

B-37 ラボスケールの人工湿地による廃棄物埋立地 浸出水中の重金属除去性能の評価

○岡 正雄^{1*}・藤井 雄太¹・惣田 訓¹・池 道彦¹・石垣 智基²

¹大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻（〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1）

²国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター（〒305-8506茨城県つくば市小野川16-2）

* E-mail: oka@wb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

東南アジア諸国では、経済成長や人口増加によって、都市廃棄物の発生量が増加している。廃棄物の最終処分場である埋立地には、様々な廃棄物が混在するため、その浸出水は、腐敗しやすい有機物やアンモニア性窒素、重金属類等の様々な汚濁物質を含んでいる。東南アジアの多くの地域はモンスーン気候であり、特に雨季には大量の浸出水が発生する。このような地域の浸出水処理に膜分離のような高度な技術を用いた場合、資金、資材や人材の不足のため、処理が継続できなくなることも懸念されるため、設置・導入が容易で、維持・管理コストが安い処理技術が必要である。

そこで、人工湿地による浸出水の処理が注目されている。人工湿地の有する主な浄化機構は、植栽された植物体への吸収や、土壌による吸着・濾過、根圏微生物による分解など複雑であり、浸出水のように多様な汚染物質の処理に適用できる可能性がある。東南アジアは植物の育成に適した気候であるが、浸出水処理に人工湿地を用いている事例は必ずしも多くない。そこで本研究グループでは、ラボスケールの人工湿地を用いたモデル埋立地浸出水の処理実験を行い、その適用性について検討を行ってきた。前報では、人工湿地のアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）と有機酸に対する高い除去能力と蒸発散による浸出水の水量の削減効果を示した¹⁾。今回は重金属類に対する除去性能の評価を報告する。

2. 実験方法

(1) 人工湿地の作成

ラボスケールの鉛直流式人工湿地を作製した（図-1：直径 18 cm、高さ 63.2 cm、塩化ビニル製）。濾材は 3 層の土壌で構成されており、1 層目は植物の根が張りや

すように粒径 3-4 mm の細かい赤玉土を約 20 cm、2 層目には粒径 10-15 mm の粗い赤玉土を約 15 cm、3 層目（最下層）には軽石を約 5 cm 充填した。植生種には東南アジアに広く自生しているヨシとイグサを選定した。ヨシ植栽系、イグサ植栽系、植物を植栽しない対照系の人工湿地を 2 系ずつ作製し、東南アジアの気候を再現するために温室（気温 25 °C以上）に設置した。

(2) 運転方法

シーケンシングバッチ方式で、モデル浸出水を人工湿地によってRun1からRun4まで連続的に処理した。水道水で調製したモデル浸出水の成分を表-1に示す。Run1では、埋立処分場のメタン発酵期を想定した有機酸を含まないモデル浸出水を用いた。初日に上部からモデル浸出水5 Lを流入させ、人工湿地の下部に達した浸出水は、ポンプで上部に戻し、流量 5 L/dayで下向流で循環させた。3日毎に内部に2 L残して排水し、モデル浸出水を新たに3 L流入させ、この操作を繰り返した。Run2では、

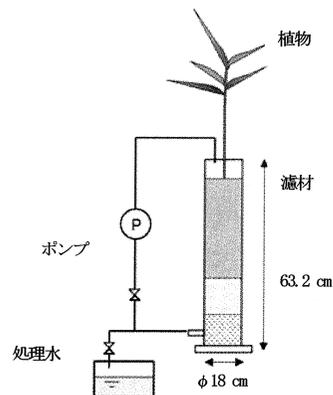


図-1 鉛直流式人工湿地のデザイン

表-1 モデル浸出水の成分 (mg/L)

	Cd	Fe	Pb	Ni	Zn	Cr	Mn	NH ₄ -N	フミン酸ナトリウム	酢酸ナトリウム	プロピオン酸ナトリウム
Run1	1	1	1	1	1	1	1	50	250	0	0
Run2	3	3	3	3	3	3	3	100	50	100	5
Run3・4	6	6	6	6	6	6	6	100	255	200	10

酸発酵期を想定した酢酸とプロピオン酸を含むモデル浸出水を用いた。Run3では降水量が少なく、汚濁成分が濃縮される乾季を想定し、表-1に示した組成を基準とし、3サイクル毎に1倍、2倍、3倍と段階的に高くしたモデル浸出水を用いた。Run4では降水量が多くなり、大量の浸出水を処理する必要がある雨季を想定し、バッチサイクルを3日から2日、1日と段階的に短くした。また、各Runの最後には内部の水を全て排水し、水道水を5 L 流入させ、1日以上循環させた後に排水することで内部に残っている金属の水溶性成分を排出した。処理試験 Run1は2012年6月15日から8月3日、Run2は9月10日から11月19日、Run3は11月22日から12月30日、Run4は2013年1月11日から1月25日に行った。

