

植物繊維を用いた重金属類を含む 排水の浄化事例について

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム ○岡崎 健治
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム 倉橋 稔幸
愛媛大学 共創学部 榊原 正幸

土木工事に伴い重金属類を含む排水が発生する場合があります、その処理では処分場への搬出、または、排水基準や環境基準値以下に浄化した後に放流するなど、処理コストや環境への負荷が生じることがある。そこでパンヤ科カポックの植物繊維による重金属類の吸着能力に着目し、排水の浄化を目的とした実験を行った。実験では、植物繊維を敷設した人工水路に重金属類を含む排水を循環させ、排水の重金属類の濃度と植物繊維の重金属類の含有量の経時変化を調べた。実験の結果、排水の砒素の初期濃度1.3 mg/Lは、実験開始2日後に0.41 mg/Lと3分の1程度に減少し、7日後に0.003 mg/Lと環境基準値以下となった。また、植物繊維の砒素の含有量は7日後に155 mg/kgと環境基準値以上となり、植物繊維による浄化の効果を確認した。

キーワード：重金属類、排水、植物繊維、浄化

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略では、土木インフラや資源循環関連の産業分野においても脱炭素化に向けた環境構築が必要であり、その中ではバイオ素材などを積極的に事業に活用することも推進している。あわせて、公共工事においてもエネルギーコストの低い資材等を使用した環境対応型の事業を進める必要性が求められている¹⁾。

土木事業では、切土やトンネル工事に伴う仮置き土から重金属類を含む排水が発生することがあり、排水基準値や環境基準値よりも重金属類の濃度を低下させて放流する必要がある。しかし、その過程では基準値に適合させるため、改質資材の使用や運搬処分など、環境負荷や処理費用が生じることから、それらを軽減させるための方法の構築が必要である。

そこで、排水の重金属類の濃度を低下させるため、天然素材である植物繊維に着目し、植物繊維を人工水路に敷設した条件で浄化実験を行った。

浄化実験では人工水路に、重金属類を含む鉱山廃水を試験水として流入循環させ、定期的に採水した試験水の重金属類の濃度と、植物繊維に吸着した重金属類の含有量の経時変化を調べることで、植物繊維による浄化の効果や適用性を考察したので、その結果について報告する。

2. 実験概要

(1) 植物繊維について

写真-1に本浄化実験で使用した植物繊維を示す。植物繊維は、パンヤ科カポックである。カポックは、種子毛繊維であり、インドネシアを主な産地として亜熱帯地方に広く分布する落葉樹である。15cmほどの紡錘形の実をつけ、実の内部には種子を包む綿状の繊維が入っている。この繊維をシート状に加工された製品を本浄化実験で使用した。

カポックは、石油系の原料から作られる化学繊維と比べて地球環境に優しく、古くから、布団や枕、救命道具、オイルフェンス等にも利用されている³⁾。また、半透明で中空部分が大きく軽いのが特長である。化学繊維の中空率は50%以下であるのに対し、カポックは約80%以上の高い中空率を有しており、多孔質である⁴⁾。

また、これまでNurfitriら⁵⁾は、カポックをフィルター材として、濁度の異なるベントナイト水溶液を通水させ、通水後の濁度が改善することを示している。このようにカポックは、濁水の浄化にも使用できる植物繊維である。



写真-1 浄化実験で使用した植物繊維（カポック）²⁾

(2) 人工水路による実験概要

写真-2に人工水路を示す。人工水路は、延長30 m、幅30 cmの蛇行水路である。水路の本体の材質はFRP、流路面は塩ビであり、排水勾配は0.5 %である。水路は屋外に設置し、屋根付きである。実験時には雨水の浸入防止のため厚さ0.1 mmの透明なビニルシートで周辺を囲った。

人工水路の底に幅25 cm、厚さ4 mm、乾燥重量270 g/m²の植物繊維を延長28.5 mにわたり7.1 m²のシートを敷設した。なお、敷設した植物繊維が試験水の流動で移動するのを防ぐため、植生ネット（メッシュサイズ12 mm×12 mmの麻製）に包んで固定した。

