

B-55 下水処理場曝気槽および土壌浸透処理過程での微生物基質資化特性の把握に関する研究

亀田 一平^{1*}・○高部 祐剛¹・鈴木 亮介¹
西村 文武¹・伊藤 禎彦¹

¹京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1棟)

* E-mail: kameda.ippei.72a@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

近年、地球規模の気候変動が世界各地で発生しており、それにともない水源水質が不安定となり、安全かつ十分な飲料水の確保が困難になると予測される。

この問題の解決策の一つとして下水処理水の再利用が考えられており、そのシステムの開発が必要とされる。再利用システムにおいては低エネルギー消費かつ低コストの持続可能な水の再利用システムであることが重要であり、その条件を満たす水の再利用方法の一つとして、地下水涵養による土壌浸透処理 (SAT: Soil Aquifer Treatment)がある。

一般的に、SAT内での主要な処理メカニズムとして、ろ過、吸着および生物学的処理が知られており、特に生物学的処理は持続可能な処理として重要ある。

また、SATでは好気性微生物の基質代謝により、不飽和層を含む表層において有機物の生物分解が活発であることが知られており^{1) 2) 3)}、不飽和層での微生物群集とその物質低減への動態が注目されている。そしてこのことから、不飽和層を含む表層において、水質の劇的な変化とそれによる微生物群集および活性の大きな変化が予想される。しかし、それに関する知見は少ない。

そこで、本研究では以下のことを目的とし、pilot-scale カラムおよびBiolog assayを用いての実験的考察を行った。

- ① SATを通して、土壌中、特に不飽和層に着目した微生物の代謝活性(微生物基質資化特性)変化の把握
- ② 下水処理場曝気槽および処理水中微生物での代謝特性とSATにおける土壌微生物の代謝特性の比較、ならびに下水処理水のSATへの流入がSAT土壌中微生物基質資化特性に及ぼす影響の把握
- ③ 土壌に浸透する下水処理水がSAT土壌中微生物にどのように影響を及ぼすかの評価

2. 実験方法

(1) pilot-scale カラム

本研究は、京都市実下水処理場内に設置したpilot-scale カラム(砂, HRT1ヶ月)を用いて行った⁴⁾。pilot-scale カラムの概念図を図-1に示す。pilot-scale カラムへの流入水は、実A2O (Anaerobic-anoxic-oxic)処理水である。2011年10月からの運転開始以降、カラム流出水中のDOC等で安定した処理成績が得られている⁴⁾。

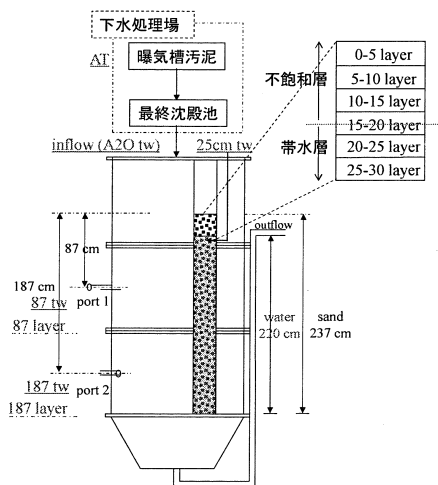


図-1 pilot-scale カラム

(2) Biolog assay

不飽和層における微生物基質資化特性の変化の把握のために、pilot-scale カラムの表層から30 cm深さまでの土壌をLiner Sampler (DIK-110C; 大起理工業株式会社)を用いて採土を行い、採土した土壌を図-1に示すように5 cmずつに6つに分け、それらのサンプル名を土壌表層からの距離と関連させて0-5 layer, 5-10 layer, 10-15 layer, 15-20 layer, 20-25 layer, 25-30 layerとした。また、SAT系内の鉛直方向の微生物基質資化特性を把握するために、port 1およびport 2からも土壌をサンプルを採取し、サンプル名をそれぞれ87 layerおよび187 layerとした。