(3) 分析方法

流入水（モデル浸出水）と処理水中の金属濃度を誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-AES）、NH₄-Nの濃度をインドフェノール法、溶存有機炭素（DOC）をTOC測定装置で測定し、蒸発散量も考慮して、各バッチサイクルの各々の除去率を求めた。Run4の終了後に、濾材の各層の土壌を採取し、BCR逐次抽出法²⁾により金属を抽出した。また、ヨシは葉と茎、根、イグサは葉と根に分けて採取し、自然乾燥させた後、粉碎して硝酸と塩酸を用いて金属を抽出した。土壌と植物の抽出液中の各金属元素の濃度をICP-AESで分析した。また、生物濃縮係数を以下のように算出した。

$$\text{濃縮係数} = \frac{\text{植物体中の金属濃度} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)}{\text{土壌中の金属濃度} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)}$$

3. 結果と考察

(1) 蒸発散量と金属以外の除去性能

全Runを通して各人工湿地に179 Lのモデル浸出水を流入したが、対照系で8%、ヨシ植栽系で22%、イグサ植栽系で10%が蒸発散した。NH₄-Nに対してはRun1の始めには全ての系で90%以上の除去率を示したが、Run4の終了時には19-23%まで低下し、対照系で最も低くなった。DOCはRun1の始めから全ての系で90%以上の除去率を示し、全Runを通した除去率は対照系で85%であったのに対し、両植栽系88-89%であった。

(2) 人工湿地による金属類の除去

流入水と処理水中のCdとMnの濃度を図-2に示す。3種類の人工湿地は、Run1ではMn以外の金属に対し除去率が概ね90%以上と良好な処理性能を維持した。一方、Mnは全ての系の処理水中の濃度がRun1の終了時に0.4-0.8 mg/Lまで上昇し、ヨシ植栽系で最も高くなった。

Run2では、植物を植栽した系で金属の除去率が若干悪化した。処理水中のMnの濃度が非植栽系とイグサ植栽系で約1 mg/L、ヨシ植栽系で約2.3 mg/Lにまで上昇し、次いでCd、Niの濃度が0.2-0.4 mg/Lまで上昇した。一方、CrとZnに対しては、すべての人工湿地が90%以上の高い除去率を維持した。

Run3では、全ての系で処理水の金属類の濃度が上昇し、特に植栽系での上昇が高かった。CrとZnは約1 mg/Lまで、Cd、Niは1-3.5 mg/Lまで、Mnは6-7 mg/Lまで処理水中の濃度が上昇した。

Run4においても全ての系で処理水中の金属類の濃度が上昇した。ここでCrとZnは十分に除去されたが、Cd、Niは0.4-0.8 mg/Lまで上昇し、Mnは1.5-2 mg/Lまで濃度が上昇した。

(3) 土壌に除去された金属の形態

土壌から抽出したCrの濃度を図-3に示す。ヨシ植栽系は対照系に比べて上層に多くが蓄積しており、特に酸化性画分の量が多かったが、イグサ植栽系は下層に多くに蓄積されていた。また、Cr以外の元素は植生種に關

