

植物を利用した重金属類の浸出水浄化処理技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 1

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：倉橋稔幸、岡崎健治、

大日向昭彦

【要旨】

本研究では、植物（カヤツリグサ科マツバイ：以下、マツバイ）の生育環境に応じた重金属類の吸収蓄積効果を明らかにし、効率的に吸収蓄積させる処理技術を提案するため、水槽と人工水路を使用した重金属類を含む浸出水の浄化実験を行った。屋外での水槽実験の結果、マツバイによる日当たりのセレンの吸収量が 0.0005mg/L であることが分かった。また、人工水路での浄化実験の結果、平均温度が高い場合、マツバイによるヒ素とセレンの吸収量は 10 倍まで高くなることが分かった。マツバイと併せて不織布を水路に敷設することで、蒸発散の効果によって浸出水自体を半減させることができた。さらに、不織布を用いることで、マツバイだけを用いる場合よりも蒸発散量を 1 割増まで大きくさせることができた。

キーワード：植物浄化、浸出水、重金属類、セレン、ヒ素

1. はじめに

トンネルや切土等の土木工事では、ヒ素、鉛、セレン等の重金属類を含む掘削土や岩石ズリが発生する場面がある¹⁾。その掘削土や岩石ズリが一時的に仮置きされる場合、仮置き期間中の降雨等によって環境基準値または排水基準値を超える重金属等を含む浸出水が発生することがある。

「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」²⁾では掘削ズリの対策方法の一つとして浸出水処理を示している。浸出水処理において、暴露後の掘削ズリ等からの重金属類の溶出量が基準値以下になる場合、その掘削ズリを無対策で利用してよいとされている。しかし、掘削ズリからの浸出水には環境基準値や排水基準値以上の重金属類が含まれる場合あり、周辺環境の保護や事業コストの観点から、適切な対策が求められている。

近年、マツバイ等の植物を用いた環境汚染修復技術であるファイトレメディエーションによる重金属吸収効果が注目されている^{3~9)}。マツバイは根を増やすことで繁殖し、北海道から沖縄まで全国各地の池、ため池、水田等に群生する多年草の植物である。マツバイは多種類の重金属類に対して耐性があり、多種の重金属類を同時に吸収蓄積できる。

筆者らは、平成 25～27 年に実施した「植物の浄化機能を活用した重金属類の合理的な対策に関する研究」において、排水に含まれるヒ素の総量を 75～89% 低減、また排水量自体を 40～60% 低減させる効果を確

認した。この技術は、低コスト、低エネルギー、環境調和型であるなどの長所がある。しかし、マツバイの生育において、気温や水温等の生育条件による浄化効果の違いを十分に確認できていない。また、植物の根圏の範囲しか汚染修復できない、植物の生育に時間がかかるなどの短所がある。土木事業で実用化するには、マツバイの生育条件や浄化能力を明らかにすることや、成長を促進するための効率的な栽培方法を開発する必要がある。

そこで、本研究では、土木事業におけるマツバイの浄化機能を活用した自然由来重金属処理方法を確立させるため、トンネル現場の仮置きズリからの浸出水を用いて、屋内での小型水槽によるマツバイの重金属類の吸収効果を確認するための実験を行った。また、トンネル現場に設置され浸出水が保管されている水槽にマツバイを浮かせて、マツバイの重金属類の吸収及び浸出水の重金属類の濃度を測定した。さらに、平均温度の異なる時期に、マット化したマツバイを人工水路に敷設し、そこに重金属類を含む浸出水を流入させることで、マツバイの重金属類の吸収量を測定したほか、不織布の上にマット化したマツバイを人工水路に設置して流入させた水の蒸発散量を測定した。これらの結果をもとに、マツバイを用いた重金属類の浄化設計に必要な吸収量を明らかにするとともに、浸出水自体を減少させるための方法を検討した。