水処理場曝気槽および処理水中微生物とSATでの土壌

微生物での資化特性の比較のために、処理場内の曝気槽汚泥およびカラム流入下水処理水を採取し、サンプル名をそれぞれAT, A2O tw とした。これらのサンプリングは2013年の7/29, 8/5, 8/12, 8/19の計4回実施した。

次に、Biolog assayを行うために、土壌サンプルから以下の手順で微生物の抽出を行った。

土壌試料10 gとpH7.6に調整した0.06 Mリン酸緩衝液 40 mlについて、エクセルオートホモジナイザー (株式会社日本精機製作所)により10000 rpm, 1 minの撹拌を3回繰り返すことによって土壌中微生物をリン酸緩衝液に移行させ⁵⁾、その上澄みをピオラム遠沈管に採取した。その後、その懸濁液から土壌粒子を取り除くために1500 rpm×1 minの遠心分離を行い、その上澄みをBiolog assayサンプルとした。

また、AT, A2O twサンプルに関しては、pHを7.6に調整した。また、微生物濃度をある程度そろえるために、リン酸緩衝液で100倍、10倍にそれぞれ希釈した。

本研究ではBiolog社のマニュアル⁶⁾に従い、Biolog assayとしてEcoplate (BIOLOG社)を用いて実験を行った。

Ecoplateの各ウェルの吸光度はMicroplate reader (DSファーマバイオメディカル株式会社)により測定し、各ウェルの吸光度の平均値であるAverage Well Color Development (AWCD)を以下の式で定義した。

$$AWCD = \frac{1}{96} \sum_{i=1}^{96} OD_{(i,t)} \quad (1)$$

ここで、 $OD_{(i,t)}$ はウェル*i*の時間*t*における吸光度からブランクの吸光度を除いた値とする。そして、各プレートがAWCD=0.2に達した時間での $OD_{(i,t)}$ により主成分分析を行った。

Ecoplateは25℃の暗所で7日間にわたり培養を行った。また、Ecoplateの吸光度測定の間隔は微生物増殖が活発な最初の5日間は3時間毎、次の2日間は6時間毎で行った。

(3) サンプリング時のカラム流出水の水質及び土壌サンプルの物性

サンプリング時のpilot-scaleカラムの土壌の物性や水質と資化特性の関連性を調べるために、図-1に示す地点からAT, A2O tw, 25 tw, 87 tw, 187 twおよび各土壌サンプルを採取し、それぞれの水質および物性を測定した。

現場にて水温、pHをD-51 (HORIBA)、DOをD-55 (HORIBA)を用いてそれぞれ測定した。土壌サンプルの含水率は105℃で半日乾燥させ、乾燥前との質量から求めた。TOCはSSM-5000A (島津製作所)を用いて測定した。

流出水は孔径1 μmのGF/B (Whatman)でろ過をした後、DOCをTOC-L (島津製作所)、 NH_4^+-N をAA-II (ブランルーベ)、 NO_2^- および NO_3^- -NをAA-III (ブランルーベ)、TNおよびTPをAACS II (ブランルーベ)を用いてそれぞれ測定した。Org-NはTNから無機体窒素の値を除いて求めた。

3. 実験結果と考察

(1) Biolog assayの結果

各サンプルのAWCDにおける経時変化を図-2に示す。AWCDではAT, A2O tw, 0-5 layerは土壌表層から5 cm以下のサンプルと比べて明らかに高い値を示した。このことは、AT, A2O tw, 0-5 layerが5 cm以下の砂の層より微生物反応が活発であったことを示している。

ここで、AWCD=0.2の時の主成分分析の結果を図-3に示す。図-3から、AT, A2O twおよび0-5 layerで類似した微生物基質資化特性がみられた。これは、多量のカラム流入下水処理水により、0-5 layerに土壌由来ではなくA2O処理水由来の微生物が卓越したことが原因と考えられる。

