第8回 水質汚濁研究会議 論文紹介 (Ⅲ)

訳者：北尾 高嶺* 竺 文彦* 八木 憲彦*

下水の土壌滲過による窒素，リン酸，ウィルスの除去 (抄訳)

(Nitrogen, Phosphate and Virus Removal from)
(Sewage Water During Land Filtration)

J. Clarence Lance** and Charles P. Gerba***

下水の土壌滲過は，水資源の汚濁防止と開発にとって有効な方法であるが，下水中の大量の栄養塩を除去するためには，土壌滲過システムの設計，操作を注意深く行う必要がある。

土壌によって栄養塩を除去する方法のひとつに，作物の刈り入れによるものがある，これは注水（灌漑）速度が遅いため（1.2～4.5m/年），広大な土地を必要とし，作物の種類も限定される．これに対して，下水の浄化を主目的とした高速土壌滲過システムでは，高速注水（30～80m/年）によって大量の水を処理することができ，二次処理下水を用いた野外実験によれば，し尿大腸菌や有機物の多くが除去され，ウイルスは検出されなかったとの報告がなされている¹⁾²⁾．栄養塩の除去は，負荷速度と移行距離に影響されると思われるが，土壌カラムを実験室に作ることによって，栄養塩の収支計算と窒素，リン酸の除去反応についての詳細な研究が可能である．実験室と野外の測定結果を比較すると，硝酸塩のピークや他のパラメーターのパターンがよく似ており，カラムが野外システムのよいモデルであることを示している³⁾．

初期の室内実験では，注水期に土壌の交換性錯体によって NH_4^+ が吸着保持され，引き続き乾燥期に酸素がとり込まれて硝化が起ることが明らかにされた．この一連の反応は，注水が断続的に行われる限り，繰り返される．窒素の除去率は，浸透速度 30～40 cm/日 による注水時で30%にとどまるが，これは形成された濃縮硝酸塩に対して，新たに注入される下水中の有機炭素が，完全な脱窒に必要な量を満たしていないためである．そこ

で，下水にぶどう糖を添加して有機炭素を 150 ppm まで増すと，窒素除去率は90%に増大する⁴⁾．このことは硝酸塩ピーク水中の $\text{C}/\text{NO}_3\text{-N}$ 比によって脱窒の程度が決まることを示している．

本論文では，①窒素除去率を80～85%にするために，硝酸塩ピークを弱めて， $\text{C}/\text{NO}_3\text{-N}$ 比を変える方法，②炭素パルスを加えて硝酸塩ピークの脱窒を促す方法，③高速土壌滲過システムにおいて，植物が脱窒に及ぼす効果を測定する方法を発展させるためになされた実験について述べ，同時に，土壌カラム内でのリン酸やウイルスの挙動についても記すことにする．

実験方法

2次処理下水の急速浸透池に使われているローム砂を長さ 2.75m，内径 10 cm のポリ塩化ビニール円筒に充填して土壌カラムを作った．このカラムに，2次処理下水を9日間注水し，5日間乾燥させることを繰り返した．

カラム内流速と累積流量は，流出水の重量測定によって，下水とカラム流出水について， NO_2^- ， NO_3^- ， NH_4^+ ， PO_4^{3-} および Organic-N の自動分析と有機炭素の分析を行った．カラムには，異なる深さに圧力計，酸化還元電極，および採水口を設置した．

カラム内の浸透速度は，土壌の密度を変えることによって 15～45 cm/日 の範囲で調整された．浸透速度が硝酸塩の挙動に及ぼす影響を調べるために，トレーサーとして KCl のパルスを加え，カラム流出水の塩濃度を電気伝導度から求めた．

* 京都大学工学部衛生工学教室

** Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, United States Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona 85040, U.S.A.

*** Department of Virology and Epidemiology, Baylor College of Medicine, Houston, Texas 77025, U.S.A.

リサイクル実験では、硝酸塩濃度 20~100 ppm の流出水を 3℃ に冷却し、下水と流出水を 2 対 1 の割合に混合してカラム内をリサイクルさせた。

内径 15 cm の円筒 9 本に、浸透池の砂(6 本)と建築用の砂(3 本)を充填した。この二種類の砂は組成は似ているが、建築用の砂は、以前に下水に浸ったことのないものである。6 本のカラムの上面には植物 (bermudagrass) を植え、うち 3 本は刈り取って収穫量を測定し、他の 3 本は細かく切って重さを測り、もとの表面に戻した。

9 日間の注水期のうち、はじめの 3 日間、100~200 ppm の炭素濃度を持つ下水をいくつかのカラムに与えた。これは、炭素のパルスを硝酸塩のピークといっしょに移行させるためである。

2 次処理下水にポリオウイルス懸濁液を混ぜて、 $3 \sim 5 \times 10^4$ PFU/ml となるように 2 つのカラムに添加した。添加は 3 サイクルの注水期の間続けられ、深さの異なる各採水口で毎日採水した。

結果と考察

(脱窒に及ぼす炭素パルスの効果)

ぶどう糖を 2 次処理下水に添加して 100 ppm の炭素パルスを加えると、窒素除去率は 33% から 54% に増し、200 ppm のパルスに対しては 66% に増大した。このように炭素をパルスとして加えると脱窒は促進されるが、連続的に加えても硝酸塩ピークは取り除かれなかった。

