

8.6 自然的原因による重金属汚染の対策技術の開発(2)

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平18～平22

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：伊東佳彦、阿南修司、岡崎健治、
田本修一

【要旨】

建設工事において遭遇する自然的原因による重金属に対しては、平成15年9月に刊行された「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)」¹⁾に準拠して評価・対策が実施されている。しかし、同マニュアルは平成15年2月に施行された土壤汚染対策法に準拠しており、同法は本来、自然的原因による岩石ズリ中の有害重金属は対象外としており、より合理的な評価・対策法が求められている。特に北海道では近年、建設工事において有害重金属や酸性水の流出が発生する事例が確認されており、施工上あるいは事業費上の課題となっている。

本研究ではこのようなことを背景に、合理的な重金属の評価・対策法の技術開発を目的として、汚染リスクの高い地質環境の調査法の提案、汚染リスクの簡易判定手法の開発、および自然的原因による重金属を含む岩石ズリの対策・処理方法の構築などの調査研究を、平成18年度から22年の5カ年にわたり行うものである。平成20年度は、汚染リスクの簡易判定手法開発の一環として、携帯型蛍光X線分析装置を使った試料採取方法の検討に着手した。また対策・処理方法の提案の一環として、積雪寒冷地における植物浄化工法に関する植生調査、および選定植物による重金属の吸収性能に関わる実験結果についてとりまとめた。ここでは、植物浄化工法に関する検討結果について報告する。

キーワード：掘削ずり、重金属、ファイトレメディエーション

1. はじめに

北海道では、海成堆積岩や熱水変質岩等の分布地域を中心として、建設工事の際に有害重金属等の流出が懸念される事例が報告されており、事業上の課題となっている。建設工事において遭遇する重金属は、平成15年9月に刊行された「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)」に準拠して評価・対策が実施されている。しかし、同マニュアルは平成15年5月に施行された土壤汚染対策法に準拠しており、同法は本来、自然的原因による岩石ズリ中の有害重金属は対象外としているため、より合理的な評価・対策法が求められている。

環境基準を超過して溶出する有害重金属等の処理方法としては、遮水や遮断型の埋設処分により周辺拡散を防止する方法や、発生ズリ自体を浄化する方法がある。現在、北海道の道路建設事業では前者が一般的であり、浄化はコストおよび事業工程の観点から実用化に課題を有している。しかし、長期的な環境に対する安全性を考慮すると、検討すべき方策の一つであ

る。本検討では、その方策の一つである積雪寒冷地における植物による浄化工法(ファイトレメディエーション)の構築を目的とし、北海道内に自生する植物の中から重金属を吸収する能力のある種を見出すための植生調査結果、及びその種の栽培試験による検討結果について報告するものである。

2. ファイトレメディエーションの特徴

ファイトレメディエーションは、水分や養分を吸収・分解する植物の性質・能力を利用して、汚染された土壌や水などの環境を浄化する技術である(図-1²⁾)。この技術は、他の環境浄化技術と比較すると、低コスト、エネルギー消費がほとんどない、環境調和型の技術、という特徴を有している³⁾。

ファイトレメディエーションと、バイオレメディエーションなど他の浄化手法との違いを表-1⁴⁾に示す。ファイトレメディエーションは、コスト的に優位であるが、環境要因の影響が大きく、即効性が低いなどの適用上の問題を抱えている。すなわち、植物の生育が

8.6 自然的原因による重金属汚染の
対策技術の開発(2)