また、浄化実験では、北海道南西部の廃止した鉱山から湧出する排水を試験水として人工水路に流入させ、小型の排水ポンプで7日間循環させた。7日間の循環総量は535 m³である。実験開始から2日、4日及び7日後に、人工水路の15m地点で採水し、pH、EC及び重金属類の濃度を分析して経時変化を調べた。試験水における重金属類の濃度の分析項目は、カドミウム、六価クロム、総水銀、セレン、鉛、砒素、ふっ素、ほう素、全鉄、溶解性鉄である。なお、鉱山排水の採水時の原水は、pHが1.9、全鉄が260 mg/L、溶解性鉄が196 mg/L、硫酸イオンが2,010 mg/L、砒素が6.13 mg/Lであったが、浄化実験では原水150 Lを水道水で希釈して500 Lの試験水として使用した。

あわせて、植物繊維に吸着した重金属類の含有量を分析した。実験の2日後及び4日後に人工水路の15 m地点で植物繊維を交換し、その交換後の2回分と浄化実験終了後の植物繊維に吸着させた重金属類の含有量を分析した。また、交換後と浄化実験終了後の植物繊維の各1枚から、その四隅と中央部の1箇所より5 cm四方の大きさで切り出して分析試料とした。植物繊維における重金属類の含有量の分析項目は、カドミウム、六価クロム、総水銀、セレン、鉛、砒素、ふっ素、ほう素、鉄である。

3. 実験結果

(1) 試験水の重金属類の濃度

表-1に試験水の重金属類の濃度の分析結果を示す。

分析の結果、pHは、初期値2.5が、2日後に2.7、4日後に2.9、7日後に3.4に上昇した。電気伝導度は、初期値180 mS/mが、2日後に150 mS/m、4日後に140 mS/m、7日後に120 mS/mと、7日後に3分の2程度の値に減少した。

次に、重金属類の濃度のうち、カドミウムの濃度は、初期値0.0022 mg/Lに対して、2日後に0.0023 mg/L、4日後に0.0024 mg/L、7日後に0.0025 mg/Lと若干上昇した。

六価クロム、総水銀、セレンの濃度は、初期値が検出限界値以下であり、浄化実験後にも確認されなかった。

一方、鉛の濃度は、初期値0.030 mg/Lに対して、2日後に0.022 mg/L、4日後に0.041 mg/L、7日後に0.043 mg/Lとな



写真-2 浄化実験で使用した人工水路

(上：水路全体、中：水路内部、下：植物繊維の敷設状況)

り、初期値から土壌溶出量基準値を超過していたが、さらに増加した。ただし、鉛とカドミウムの濃度の増加は、水路の材料に用いられている塩ビ製の材料が酸性水と接触して反応することで塗装等の成分が溶解⁶⁾して溶出した可能性が考えられる。

砒素の濃度は、初期値1.3 mg/Lに対して、2日後に0.41 mg/L、4日後に0.013 mg/L、7日後に0.003 mg/Lとなった。土壌溶出量基準値の100倍以上あった初期値は、2日後に3分の1程度に減少し、7日後に土壌溶出量基準値以下となった。

表-1 試験水の重金属類の濃度の分析結果

分析値	初期値	2日目	4日目	7日目	土壌溶出量基準	一般排水基準
重金属類						
水素イオン濃度 (pH)	2.5	2.7	2.9	3.4	—	5.8以上8.6以下
電気伝導率 mS/m	180	150	140	120	—	—
カドミウム mg/L	0.0022	0.0023	0.0024	0.0025	0.003以下	0.03以下
鉛 mg/L	0.030	0.022	0.041	0.043	0.01以下	0.1以下
六価クロム mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.05以下	0.5以下
砒素 mg/L	1.3	0.41	0.013	0.003	0.01以下	0.1以下
総水銀 mg/L	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0005以下	0.005以下
セレン mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01以下	0.1以下
ふっ素 mg/L	0.27	0.26	0.27	0.28	0.8以下	8以下
ほう素 mg/L	0.20	0.20	0.21	0.21	1以下	10以下
溶解性鉄 mg/L	66	58	53	74	—	10以下
全鉄 mg/L	68	58	54	76	—	—