2. 研究方法

2. 1 水槽での浄化実験

2. 1. 1 屋内実験

写真-1 に示す小型水槽（幅 20cm×奥行き 40cm×高さ 30cm）に、プラスチックシートを浮かせ、その上に湿潤重量 0.4kg のマツバイを設置した。そこにトンネル掘削ズリからのセレン濃度 0.093mg/L の浸出水 10 リットルをマツバイが浸るように入れた。実験開始時、1、3、5、10、14 日目（実験終了時）に小型水槽から採水し、pH、EC 及び水深を測定した。また、実験の開始時と終了時にマツバイ 10g 程度を採取し、セレン濃度を分析した。同時にマツバイを使用しない浸出水だけのブランクケース（写真-1 左）からも採水して分析した。

2. 1. 2 屋外実験

写真-2 に示す屋根付きで開放系水槽（幅 1.8m×長さ 7.0m）に、発泡スチロールを浮かしたプラスチック容器に湿潤重量 33.6kg のマツバイを設置した。水槽には盛土からのセレン濃度 0.090mg/L の浸出水 17.5 m³ が保管されていた。実験開始から概ね 1 週間毎に水槽から採水し、pH、電気伝導度及び濁度を測定した。なお、本現場でのセレン濃度の低下目標値は環境基準値の 0.01mg/L である。

セレンの初期濃度と目標値の濃度の差を、実験開始から目標値を下回るまでに要した日数で割り、マツバイが持つセレン濃度の日当たり吸収量を算出した。さらに、本研究でのマツバイによる浸出水の浄化費用を通常の処理費用と比較することで、費用の削減割合を分析した。

2. 1. 3 分析方法

浸出水のセレン濃度が濾過後に 1%濃度となるよう、硝酸を添加保管後、ICP-MS 法で鉛、ヒ素及びセレンの濃度を分析した。また、マツバイに含まれるセレンの前処理として、超純水で十分に洗浄し、乾燥器で 40 °C で 2 日間乾燥させた後に微粉末にした。次に、粉末試料へ 30%過酸化水素、61%硝酸、38%フッ化水素酸を添加して 98°C で蒸発乾固させた。その後、61%硝酸を添加し、再び 98°C で蒸発乾固後、30%硝酸を添加して溶液とした。ICP-MS 法でその溶液の鉛、ヒ素及びセレンの濃度を分析した。

2. 2 人工水路での浄化実験

2. 2. 1 平均気温別のマツバイの重金属類吸収量

前節までの水槽に滞留する浸出水に対し、常時流れ出る浸出水に対するマツバイの重金属類の吸収量を把握するため、人工水路を用いた実験を行った。

写真-3 に示す屋根付きで開放系の塩ビ製の箱型の水

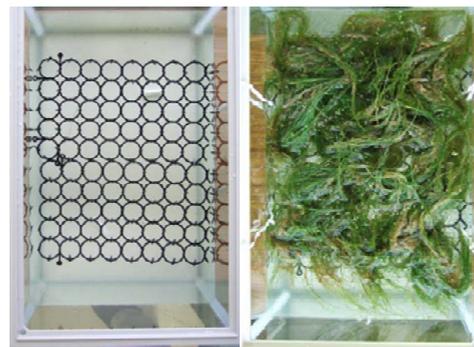


写真-1 屋内の水槽での実験状況
左：ブランク水槽 右：マツバイ敷設水槽

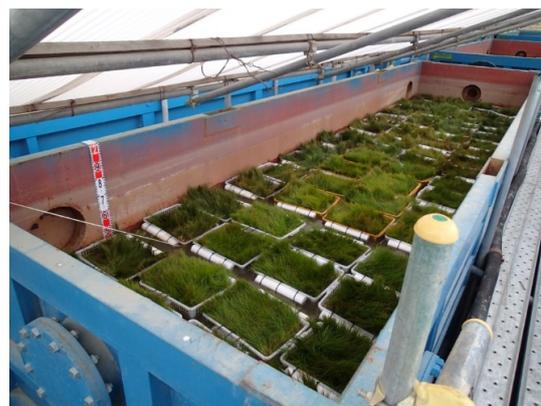


写真-2 屋外の水槽での実験状況



写真-3 屋根付きの箱型人工蛇行水路での実験状況

槽を寒地土木研究所構内に設置した。水槽内に仕切り板を交互に区切るように幅 30cm 間隔で設置して長さ

30m の蛇行水路とした。そこにマット状の湿潤重量 36kg のマツバイを敷設した。そこに、冬季（平均気温 -0.6°C 、実験期間は 12 月上旬～4 月上旬の 129 日間）と夏季（平均気温 24.1°C 、実験時期は 8 月上旬～8 月下旬の 17 日間）にそれぞれ 500 リットルの浸出水をポンプによって毎分平均 4 リットルで循環させた。マツバイと浸出水を定期的に採取して重金属類の濃度の変化を分析した。