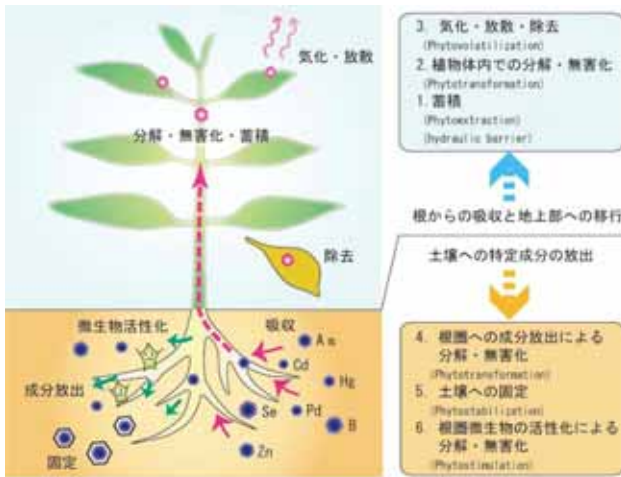


図 - 1 ファイトレメディエーションの概念図²⁾

表 - 1 ファイトレメディエーションと他の環境
修復手法の違い³⁾

	ファイト リメディエーション	微生物によるバイオ リメディエーション	物理・化学的手法
コスト(初期コスト)	低い	やや高い	高い
適用可能な 濃度範囲	やや狭い	やや広い	広い
持続性	長い	やや短い	手法により異なる
即効性	低い	やや高い	高い
環境要因の影響	大きい	やや大きい	小さい
他生物相 との相互影響	少ない	やや多い	他からの影響は少ないが、 影響を与える可能性が高い
物質の回収と 再利用	可能	場合により可能	可能
組換え体の 導入・管理	容易	困難	-

気候に左右されること、建設工事期間中に浄化が完了しないこともあり、確実性の観点から重金属を含む建設発生土の浄化をファイトレメディエーション単独で行うには課題がある。しかし、覆土の植生としての補助的な利用、発生土が少量な場合における適用が有効と考えられ、全体として処理にかかるコストの低減、安全性の向上へ寄与できるものとする。

ファイトレメディエーションの研究が盛んな欧米では、重金属高集積植物についていくつかの報告がある。その植物と対象金属を表 - 2⁵⁾に示す。国内では実用化へ向けた研究や、新たな植物を現地で抽出するスクリーニング調査が多い。実際には確認されていないものの、優れた吸収集積能力を有する植物種が存在する可能性があり、北海道においても鉱山や重金属の高濃度地域に自生する植物を調査することにより、浄化の可能性を有する植物が存在すると思われるが、このような基礎的な研究は少ない現状である。

参考文献⁶⁾によれば、ファイトレメディエーションに係る特許は1998年より出願されている(表 -

3) 2000年以降から出願件数が増加傾向にある。特許の内容は、特定の植栽方法や特定の種類の植物を利用、吸収促進剤の利用など効果的にファイトレメディエーションを進める技術が多い。

表 - 2 重金属高集積植物⁵⁾

植物名	学名	対象金属
カラシナ	<i>Brassica juncea</i>	鉛、カドミウム
ヒマワリ	<i>Helianthus annuus</i>	鉛、カドミウム
ゲンバユスズナ	<i>Thlaspi caerulescens</i>	カドミウム、亜鉛
ミソバ	<i>Persicaria thunbergii</i>	鉛、カドミウム
ヘビネコザ	<i>Athyrium yokoscense</i>	カドミウム
モエジマシダ	<i>Pteris vittata</i>	砒素
コシアブラ	<i>Eleutherococcus sciadophylloide</i>	マンガン
タカネゲンバイ	<i>Thlaspi japonicum</i>	ニッケル

表 - 3 特許出願数の推移

出願年	件数
1997	0
1998	1
1999	1
2000	6
2001	1
2002	14
2003	8

3. 検討方法

検討は、積雪寒冷地において重金属に対する耐性および重金属の高集積能力を有する植物を探す植生調査と調査により得られた植物の栽培実験により行った。

3.1 植生調査

植生調査は、北海道内で多数問題となっているヒ素に着目し、重金属高集積植物の実用性を判断する目安値として1,000mg/kg⁷⁾以上のヒ素を集積する植物を見つけることを目的に実施した。調査対象地は、熱水変質によってもたらされた自然由来の砒素等の重金属が多く地山に含まれている可能性のある北海道内の廃止鉱山とその近傍とした。調査地を図 - 2に示す。