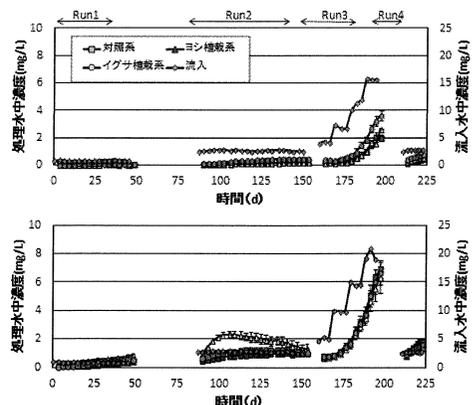


図-2 人工湿地におけるCd(上)とMn(下)の除去

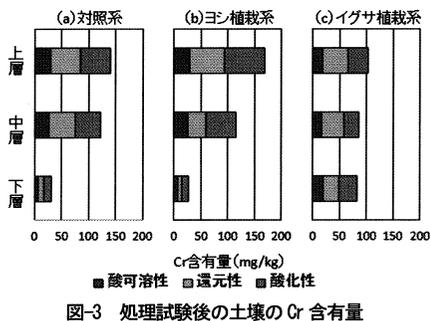


図-3 処理試験後の土壌のCr含有量

わらず土壌上層部に蓄積される量が多かった。また、Cd、Ni、Znは、酸可溶性画分として蓄積された量が最も多かった。Mnは酸性画分や還元性画分として蓄積されていた量が多かった。なお、モデル浸出水を処理していない赤玉土には、処理対象とした金属類はほとんど含まれていなかった。有機酸の添加によりpH5.7-6.1のモデル浸出水を流入したRun3において、酸可溶性画分は、pHの低下により、一旦は除去されていた状態から処理水に脱着した可能性がある。一方、酸性画分や還元性画分は、難溶性の酸化物や硫化物として存在するため、溶出しにくい状態であったと考えられる。また、Znは抽出できた量が少なかったことから、今回用いた方法では抽出できない難溶性の残渣として蓄積されていた可能性がある。

(4) 植物への移動

ヨシとイグサはRun1では良好に育成したが、Run2以降ではヨシの葉に黒色の斑点が見られ、イグサは枯死し始めるなど育成状態の悪化が見られた。ヨシとイグサの部位ごとの金属濃度を図-4に示す。ヨシの根にはCd、Ni、Zn、Crが131-1350 mg/kg-dryと高濃度に蓄積された一方、葉と茎の濃度は100 mg/kg-dry以下であった。Pbは全ての部位で処理試験に用いていない植物体は18-124 mg/kg-dryであったのに対し、178-331 mg/kg-dryとなった。イグサは上記の5元素について葉で193-1097 mg/kg-dry、根で196-696 mg/kg-dryと両方の部位で高かった。

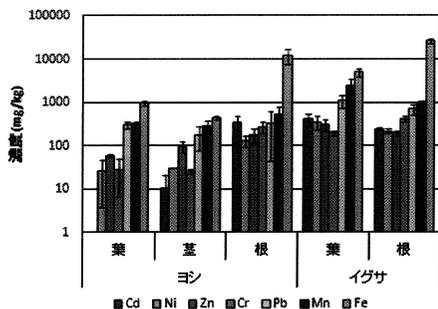


図-4 処理試験後の植物体中の金属濃度

ヨシにおけるCdの濃縮係数は葉部：0.0003、茎部：0.05、根部：1.53であり、イグサにおけるCdの濃縮係数は葉部：1.84、根部：1.1であった。また、ヨシにおけるNiの濃縮係数は葉部：0.12、茎部：0.14、根部：0.59であり、イグサでは葉部：1.72、根部：1.05であったことから、ヨシは金属の多くを根部に蓄積するのに対し、イグサは植物体全体に蓄積することが明らかとなった。このように植生種やその部位で蓄積しやすさは異なるものの、ヨシとイグサで植物体への金属の蓄積が確認されたが、植栽した人工湿地で一部の元素で処理性能が悪化したことから、植物が金属を可溶化したり、運転初期に吸収した金属を徐々に放出したものと考えられる。

4. 結論

ラボスケールの人工湿地を用いてモデル浸出水からの金属類の処理試験を行った結果、メタン発酵期のように含量が低濃度であれば、Mn以外の様々な金属類に対して、運転初期から高い除去率が得られることが示された。しかし、酸発酵期のように比較的高濃度で金属類を含む浸出水に対しては、雨季を想定した処理試験では、CdとNiで性能の悪化が見られた。また、濃度が段階的に高くなる乾季を想定した処理試験では、全ての元素で除去率が悪化した。また、対照系と比べ、ヨシを植栽することでMnが、イグサを植栽する事でCd、Niの処理性能が悪化したことから、植物は人工湿地においてNH₄-Nや有機物の除去性能を向上させるものの、除去に向きない金属があり、流入濃度や滞留時間を適正に管理する必要であることが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、環境省環境研究総合推進費補助金3K113027（代表：石垣智基）の助成を受けて実施した。

参考文献

- 岡正雄, 惣田訓, 池道彦 (2012) 埋立地浸出水処理に対するラボスケールの人工湿地の適用性の検討. 第49回環境工学研究フォーラム講演集, pp.187-189.
- M. Pueyo, G. Rauret, D. Lück, M. Yli-Halla, H. Muntau, Ph. Quevauvillere and J. F. López-Sánchez. (2001) Certification of extractable contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in a freshwater sediment following a collaboratively tested and optimized three step sequential extraction procedure. Journal of Environmental Monitoring, 3, 243-250.