2. 2. 2 現場での浄化実験

写真-4 に示す塩ビ製の人工水路（幅 30cm×延長 20m）に、マット化した湿潤重量 23.2kg のマツバイを敷設した。そこに、夏季（平均気温 20.5°C 、平均水温 18.7°C 、実験時期は 8 月上旬～10 月下旬の 81 日間、総流入量 36,590 リットル）と冬季（平均気温 4.2°C 、平均水温 9.7°C 、実験期間は 10 月下旬～2 月上旬の 107 日間、総流入量 41,247 リットル）にそれぞれ浸出水を毎分平均 0.3 リットルで流入させた。なお、マツバイは冬季の実験では新しいものに交換した。各時期の実験開始時と終了時にマツバイを採取して重金属類を分析した。なお、気温の低い冬季にマツバイのヒ素の吸収量が夏季より低いことが予想される。そのため、人工水路をビニールで覆うことで水路内の気温を低下させない状態で実験を行った。

2. 2. 3 蒸発散量の促進効果確認実験

写真-5 に示す仮設排水路を模擬した実験水路を寒地土木研究所構内に 50m 設置し、蒸発散量の促進効果を確認するための実験を行った。塩ビ製で直径 50cm の排水管を半割にしたものを実験水路として使用した。そこに、水路のみ、水路+マツバイ及び水路+マツバイ+不織布の 3 ケースについて、1 日 1 回あたり 500 リットルの水道水を、各ケースで 3 回流入させた。流入後に回収した水量の平均値から蒸発散量を求めた。なお、不織布は一般的に土木事業で使用されている厚

さ 10mm 程度の吸い出し防止材を用いた。3 ケースの実験時の平均気温は 31.4°C 、 20.6°C 及び 10.3°C であり、実験期間中に降雨はなかった。

2. 2. 4 分析方法

人工水路実験での浸出水は水槽での浄化実験と同様に ICP-MS 法によってヒ素とセレンの濃度を分析した。また、マツバイの前処理も水槽での浄化実験と同様な方法で行い、ICP-MS 法によって作成した分析溶液のヒ素とセレンの濃度を分析した。

3. 研究結果

3. 1 水槽での浄化実験結果

3. 1. 1 屋内実験の結果

図-1 に屋内実験の結果^{10,11}を示す。マツバイを入れた水槽の浸出水のセレン濃度は 14 日後に 0.093mg/l から 0.008mg/l と約 1/10 以下となった。一方、マツバイを入れなかった水槽のセレン濃度は 0.112mg/l となり 1.2 倍になった。これは、水槽の初期水量 10 リットルが両水槽で 7.5～7.6 リットルまで減ったことで、濃度