表-2 植物繊維の重金属類の含有量の分析結果

分析値	初期値	2日目	4日目	7日目	累積値	土壌含有量基準
重金属類						
カドミウム mg/kg	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	45以下
鉛 mg/kg	0.3	3.4	2.0	3.5	8.6	150以下
総クロム mg/kg	7.0	1.9	1.6	2.5	-1.0	250以下
砒素 mg/kg	<0.1	105	27	22	155	150以下
総水銀 mg/kg	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	15以下
セレン mg/kg	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	150以下
ふっ素 mg/kg	<20	<20	<20	<20	<20	4000以下
ほう素 mg/kg	2.3	2.5	0.8	1.1	2.0	4000以下
鉄 mg/kg	52	560	275	387	1171	—

ふっ素とほう素は、ともに初期値が土壌溶出量基準値以下であり、浄化実験後も変化は少なかった。

全鉄の濃度は、初期値68 mg/Lに対して、2日後に58mg/L、4日後に54mg/L、7日後に76mg/Lであった。

溶解性鉄の濃度は、初期値66 mg/L、2日後に58 mg/L、4日後に53 mg/L、7日後に74 mg/Lであった。

全鉄と溶解性鉄の濃度は、ほぼ同じ値であり、全鉄中の鉄分は溶解性鉄が主体であった。

(2) 植物繊維の重金属類の含有量

表-2に植物繊維の重金属類の含有量の分析結果を示す。表中の累積値は、植物繊維を交換した2回分と浄化実験終了後の分析値の和から初期値を引いた値である。

分析の結果、カドミウム、総水銀、セレン、ふっ素の含有量は、初期値が検出限界値以下であり、浄化実験後も確認されなかった。

総クロムの含有量は、初期値は7.0 mg/kgで土壌含有量基準値以下であり、2日後に1.9 mg/kg、4日後に1.6 mg/kg、7日後に2.5 mg/kgとなった。各実験日の値は初期値以下で大きな変動がないことから、もともと植物繊維自体が

含有している値と考えられる。

また、ほう素の含有量は、初期値は2.3 mg/kgで土壌含有量基準値以下であるが、2日後に2.5 mg/kg、4日後に0.8 mg/kg、7日後に1.1 mg/kgとなり、累積値2.0 mg/kgを初期値と比較すると大きな変動はない。

一方、鉛の含有量は、初期値は0.3 mg/kgで土壌含有量基準値以下であり、2日後に3.4 mg/kg、4日後に2.0 mg/kg、7日後に7.0 mg/kgとなった。累積値は8.6 mg/kgであり、植物繊維に吸着する傾向を確認した。

砒素の含有量は、初期値が検出限界値以下であったが、2日後に105 mg/kg、4日後に27 mg/kg、7日後に22 mg/kgとなった。経時的に砒素の含有量が減少した理由は、試験水中の砒素の濃度が減少することで、吸着する砒素の含有量も減少したものと考えられる。なお、7日後の累積値は155 mg/kgで土壌含有量基準値以上の含有量となり、植物繊維に吸着する傾向を確認した。

鉄の含有量は、初期値は52 mg/kgであり、2日後に560 mg/kg、4日後に275 mg/kg、7日後に387 mg/kgとなった。累積値は1,171 mg/kgであり、植物繊維に吸着する傾向を確認した。



写真-3 浄化実験後の植物繊維の状況

(3) 植物繊維による浄化の効果と適用性

試験水の重金属類の濃度及び植物繊維の重金属類の含有量を分析した結果、土壌溶出量基準値を超過する試験水の砒素の濃度を減少させ、植物繊維に土壌含有量基準値以上に砒素を吸着させたことを確認した。

試験水の砒素の濃度が減少した原因は、植物繊維が直接砒素を吸着した他に、pHが2.5から3.4に上昇したことで、鉄との化合物が生成⁷⁾して共沈したこと、懸濁体となっている鉄鉱物に吸着した可能性も考えられる。