また、土壌表層から5 cm以深の砂の層間では類似した微生物基質資化特性がみられ、0-5 layerのものとは大きく異なっていた。そして、5-10 layerのサンプルがこれら2グループの中間に位置する場合もあった。

図-3から、表層からおおよそ5 cm深さ周辺で微生物基質資化特性が劇的に変化していることが明らかになった。また、土壌表層から5 cm以深の砂の層のサンプルとAT, A2O twのサンプルの微生物基質資化特性が異なった。このことにより、下水処理場曝気槽と土壌層5 cm以下の生物処理の特徴が大きく異なる可能性が示唆された。

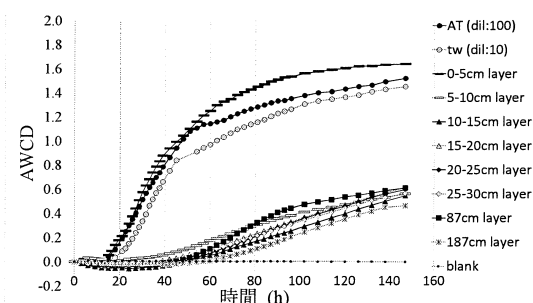


図-2 各サンプルのAWCDにおける経時変化 (8/5実施)

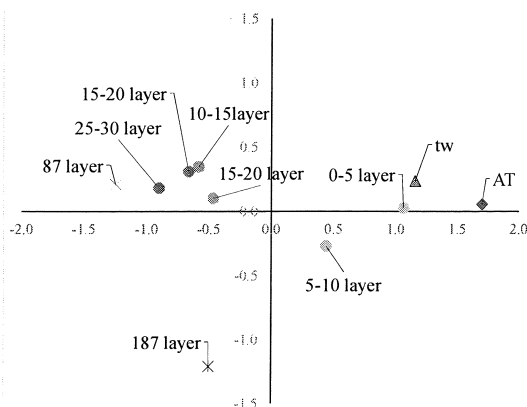


図-3 主成分分析 (8/5実施)

表-1 カラム土壌の物性

	0-5 layer	5-10 layer	10-15 layer	15-20 layer	20-25 layer	25-30 layer	87 layer	187 layer
TOC (ppt)	621	220	130	111	80.7	66.4	18.4	21.1
含水率 (%)	15.5	14.4	14.7	15.7	16.7	16.5	17.9	17.4

表-2 カラム流出水の水質

	水温 (°C)	DO (mgO ₂ /L)	pH	DOC (mgC/L)	TN (mgN/L)	NH ₄ ⁺ (mgNH ₄ ⁺ /L)	NO ₂ ⁻ (mgNO ₂ ⁻ /L)	NO ₃ ⁻ (mgNO ₃ ⁻ /L)	Org-N (mgOrg-N/L)	TP (mgP/L)
AT	29.1	2.7	6.4	3.65	3.28	0.08	0.01	2.24	0.95	0.738
A2O tw	29.8	1.5	6.4	3.68	4.4	0.14	0.05	3.38	0.83	0.469
25 tw	31.6	×	6.6	1.53	5.34	0.15	0.01	4.71	0.49	0.008
87 tw	29.9	4.2	6.6	0.85	4.53	0.2	0.02	3.86	0.44	nd
187 tw	29.4	3.6	5.5	0.67	4.32	0.38	0.01	3.62	0.31	nd

(2) pilot-scaleカラムの土壌サンプルの物性および水質と微生物基質資化特性の関係性に関する考察

サンプリング時の各土壌サンプルにおける物性および各カラム流出水の水質の測定結果の平均値を表-1および表-2にそれぞれ示す。

A2O処理水流入開始前の土壌の含水率は0.567%であったが、表-1から、この値に比べて各層で明らかに大きな値の含水率が示された。この結果から、不飽和層に関しても十分にA2O処理水がいきわたっていたことが分かる。