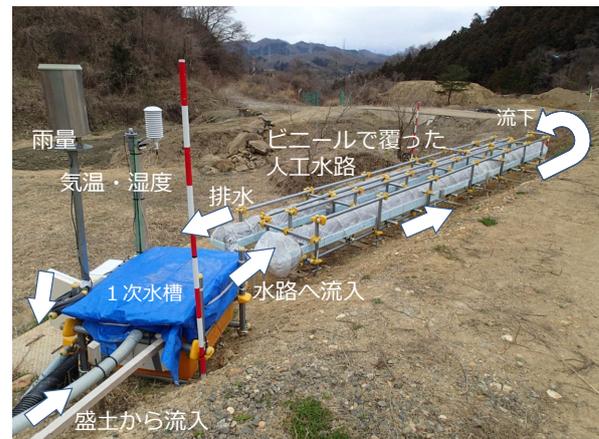


写真-4 屋外の人工水路での実験状況



写真-5 仮設排水路を使用した蒸発散量の促進効果を確認するための実験状況
左：水路のみ（blank） 中：水路とマツバイ 右：水路とマツバイと不織布

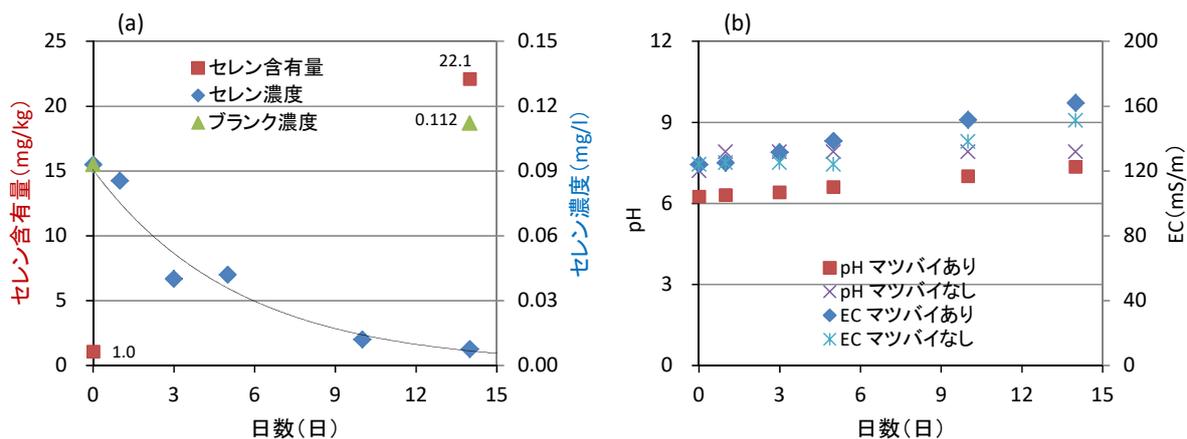


図-1 屋内での水槽実験の結果

(a) マツバイのセレン含有量・浸出水のセレン濃度・ブランク水槽のセレン濃度、(b) 浸出水の pH・EC

が高くなったと考えられた。同時に測定した pH はマツバイを入れた水槽で 6.3 から 7.4、マツバイを入れなかった水槽で 7.2 から 7.9 に変化した。EC はマツバイを入れた水槽で 124mS/m から 162mS/m、マツバイを入れなかった水槽で 124mS/m から 151mS/m に変化した。マツバイのセレンの含有量は 14 日後に初期値 1.00mg/kg (葉 : 0.40mg/kg + 根 : 0.60mg/kg) から 22.1mg/kg (葉 : 10.70mg/kg + 根 : 11.40mg/kg) と増加し、マツバイがセレンを吸収することを確認した。

3. 1. 2 屋外実験の結果

表-1、図-2 に屋外実験の結果、浸出水のセレン濃度の変化を示す。浸出水のセレンの初期濃度 0.090mg/L は 21 週目の 10 月 5 日に 0.007mg/L となり、本現場で設定したセレン濃度の低下目標値の 0.01mg/L 以下になった。また、鉛の初期濃度 0.004mg/L は低下目標値の環境基準値 0.01mg/L 以下であるが、1 週後の 5 月 18 日に 0.001mg/L 未満となった。ヒ素の初期濃度 0.003mg/L は同様に低下目標値の環境基準値 0.01mg/L 以下であるが、3 週後の 6 月 1 日に 0.001mg/L 未満となった。pH は 7.2 から 7.4、EC は 601mS/m から 665mS/m に変化した。その他、濁度は初期に 170 であったが、1 週後の 5 月 18 日に 23 まで低下した。一方、マツバイのセレン含有量は初期値 0.1mg/kg から 8.9mg/kg に増加したことを確認した。このように現場での水槽を用いた実験において、浸出水のセレン濃度をマツバイによって低下させることができた。

次に、セレンの初期濃度と低下目標値 0.01mg/L との濃度の差を、実験開始から目標値を下回るまでに要した日数で割り、マツバイが持つセレン濃度の吸収量を算出した。まず、初期濃度 0.090mg/L から低下目標値

