pm$ 0.02
T-P	mg/L	0.20	$\pm$ 0.05	0.003	$\pm$ 0.001	0.00	$\pm$ 0.00
PO ₄ -P	mg/L	0.11	$\pm$ 0.04	0.001	$\pm$ 0.000	<0.001	$\pm$ 0.00
Cu	mg/L	0.006	$\pm$ 0.002	0.005	$\pm$ 0.001	0.003	$\pm$ 0.001
Zn	mg/L	0.021	$\pm$ 0.004	0.004	$\pm$ 0.003	0.004	$\pm$ 0.002
Ni	mg/L	0.003	$\pm$ 0.001	0.001	$\pm$ 0.000	<0.001	$\pm$ 0.000
Mn	mg/L	0.022	$\pm$ 0.003	0.001	$\pm$ 0.000	0.002	$\pm$ 0.001

備考：Influent は実験期間 0~75 日、Effluent は 40~75 日のデータを用いた。

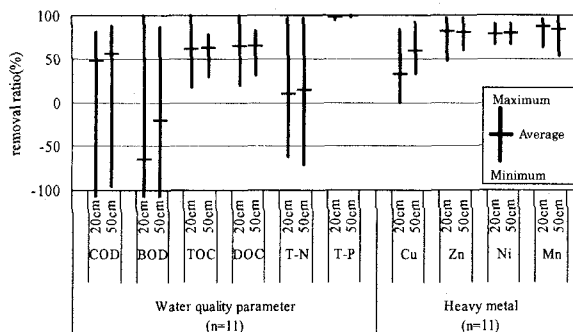


図 2 土壤カラム通水による除去率

すとおり表層0～5cm層で各項目とも濃度が高く、深くなるにつれてほぼ一様となっており、負荷した流入水中成分の多くが土壌の表層付近に保持された可能性が考えられた。カラム通水による除去量（カラム流入水と流出水の濃度の差から算出）とカラム保持量（実験開始時、終了時での土壌含有量の差から算出）は、TOC、T-Pでは土壌保持量≒除去量、T-Nでは土壌保持量<除去量となっており、窒素については土壌中で脱窒により系外に放出されていると推測される。

遺伝子組換え酵母を用いたエストロゲン様活性の測定の結果、流入水中に高い活性が確認されたが、流出水ではほとんど活性は検出されなかった（図5）。流出水中で確認された極低濃度の活性については、実験の経過に伴う増減は確認されなかった。

5. まとめ

再生水利用を想定した下水処理水の地下浸透について、土壌カラムを用いて実験を行った。TOC、リン、金属類については、高い除去率が確認されたほか、土壌浸透によるエストロゲン様活性の低減も確認された。しかし、窒素の除去率は低く、カラム内では硝酸態窒素の生成が確認された。硝酸態窒素は、地下水の環境基準項目の一つとなっており、その基準値は10mg/L以下と設定されている。今回、実験に用いた下水処理水は、標準活性汚泥処理を行っている処理場放流水であり、初期の総窒素濃度は、31～41mg/Lであった。実験結果では、開始から40日目以降の安定状態になった後も窒素除去率は10数%と低いことから、窒素の土壌浸透での除去は難しいものと考えられる。しかし、炭素、リン、金属類、エストロゲン様物質の除去には有効であり、地下浸透に供する排水の窒素含有量が低い場合には、地下水涵養や再生水の確保に有効な手段となる可能性があることが明らかとなった。

6. 今後の課題

土壌浸透により、炭素、リン、金属類、エストロゲン様活性等については高い除去が示唆された。しかし、窒素については土壌による除去率が低く、浸透させる処理水の選定、もしくは窒素除去のための前処理が必要であると考えられる。また、再生水の使用用途により、より多角的なリスク評価が必要であると考えられ、そのためには種々な微量汚染物質の分析や多種類のバイオアッセイによる水質評価が今後必要であると考えられる。

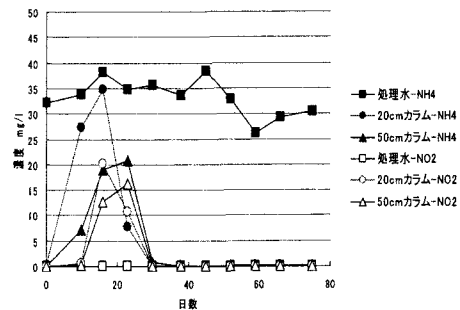


図 3.1 土壌カラム流出水中のNH₄-N、NO₂-Nの変化

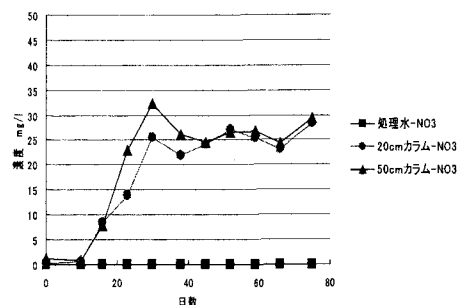


図 3.2 土壌カラム流出水中のNO₃-Nの変化

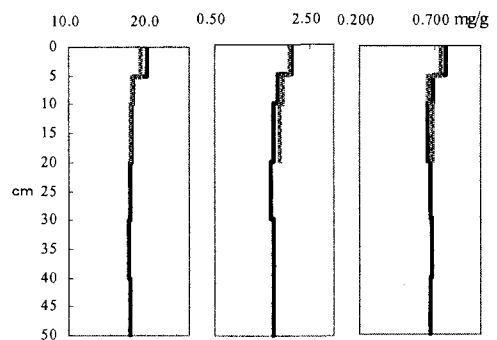


図 4 実験終了後土壌のTOC、T-N、T-P鉛直プロファイル(点線: 20cmカラム、実線: 50cmカラム)

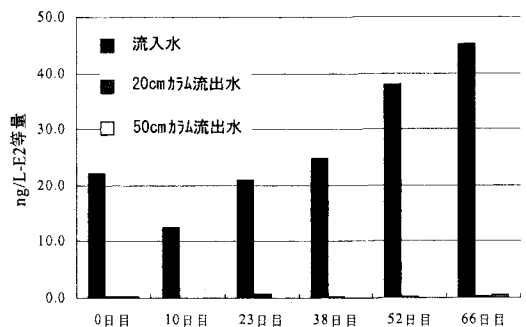


図 5 遺伝子組換え酵母によるエストロゲン様活性