図 - 2 調査位置図

調査内容は、廃止鉱山周辺における現地踏査、植生・土壌を採取し、植物内含有量分析及び土壌含有量・溶出量試験を実施した。

植物内含有量分析は草本類を対象とし、植物中の重金属を測定するため ICP-MS 分析(誘導結合プラズマ質量分析)を行った。土壌含有量試験は、土壌中の重金属含有量を測定するために検量線法による蛍光 X 線分析を行った。土壌溶出量試験は、地下水中に溶け出す重金属濃度を把握する目的で平成 15 年 3 月 6 日環境省告示第 18 号付表に準じた方法で試験を実施した。溶出液の分析項目は、pH、ヒ素である。

3.2 栽培試験

植生調査により得られた植物が、植物浄化工法用の植物としての適用性を検討するため、室内栽培試験を実施した。栽培に用いる土壌は、2種類のヒ素含有量の多い人為的汚染土壌(A土壌、B土壌)とし、化学性状を表-4に示す。この2種類の土をそれぞれ3号鉢に入れ、調査により得られた植物の苗を導入して栽培した。栽培は1植物1土壌あたり3ポットとした。栽培期間は約3ヶ月間行った。栽培期間中には適宜、水と液体肥料を与えた。植物の浄化効果を確認するため、栽培前後における植物中の重金属濃度、土壌中の重金属含有量および溶出量を分析した。分析方法は、植生調査で行った分析方法と同様である。

表-4 人為的汚染土壌の化学性状

土 壌	ヒ素含有量 mg/kg	ヒ素溶出量 mg/	pH
A土壌	322	0.048	7.5
B土壌	771	1.77	7.5

4. 検討結果

4.1 植生調査結果

現地踏査で確認した種は178種である。調査地域の植生の多くは、北海道西南部の丘陵地から山地に普通に分布する種で構成されており、特異な群落あるいは種は観察されなかった。

土壌含有量・溶出量試験の結果、調査地の岩石土壌を色や産状から区分し、それぞれのヒ素含有量、溶出量を表-5に示す。含有量については鉱床近傍ほど高い傾向が見られ、最大値は600mg/kg以上と多い。しかし、溶出量は一部を除いて環境基準値0.01mg/l以下を示し、含有量が多い割には小さい値となっている。

次に、植物分析の結果を表-6に示す。77試料の植物を採取し、ヒ素含有量の分析を行った結果、0.057

~194.9mg/kgを示した。このうち、ヒ素濃度の高い鉱床近傍で採取したヒメノガリヤスおよびヒメスイバでそれぞれ80.99mg/kg、194.9mg/kgと高い値を示すことが明らかとなった。ヒメスイバおよびヒメノガリヤスのヒ素含有量と、その生育箇所における土壌中のヒ素含有量を表-7に示す。ヒメスイバが30%、ヒメノガリヤスが18%であり、いずれも土壌中のヒ素をすべて吸収していない。両植物ともにヒ素吸収メカニズムが不明であるが、水溶性のヒ素を吸収すると考えると調査地での砒素溶出量が0.01mg/l以下と低く、高濃度に溶出する地域ではさらに吸収する可能性が考えられる。

表-5 土壌区分毎のヒ素含有量・溶出量

土壌区分	含有量	溶出量	
	ヒ素(mg/kg)	ヒ素(mg/l)	pH
褐鉄鉱床	659.3	0.001	2.1
硫化鉄鉱床	278.6	0.002	3.8
灰色土	210.6	0.001	3.9
白色土	149.4	<0.001	2.6
ガレ場(崩積土)	145	0.003	3.1
植生(褐色土壌)	75.3	0.005	4.9
赤色土	71	0.002	6
盛土	14.1	<0.001	4.8

表-6 植物中のヒ素濃度の頻度

ヒ素濃度 範囲 (mg/kg)	頻 度 (試料)	備 考
0~10	75	75試料の平均値は0.986mg/kg
10~100	1	試料A-83(植物名ヒメノガリヤス)で80.99mg/kg
100~200	1	試料A-80(植物名ヒメスイバ)で194.9mg/kg