0.01mg/L を引き、濃度差は 0.080mg/L となった。この濃度差を実験開始から目標値を下回るまでに要した日数 147 日 (=21 週×7 日) で割ると、マツバイが持つセレン濃度の日当たり吸収量は 0.080mg/L / 147 日 = 0.0005 mg/L となった。このように水槽での屋外実験によって、マツバイによる日当たりのセレンの吸収量が明らかとなった。ただし、この値は、浸出水 17.5 m³ に対し、湿潤重量 33.6kg のマツバイを設置する条件で算出した値である。

3. 1. 3 マツバイによる処理費用の縮減割合

前項の屋外での水槽実験結果を基に、以下の条件を仮定することで、マツバイによる浸出水の浄化費用を算出し、通常の処理費用と比較して縮減割合を求めた。

1) 現場条件等

- ・重金属類を含む浸出水が 17.5 m³ 発生
- ・浸出水の排水時は環境基準値 0.01mg/L で管理
- ・水槽は多量の降雨に備えて複数を配置
- ・浸出水の通常の処理単価 : ¥40,000/m³

2) 費用とその比較

① 通常の処理費用

$$= ¥40,000/m^3 \times 17.5 m^3 = ¥700,000$$

② マツバイによる浄化費用

$$\begin{aligned} \text{マツバイの費用} &= ¥12,000/m^2 \times 8.4 m^2 \\ &= ¥108,000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{分析費用} &= ¥12,000/\text{式} \times 17 \text{ 回} \\ &= ¥204,000 \quad \text{計 } ¥312,000 \end{aligned}$$

3) 費用の差額と縮減割合

③ 差額 = 通常の処理費用 - マツバイによる浄化費用

$$= ¥700,000 - ¥312,000 = ¥388,000$$

④ 縮減割合 = マツバイによる浄化費用 / 通常の処理費用

表-1 屋外での水槽実験の結果

測定日	分析項目		鉛 (mg/L)	ヒ素 (mg/L)	セレン (mg/L)	pH	電気伝導率 (mS/m)	濁度 (度)
	初期値							
1	5月11日	初期値	0.004	0.003	0.090	7.2	601	170
2	5月18日	1W	0.001未満	0.002	0.084	6.8	604	23
3	5月25日	2W	0.001未満	0.002	0.081	6.6	608	11
4	6月1日	3W	0.001未満	0.001未満	0.074	6.8	612	7
5	6月7日	4W	0.001未満	0.001未満	0.074	6.9	617	5
6	6月15日	5W	0.001未満	0.001未満	0.070	6.9	622	7
7	6月29日	7W	0.001未満	0.001未満	0.062	6.9	630	9
8	7月13日	9W	0.001未満	0.001未満	0.051	7.0	636	4
9	7月20日	10W	0.001未満	0.001未満	0.046	7.1	640	10
10	7月27日	11W	0.001未満	0.001未満	0.042	7.2	642	11
11	8月3日	12W	0.001未満	0.001未満	0.036	7.1	644	6
12	8月10日	13W	0.001未満	0.001未満	0.032	7.2	647	11
13	8月24日	15W	0.001未満	0.001未満	0.024	7.0	654	12
14	9月7日	17W	0.001未満	0.001未満	0.016	7.1	658	7
15	9月21日	19W	0.001未満	0.001未満	0.011	7.2	663	8
16	10月5日	21W	0.001未満	0.001未満	0.007	7.4	665	6
17	10月26日	24W	0.001未満	0.001未満	0.004	7.5	681	10