鉄のEh-pHダイアグラム⁸⁾では、pH 2.0~3.4の範囲において、溶解性鉄が主体となっていることから、本浄化実験でも溶解性鉄が主体である結果と一致する。

写真-3に浄化実験後の植物繊維を示す。浄化実験後の植物繊維の一部に褐色化部を確認した。この褐色化部は、生成した鉄との化合物や懸濁体中の鉄鉱物と考えられる他、植物繊維の固定で使用した植生ネットが低いpHの環境下で、その繊維自体が溶解して沈着した色であることも考えられる。しかし、前述のとおり、試験水中の砒素の濃度は減少し、植物繊維の砒素の含有量は増加したことから、植物繊維は、試験水における砒素の濃度の減少に寄与することが分かった。

また、試験水に含まれる砒素の総量は、650 mg (=初期濃度1.3 mg/L×500 L)である。それに対し、植物繊維の砒素の含有量は、297 mg (=累積値155 mg/L×敷設面積7.1 m²×植物繊維の乾燥重量270 g/m²)である。両者の比較から、試験水に含まれる砒素の総量の約46%の砒素を植物繊維に吸着したと推定される。

4. まとめと今後の課題

人工水路に植物繊維を敷設し、重金属類を含む排水を循環させた浄化実験を行うことで以下の知見を得た。

1) 排水の重金属類の濃度を分析した結果、砒素の濃度が1.3 mg/Lから循環2日後で0.41 mg/Lと3分の1程度に減

少した。また、7日後に0.003 mg/Lと土壌溶出量基準値以下となった。

2) また、植物繊維の重金属類の含有量を分析した結果、鉛、砒素、鉄の含有量が増加することを確認した。鉛は初期値0.3 mg/kgから8.6 mg/kg、砒素は検出限界値以下から155 mg/kg、鉄は52 mg/kgから1,171 mg/kgとなった。

3) 試験水の砒素の濃度は減少し、植物繊維の砒素の含有量は増加したことから、植物繊維は砒素を吸着させる効果があることが分かった。

今後は、アルカリ性の排水、鉄分が少ない排水、より多種の重金属類を含む排水を用いた実験を行い、植物繊維による重金属類の浄化への適用性を明らかにしたい。

謝辞：本実験にあたり、北海道経済部、壮瞥町の関係各位にご協力いただいた。ここに、記して厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を策定しました、<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html> (2022年11月7日確認)。
- 2) Nur Adilah Ramli, The Effectiveness of Activated Surface Kapok on Removal of Heavy Metal in Wastewater, 48p., 2015.
- 3) 片野未咲子, 梅澤史人, 木山修一, 吉成伸一, 前田秀一：ハンセン溶解度パラメータと浸漬仕事を指標としたカポック繊維への機能性材料内包方法の最適化, 日本画像学会誌, 第56巻, 第5巻, pp.497-501, 2017.
- 4) 鈴木洋行：各種天然素材繊維の開発, 繊維と工業, 第60巻, 第1号, pp.3-6, 2014.
- 5) Nurfitri Abdul Gafur, Masayuki Sakakibara and Mohamad Jahja, Ability of treated kapok (Ceiba pentandra) fiber for removal of clay particle from water turbidity, 2nd Transdisciplinary Research on Environmental Problems in Southeast Asia, *Earth and Environmental Science*, 71 012017, doi : 10.1088/1755-1315/71/1/012017, 6p., 2017.
- 6) 下寄かえで, 小口文子, 鹿角孝男, 石原祐治：地下水観測井戸用塩化ビニル管からの鉛の溶出, 長野県環境保全研究所研究報告, 8, pp.7-11, 2012.
- 7) 島田允亮：自然由来重金属と環境汚染-応用地質学・地球化学的データバンク, 愛智出版, 240p., 2014.
- 8) 竹野直人：Eh-pH図アトラス熱力学データベースの相互比較, 産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, No. 419, 287p., 2005.