また、表-1から、TOCが土壌表層で大きな値を示した。これは、土壌表層において、多量のカラム流入下水処理水中の有機物により卓越した微生物の存在と、またその有機物が土壌粒子へ吸着したことが一因だと考えられる。

表-2のDOのデータから、各試水は、好気状態であったと考えられ、また、サンプリング時の流出液の水温は、サンプル間、サンプル実施間で大きな違いがなかった。

また、窒素化合物に関しては全てのサンプルで微生物代謝に十分と考えられる濃度が検出された。これらのことから、これらの水質が微生物基質資化特性に影響を与える大きな要因でなかったと考えられる。

pHにおいて、187 layerのサンプルにのみ他サンプルと差異がみられた。この差異による187 layerの微生物基質資化特性への影響は否定できない。しかし、主成分分析の結果、187 layerと土壌表層から5 cm以深の砂の層で類似した微生物基質資化特性を示したことから、その影響は小さいものであった可能性が考えられる。

表-2から、87 twと187 twのサンプルでTPが検出されなかった。また、25 twのサンプルでわずかにTPが検出されたが、リンが律速となっている可能性が考えられた。ゆえに、土壌表層での活発な代謝にともなうリンの消費により、リンが律速となり、土壌5 cm付近での微生物基質資化特性の変化に影響を与えた可能性が考えられる。

DOC除去率は25 layerまでで57.4%、87 layerまでで76.3%、187 layerまでで80.9%であった。つまり、25 layerまでの土壌でDOCが劇的に除去され、このDOC変化もリンと同様に、微生物基質資化特性に影響を与えたと考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 曝気槽汚泥、A2O 処理水および 0-5 layer のサンプルで類似した微生物基質資化特性がみられた。このことから、多量のカラム流入下水処理水により、0-5 layer に A2O 処理水由来の微生物が卓越した可能性が考えられる。
- (2) 土壌表層から 5 cm 以深の砂の層で類似した微生物基質資化特性がみられ、0-5 layer のものとは大きく異っていた。このことから、下水処理場曝気槽と土壌層 5cm 以下での生物処理の特徴が大きく異なることが示唆された。
- (3) 土壌表層の活発な微生物代謝にともなうリンの消費によりリンが律速となり、また表層 25 cm までの土壌で DOC が劇的に除去されていた。このことから、水中のリンおよび DOC 濃度変化が土壌 5 cm 付近での微生物基質資化特性の変化に影響を与えた可能性が考えられる。

謝辞：本研究は(独)科学技術振興機構戦略的創造推進事業 (CREST)の一環として実施した。本研究へ協力いただいた京都市上下水道局各位に感謝の意をここに示す。

参考文献

- 1) Kolehmainen, E. *et al.*: Natural organic matter (NOM) removal and structural changes in the bacterial community during artificial groundwater recharge with humic lake water, *Water Res.*, Vol.41, No.12, pp.2715-2725, 2007.
- 2) Zhang, X. *et al.*: Functional diversity changes of microbial communities along a soil aquifer for reclaimed water recharge, *FEMS Microbiology Ecology*, Vol.80, No.1, pp.9-18, 2012.
- 3) Drewes, J. *et al.*: Fate of natural organic matter (NOM) during groundwater recharge using reclaimed water, *Water Sci. Technol.*, Vol.40, No.9, pp.241 - 248, 1999.
- 4) 高部ら: 土壌浸透処理における化学物質と消毒副生成物生成ポテンシャルの動態, 環境衛生工学研究, Vol.27, pp.20-23, 2013
- 5) 市川貴大ら: FDA(フルオレセイン・ジアセテート)加水分解活性を用いた森林土壌の微生物活性の簡易測定, 森林立地学会誌, Vol.44, No.2, pp.15-22, 2002
- 6) Biolog Inc: Microbial Community Analysis