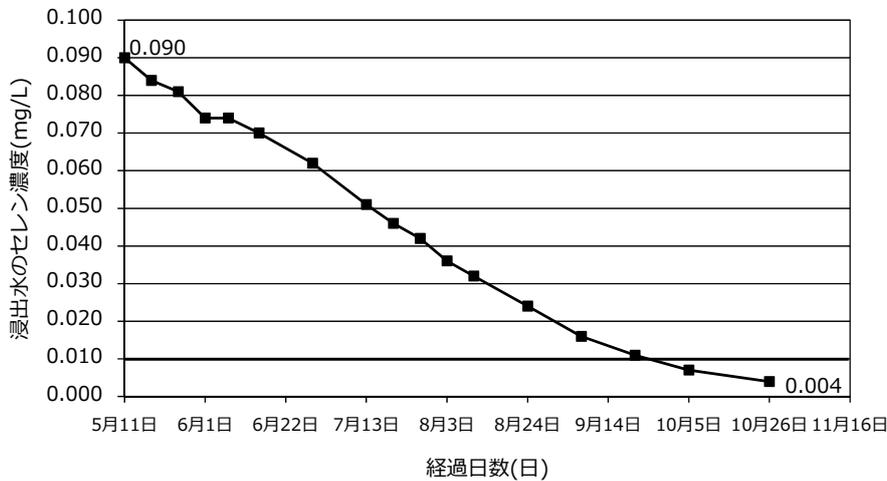


図-2 屋外での水槽実験における浸出水のセレン濃度の変化

表-2 屋外での箱形人工水路実験による平均気温別のマツバイの重金属類吸収量

時期	採取日	平均気温 (°C)	実験期間 (日)	ヒ素			セレン		
				分析値 (mg/kg)	分析値の差 (mg/kg)	日当たり低下量 (差÷期間)	分析値 (mg/kg)	分析値の差 (mg/kg)	日当たり低下量 (差÷期間)
夏季	8月1日 開始	24.1	17	0.70	1.30	0.076	0.10	1.20	0.071
	8月18日 終了			2.00			1.30		
冬季	12月4日 開始	-0.6	129	0.30	0.30	0.002	0.20	0.70	0.005
	4月12日 終了			0.60			0.90		

$$=¥312,000/¥700,000 = 0.446$$

以上の結果から、マツバイによる現場での浄化実験を行い、通常の処理費用の約45%で浸出水を処理することが可能であったと考えられる。

3. 2 人工水路での浄化実験結果

3. 2. 1 平均気温別のマツバイの重金属類吸収量

表-2に箱形の人工水路で実施した平均気温別のマツバイの重金属類吸収量の実験結果を示す。平均気温の

高い夏季の17日間において、マツバイのヒ素の吸収量は1.30mg/kg、日当たり低下量は0.076mg/kgであった。セレンの吸収量は1.20mg/kg、日当たり低下量は0.071mg/kgであった。

一方、平均気温の低い冬季の129日間において、マツバイのヒ素の吸収量は0.30mg/kg、日当たり低下量は0.002mg/kgであった。セレンの吸収量は0.70mg/kg、日当たり低下量は0.005mg/kgであった。

以上から、冬季の夏季に対する日当たりマツバイのヒ素の吸収量の割合は3% (=0.002/0.076 mg/kg)、セレンでは7% (=0.005/0.071mg/kg) となった。平均気温が低い条件では、マツバイのヒ素とセレンの吸収量は著しく低くなることが分かった。

ここで、文献 12)で示された鉱山廃水の流入する池での浄化実験の結果であるマツバイのヒ素の吸収量との比較を試みた。実験は日本の南西地域の廃止鉱山で8月～2月の7か月間実施されたが、実験期間中の平均気温等は不明である。表-3 に実験開始から137日目までに分析されたマツバイの部位(葉と根)ごとの重金属類の含有量の最大値と、その合計を実験日数で割った値を日当たり吸収量として示す¹²⁾。マツバイのヒ素の含有量は399mg/kg、日当たり吸収量は2.91mg/kgであった。本実験での夏季のヒ素の含有量は1.30 mg/kg、日当たり吸収量は0.076 mg/kgであり、マツバイのヒ素の吸収能力に余裕のあることが分かった。

3. 2. 2 現場での人工水路実験の結果

表-4に冬季に人工水路内の温度を低下させないよう水路をビニールシートで覆った状態、夏季に覆わない状態で実験した結果を示す。マツバイのヒ素含有量は夏季で3.40mg/kg (=終了時3.60-開始時0.20mg/kg)、冬季で2.30mg/kg (=終了時2.50-開始時0.20mg/kg)であった。この結果を基に、以下のとおり、マツバイのヒ素の吸収量を夏季と冬季で求めた。

1) 夏季の実験条件と日当たりのヒ素蓄積量

- ・実験日数=81日
 - ・マツバイのヒ素含有量=3.40mg/kg
- よって、日当たりマツバイのヒ素の吸収量
 $=3.40\text{mg/kg} \div 81 \text{日} = 0.042\text{mg/kg}$