表-7 ヒメスイバ及びヒメノガリヤスの試験結果

	土壌中の ヒ素濃度 (mg/kg)	植物中の ヒ素濃度 (mg/kg)	植物中ヒ素 土壌中砒素
ヒメスイバ	659.3	194.9	30%
ヒメノガリヤス	461.3	80.99	18%

4.2 栽培試験結果

植生調査により、比較的ヒ素吸収能力の高いヒメスイバ及びヒメノガリヤスを用いて栽培試験を行った。両植物は、ヒ素の高集積植物の目安である1,000mg/kg⁷⁾と比較すると小さいが、植物採取地点の土壌のヒ素溶出量が0.01mg/lと小さいことから溶出量の大きい土壌を用いてヒ素吸収能力を把握することを試験の目的とした。

表 - 8 栽培試験前後のヒ素含有量(ヒメスイバ)

試料	ポット	ヒ素濃度 mg/kg	乾物重 g/株	除去量 μg/株	備考
移植前		0.7	0.085	-	
		1	0.099	-	
		0.3	0.093	-	
A 土壌で栽培後		7	0.798	5.6	
		6.2	0.63	3.9	
		14	1.219	17.1	
B 土壌で栽培後		169	0.458	78	
		135	0.54	73	
		362	0.127	46	枯死

除去量(μg/株) = ヒ素濃度(mg/kg) × 乾物量(g/株)



a) A 土壌



b) B 土壌

写真 - 1 栽培試験後のヒメスイバ

表 - 9 栽培試験前後のヒ素含有量(ヒメノガリヤス)

試料	ポット	ヒ素濃度 mg/kg	乾物重 g/株	除去量 μg/株
移植前		1.2	0.184	-
		1	0.236	-
		6.2	0.164	-
A 土壌で栽培後		1.8	0.312	0.5
		4.2	0.311	1.3
		7.7	0.506	3.9
B 土壌で栽培後		19.3	0.214	4.1
		14.3	0.439	6.3
		16.2	0.3	4.9

除去量(μg/株) = ヒ素濃度(mg/kg) × 乾物量(g/株)



a) A 土壌



b) B 土壌

写真 - 2 栽培試験後のヒメノガリヤス

栽培試験前後におけるヒ素含有量の一覧表を表-8、9に示す。また、栽培試験後の両植物を写真-1、2に示す。ヒメスイバのヒ素含有量は最大361mg/kgの吸収が見られ、この値は植生調査結果よりも大きな値を示した。ただし、ヒ素の高集積植物の目安である1,000mg/kg⁷⁾以下であること、個体差の影響も考えられるが、ヒ素高濃度の土壌で枯死する場合もあることから、浄化目的で使用する場合には土壌中のヒ素含有量の条件に制限のある可能性があるものと考えられる。

ヒメノガリヤスのヒ素含有量は20mg/kgと小さく、植生調査結果よりも小さい値を示す。これは、調査地で生育している土壌が溶出試験においてpH3.8の酸性であるのに対し、栽培試験で用いた土壌は溶出試験においてpH7.5の中性であり、ヒ素が溶出しやすい酸性やpH8~9の弱アルカリ性での環境とは異なるため、ヒ素吸収能力は土壌からの溶出液のpHに左右されたことによるものと考えられる。

以上より、ヒメスイバおよびヒメノガリヤスは適用できる土壌に制限があることや、ヒ素高集積植物の目安と比較するとヒ素含有量が1/3~1/100と小さいことなどから実用化にあたっては課題を有することが確認された。

5. まとめと今後の課題

自然由来重金属の対策・処理方法の研究の一環として、積雪寒冷地における植物浄化工法について検討した。検討内容は、北海道の旧鉾山周辺の植生調査、および選定植物による重金属の吸収性能に関わる栽培実験である。検討結果は以下の通りである。