炭素パルスを加えても脱窒が完全でない理由は、脱窒菌の成長が小さいため、短時間にカラムを通過する高濃度の硝酸性窒素を十分に還元できないからであろう。

(脱窒に及ぼす浸透速度の影響)

ぶどう糖などの炭素源は高価であるので、下水中に含まれている炭素を利用して C/NO_3-N 比を修正する方法が考えられた。第 1 の方法は、土壌中の浸透速度を調整するもので、この方法によれば、浸透速度が低下するにつれて窒素除去率は増加し、両対数グラフ上で直線的な関係を示した(図-1)。浸透速度を 15 cm/日 まで下げると除去率は 80% に達し、硝酸塩ピークは取り除かれた。

いま、浸透速度の減少による脱窒増大の理由を、システムの流れ特性の変化のためであると仮定する。すなわち、硝酸塩は浸透速度が大である時は高濃度のまま流出するが、速度が小さくなると、有機炭素を含む浸透下水と混合し、脱窒に適した C/NO_3-N 比が形成される。この仮説を確認するために、注水期のはじめに下水中に KCl パルスを添加した。浸透速度 23 cm/日 では、濃縮塩ピークがカラムを通過したが、14 cm/日 ではカラム内で

図-1 窒素除去率におよぼす浸透速度の影響

ピークが弱くなった。このことは、上記の仮説の正しさを示している。また、滞留時間が増したことも、脱窒増大に寄与しているものと思われる。

(硝酸塩濃縮水のリサイクル)

C/NO_3-N 比を調整する第 2 の方法は、カラムから流出する濃縮硝酸塩水を下水と混合して、カラム内をリサイクルさせるもので、この方法によって窒素除去率は 75~80% に増大した。リサイクル実験においても窒素除去率は浸透速度に影響され、浸透速度 33 cm/日 において 75%、25 cm/日 において 80% となり、50 cm/日 では、わずか 40% であった。浸透速度が増すと滞留時間が短くなるために脱窒に影響が生じるものと思われる。

(植生による窒素除去効果)

植生を施したカラム実験を 1 月~10 月の間続けた結果、植生カラムの窒素除去率は、他のカラムより 14% 高かった。また、除去率は bermudagrass の生産量と強い相関を示した。

一方、植生カラムによる窒素除去量は、他のカラムよりも 1.8 g/column 多いが、刈り取られた bermudagrass 中の窒素は 3.5 g/column であった。このことは、植生カラムでは脱窒による窒素除去が他のカラムよりも小さいことを示している。

刈り取った草をカラムの表面に敷いて、有機炭素源としたが、窒素除去は 4% 増しただけであり、脱窒は促進されなかった。以上より、高速土壌濾過システムの植生による窒素除去の増大は、窒素が植物によって取り込まれるためであることが明らかになった。

(リン酸の除去)

6 か月間、土壌カラムに下水を断続注水して、浸透速度とカラム流出水リン酸濃度の平均値をとると図-2 に示

図-2 カラム流出水リン酸濃度におよぼす浸透速度の影響

ようになった。流入下水リン酸濃度は平均 12.1 ppm である。浸透速度の低下につれてリン酸除去が増大することがわかった。また、流出水リン酸濃度は、カラム内の流水速度に大きく影響され、注水を止めて流水速度が低下する時に、リン酸濃度が激減することがわかった。

下水に汚染されたことのない砂を充填したカラムでは、はじめの 200 日以上断続注水の間、流出水リン酸濃度は 0.5~1.0 ppm の低い値を示した。その後、濃度は次第に増加して、図-3 に示すように、浸透速度によって異なる濃度に達した。さらに、流入下水のリン酸濃度を低下させると流出水濃度も下った。除去率は、はじめの 200 日間は、90~95% で、その後、浸透速度 22.3 cm/日 で 58%、18.2 cm/日 で 73% に低下した。リン酸濃度が増加しはじめる時期は、注入下水の総量によって支配されるので、浸透速度によって異なっていることが認められた。

図-3 カラム流出水リン酸濃度の経時変化

これらの結果より、リン酸は、はじめは流水速度や滞留時間に関係なく砂に吸着され、200 日間の断続注水で飽和に達し、その後は、滞留時間に応じて吸着や沈殿が生じるものと思われる。

(ウイルスの除去)

ウイルスは土壌カラムの表層で大半が除去された(図-4)。浸透速度による差異はあまり認められず、ウイルスが透過しうる距離はだいたい一定しており、80 cm より深い所ではほとんど検出されなかった。

図-4 下水に添加されたウイルスの除去とカラム深さとの関係

— 参考文献 —

- 1) Bouwer H., Lance J. C. and Riggs M. S. (1974) High-rate land treatment II : Water quality and economic aspects of the Flushing Meadows project. *J.W.P.C.F.* **46**, 844-859.
- 2) Gilbert R. G., Gerba C. P., Rice R. C. and Bouwer H. (1976) *Appl. Microbiol.* (in preparation)
- 3) Lance J. C. and Whisler F. D. (1972) Nitrogen balance in soil columns intermittently flooded with sewage water. *J. Environ. Qual.* **1**, 180-186.
- 4) Lance J. C. and Whisler F. D. (1976) The stimulation of denitrification in soil columns by adding organic carbon to sewage water. *J.W.P.C.F.* (in press)