2) 冬季の実験条件と日当たりのヒ素の吸収量

- ・実験日数=107日
 - ・マツバイのヒ素含有量=2.30mg/kg
- よって、日当たりマツバイのヒ素の吸収量
 $=2.30\text{mg/kg} \div 107 \text{日} = 0.021\text{mg/kg}$

冬季の夏季に対する日当たりマツバイのヒ素の吸収量の割合を求めると50% (=0.021/0.042mg/kg)であった。前節の実験結果における夏季に対する冬季のヒ素の吸収量の割合3%よりも著しく大きい値となった。また、本実験時の冬季平均気温は4.2℃で日当たりマツバイのヒ素の吸収量が0.021mg/kg、前節での実験時の冬季平均気温-0.6℃で日当たりマツバイのヒ素の吸収量が0.002mg/kgであり、平均気温の違いによって、ヒ素の吸収量が10倍 (=0.002/0.021mg/kg)に高められることが分かった。また、マツバイのヒ素の吸収量

表-3 鉱山廃水でのマツバイによる浄化実験結果¹²⁾

重金属類	マツバイの含有量			日当たり吸収量
	葉	根	計	
銅 mg/kg	123	92	215	1.57
亜鉛 mg/kg	1,120	1,260	2,380	17.37
ヒ素 mg/kg	198	201	399	2.91
鉛 mg/kg	682	719	1,401	10.23

表-4 現場での人工水路実験の結果によるマツバイの重金属類吸収量

試験項目	単位	夏季		冬季	
		開始	終了	開始	終了
マンガン	mg/kg	35.0	1,000	19.0	15.0
鉄	mg/kg	384	380	611	624
亜鉛	mg/kg	580	200	73.0	111
ヒ素	mg/kg	0.20	3.60	0.20	2.50
モリブデン	mg/kg	2.00	39.0	4.00	197
ストロンチウム	mg/kg	24.0	34.0	25.0	23.0
リン	mg/kg	2,890	3,869	3,290	2,670
マグネシウム	mg/kg	1,210	1,020	725	535
ナトリウム	mg/kg	747	1,890	666	751
カルシウム	mg/kg	4,230	8,690	4,760	4,940
カリウム	mg/kg	10,800	9,380	6,210	3,230

は低温下では小さいことが分かった。

3. 2. 3 蒸発散量の促進効果確認実験の結果

実験の結果、流入させた500リットルに対し、水路のみのケースで回収した水量の平均値は444リットル(89%)で蒸発量は56リットルであった。水路+マツバイのケースで回収した水量の平均値は290リットル(58%)で蒸発散量は210リットルであった。また、水路+マツバイ+不織布のケースで回収した水量の平均値は260リットル(52%)で蒸発散量は240リットルであった。このように水路へ、マツバイと不織布を組み合わせることで、浸出水自体を半減できた。また、人工水路にてマツバイと不織布を組み合わせることで、水路のみのケースより4.3倍(=240/56リットル)、水路+マツバイのケースより1.1倍(=240/210リットル)の蒸発散の効果が得られることが分かった。この方法によって、処理対象とする水量自体を減少でき、その費用も不要となると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見は次のとおりである。

- 1) 屋内での水槽による浄化実験の結果、マツバイがセレンを吸収することを確認した。また、屋外での水槽での実験の結果、マツバイによる日当たり

のセレンの吸収量が 0.0005mg/L であることが分かった。併せて、ある条件下での試算結果であるが、本手法により、通常の処理費用の 45% で浸出水を浄化できることが分かった。

- 2) 人工水路での浄化実験の結果、平均温度が高い場合、マツバイによるヒ素の吸収量は条件によって 10 倍まで高くなることが分かった。そのため、水路自体をビニールシート等で養生し、水路内の平均気温を高めることで、よりヒ素の吸収量を大きくさせることが可能である。
- 3) マツバイと併せて不織布を水路に敷設することで、蒸発散の効果によって浸出水自体を半減させることができた。さらに、不織布を用いることで、マツバイだけを用いる場合よりも蒸発散量を 1 割増大させることができた。