1. 植生調査では、ヒメスイバおよびヒメノガリヤスの2種類の植物で比較的高濃度のヒ素が確認された。ヒ素含有量は、ヒメスイバが194.9 mg/kg、ヒメノガリヤスが80.99 mg/kgである。

2. 栽培実験では、ヒメスイバのヒ素含有量は最大で361mg/kgの吸収が見られ、この値は植生調査結果よりも大きな値を示した。ただし、ヒ素の高集積植物の目安である1,000mg/kg⁷⁾以下であることやヒ素高濃度の土壌で枯死する場合もあることから、浄化目的で使用する場合には土壌のヒ素含有量の条件に制限があるものと考えられる。一方、ヒメノガリヤスのヒ素含有量は20mg/kgと小さく、植生調査結果よりも小さい値を示した。これは、植生調査地で生育している土壌が酸性であるのに対し、本試験で用いた土壌が中性であるため、ヒ素吸収能力は土壌のpHに左右されたと考えられる。

積雪寒冷地における植物浄化工法の実用化には、多数の課題点を抱えるが、炭酸ガスを排出せず人工物を用いない工法としては有益であり、人工湿地による重金属類の拡散防止策の一つとして発展性も考えられる。今後は、その他の汚染対策工法との組合せにより活用できないかを検討したい。

なお、本成果は、愛媛大学、(株)フジタおよび(独)土木研究所寒地土木研究所の共同研究「寒冷地における植物を用いた建設発生土の重金属処理に関する研究」により得られたものである。ここで、本検討にご協力頂いた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) (独)土木研究所：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)、土木研究所資料第3903号2003.7.
- 2) 国立大学法人愛媛大学理学部環境浄化研究グループホームページ：
<http://www.sci.ehime-u.ac.jp/earth/sakaken/faitore%20zu1kakudai.htm>
- 3) 近藤敏仁、阪本廣行：ファイトレメディエーション、土木技術58巻10号、pp.90-95、2003.
- 4) 吉原利一、後藤文之、増田太郎：植物による環境修復(1) - 現状と遺伝子工学の適用に関する調査 -、電力中央研究所報告 調査報告、pp.1-36、2000.
- 5) 永島玲子、久保田 洋、佐竹英樹、矢島 聡、近藤敏仁、谷 茂：重金属高集積植物のスクリーニング調査、第10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.263-266、2004.
- 6) (財)エンジニアリング振興協会：平成16年度植物利用による有害物質除去技術に関する調査研究報告書、2005.
- 7) Baker,A.J.M., McGrath,S.P., Sidoli,C.M.D., and Reeves,R.D. : The possibility of in situ heavy metals decontamination of polluter soils using crops of metal accumulating plants, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 11 , pp.41-49., 1994.

DEVELOPMENT OF COUNTERMEASURES FOR HEAVY METAL POLLUTION BY NATURAL CAUSES (2)

Abstract : When we encounter rock including natural heavy metals in construction, its estimation and countermeasure is performed based on “Provisional manual for dealing with ground contamination by heavy metal encountered in construction”, published in September 2003. As the manual was edited in accordance with the Soil Contamination Countermeasures Law enforced in February 2003, which is enforced originally for soil contamination not for rock contamination by natural heavy metals, more suitable standard for estimation and countermeasure for natural heavy metals in rock is required. Recently, in Hokkaido, occurrences of natural heavy metals or acid water from rock are considerably reported in construction sites, and occurrences of them become the problem from the viewpoint of public cost and environmental pollution.

The study aims to develop a suitable standard for estimation and countermeasure for natural heavy metals in rock. Then, proposal of researching methods of area or zone with high concentration of heavy metals, development of simple estimation methods of contamination risk, and suitable countermeasure for natural heavy metals are carried out. In 2008, development of analysis method with portable energy dispersive X-ray spectrometer was started as a part of development of simple estimation methods of contamination risk. Also, the investigation concerning the phytoremediation in cold region was carried out in Hokkaido as a part of development of suitable countermeasure for natural heavy metals.

Key words : rock muck, heavy metal contamination, phytoremediation