今後は、浸出水に泥を含む場合、植物の茎や葉に泥が付着して十分な効果が発揮できない場合があることから、植物繊維を用いた吸着性能を明らかにするとともに効率的な濁水等の処理方法について研究を進める。

謝辞

本研究を進めるにあたり、現地調査等にご協力いただいた国土交通省北海道開発局、同関東地方整備局、及び仙台市交通局の各位に、ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 井上豊基・田本修一・伊東佳彦：北海道内における自然由来重金属類の対策事例の現状と課題について，平成 23 年度北海道開発技術研究発表会，2012。
<http://thesis.ceri.go.jp/db/giken/h23giken/JiyuRonbun/GT-25.pdf>.
- 2) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル検討委員会：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版），pp.72-84，2010.
- 3) 榊原正幸・蔵本 翔・岡崎健治・伊東佳彦・大日向昭彦・竹花大介：セレンに富む残土排水のカヤツリグサ科マツバイによるファイトレメディエーション，第 18 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，pp.225-228，2012.
- 4) 榊原正幸・原田亜紀・佐野 栄・堀 利栄・井上雅裕：マツバイを用いたファイトレメディエーションによる重金属に汚染された水環境の浄化，第 12 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.545-548，

2006.

- 5) 岡崎健治・宍戸政仁・倉橋稔幸・榊原正幸：植物による重金属等を含む排水の現場浄化実験，第 51 回環境工学研究フォーラム講演集，土木学会，pp.7-8，2014.
- 6) Ha, N. T. H., Sakakibara, M., Sano, S., Hori, R. S. and Sera, K.: The potential of *Eleocharis acicularis* for phytoremediation: case study at an abandoned mine site, *CLEAN - Soil, Air, Water*, Vol.37, pp.203-208, 2009.
- 7) Ha, N. T. H., Sakakibara, M. and Sano, S.: Phytoremediation of Sb, As, Cu and Zn from Contaminated Water by the Aquatic Macrophyte *Eleocharis acicularis*, *CLEAN - Soil, Air, Water*, Vol.37, pp.720-725, 2009.
- 8) Sakakibara, M., Harada, A., Sano, S. and Hori, R. S.: Heavy Metal Tolerance and Accumulation in *Eleocharis acicularis*, a Heavy Metal Hyper Accumulating Aquatic Plant Species, *Geo-pollution Science, Medical Geology and Urban Geology*, Vol.5, pp.1-8, 2009.
- 9) 榊原正幸・彦田真友子・佐野 栄・世良耕一郎：重金属汚染された河川のカヤツリグサ科マツバイによるファイトレメディエーション，第 17 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，pp.225-228，2011.
- 10) 岡崎健治・倉橋稔幸・榊原正幸：植物によるセレンを含む浸出水の屋内外での水槽浄化実験，第 23 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，pp.318-321，2017.
- 11) 岡崎健治・山崎秀策・倉橋稔幸・榊原正幸：重金属を吸収する植物による排水の浄化実験，土木学会，第 53 回環境工学研究フォーラム，土木学会論文集 G（環境），Vol.72，No.7，pp.179-185，2016.
- 12) Nurfitri, AG Sakakibara, M. and Sano, S.: Phytoremediation of Heavy Metal-Polluted Mine Drainage by *Eleocharis acicularis*, *Environmental Science: An Indian Journal*, Vol.13, p.11, 2017.

A STUDY ON PHYTOREMEDIATION FOR LEACHATE OF HEAVY METALS

Research Period : FY2015-2019

Research Team : Cold-Region Construction
Engineering Research Group
(Geological Hazards)

Author : KURAHASHI Toshiyuki
OKAZAKI Kenji
OBINATA Akihiko

Abstract : This paper reports the results of heavy metals purification experiment by plants named *Eleocharis acicularis* for the leachate from the tunnel rock muck. As the results of water storage tank experiment, it was found that the daily absorption of selenium by *Eleocharis acicularis* was 0.0005 mg/L. Its cost was 45% of the normal cost. Absorption of arsenic and selenium by *Eleocharis acicularis* in summer is ten times higher than that in winter. And, the non-woven fabric in the artificial channel could help to halve leachate by the effect of evapotranspiration.

Key words : phytoremediation, leachate, heavy metals, selenium, arsenic