

ファイトレメディエーション(植物を用いた地盤の浄化法)について

防災地質チーム

1. はじめに

トンネル等の建設工事において自然的原因による有害物質を含有する地盤汚染に遭遇する事例が増加しており、道路建設現場では、「土壤汚染対策法」および「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)」¹⁾に準拠するなどして対応している。しかし、前者は本来人為的原因で、かつより細粒の土壤を対象としていることに対して、後者は自然的原因も含み、より粗粒の岩盤掘削ずりも対象に含まれている。しかし、土壤と岩石ずりでは、有害物質とくに重金属の溶出機構は異なっており、上記に準拠しつつ、学識経験者を含めた検討会により個別に対応している現状にあり、より現場の実情に即した評価、対策手法が求められている。

本解説では、対策手法の一つであるファイトレメディエーション(植物を用いた地盤の浄化法)について述べる。

2. ファイトレメディエーションの概要

ファイトレメディエーション(phytoremediation)とは、ギリシャ語で植物を意味する phyto- とラテン語で治療・修復を意味する remediation と結びつけた、植物を用いた環境浄化を指す言葉であり、植物が根から水分や養分を吸収する能力を利用して、土壤や地下水から有害物質を取り除く方法を指す。また、根圏を形成する根粒菌や微生物(分解微生物; フェノール資化性菌などの土壤菌)などとの相乗効果により浄化する方法も含んでいる。重金属の場合は、地盤中の汚染を取り除くだけでなく、元素によっては濃縮した重金属を抽出・回収することも可能である。

ファイトレメディエーションは植物内での浄化方法の特徴から表-1、図-1のように細分される。

(1) ファイトエクストラクション(Phytoextraction)

対象とする有害汚染物質に対する高い耐性および蓄積性を有する植物を利用して、土壤や水に含有される重金属等を植物体内に吸収・蓄積する機能である。この機能が有害重金属などの無機性汚染物質の除去に最も活用されている。Bakerら³⁾によれば、重金属吸

表-1 ファイトレメディエーションの分類²⁾

分類	機能	対象物質
ファイトエクストラクション Phytoextraction	土壤中の汚染物質を吸収、植物に蓄積	重金属、無機塩類、有機化合物
ファイトスタビライゼーション Phytostabilization	土壤中の汚染物質を根表面に蓄積、酸化還元による無害化	重金属
ファイトトランスフォーメーション Phytotransformation	植物による汚染物質の吸収分解	有機化合物
ファイトスティミュレーション Phytostimulation	根圏微生物を賦活化させ、汚染物質を分解	PCP, PAHs, TNTなど
ファイトボラティライゼーション Phytovolatilization	土壤中の汚染物質を吸収、地上部に移行、大気中に拡散	水銀、セレン、VOCs

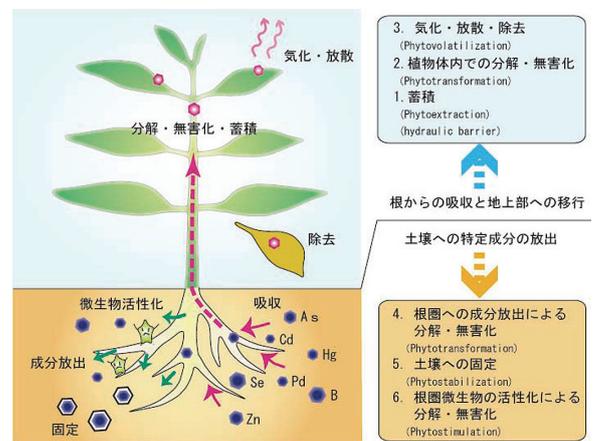


図-1 ファイトレメディエーションの概念図²⁾

収に関してindicator(インディケーター)、excluder(エクスクルーダー)およびhyperaccumulator(ハイパーアキュムレーター)の3タイプに区分される。indicatorは土壤中の金属濃度に比例して蓄積するタイプ、excluderは金属を排除し吸収しないタイプ、そしてhyperaccumulatorは土壤中の濃度よりも高い濃度の金属を蓄積するタイプである。

土壤中の重金属の除去にはファイトエクストラクションが活用できるが、その効率は次式によって示され、大きな除去量を得るために植物体中の重金属濃度が高いほど、そして植物体生産量が大きいほど好ましいことになる。

$$\text{重金属除去量 (g/m}^2\text{)} = \text{植物体中重金属濃度 (g/kg)} \times \text{植物体生産量 (kg/m}^2\text{)}$$

高集積植物としての一般的な判断基準を表-2に示す。

表-2 金属元素ごとの高集積植物の基準値³⁾

元 素	濃度基準 (mg/kg)
カドミウム	>100
コバルト	>1,000
銅	>1,000
鉛	>1,000
マンガン	>10,000
ニッケル	>1,000
亜鉛	>10,000

(2) ファイトスタビライゼーション (Phytostabilization)

根ゾーン、根細胞表面および根細胞内に無機・有機の汚染物質を沈殿・吸収・固定化する作用である。環境への拡散を防ぐことが目的で利用される。汚染物質の除去・分解が目的ではない。

(3) ファイトスティミュレーション (Phytostimulation)

根から分泌される酵素などによって活性化された根圏微生物の働きで汚染物質を分解、無害化させて促進させる方法である。

(4) ファイトボラティリゼーション (Phytovolatilization)

植物が無機・有機汚染物質を吸収し、大気中に気化させる機能である。セレン、水銀や TCE (トリクロロエチレン) 等の浄化について報告例がある。例として、毒性の高いセレンが問題となっている北米では、インディアンマスタード (Indian mustard) がセレンを無機化し、大気中に気化する能力があることが報告されている。この作用には、根圏での微生物が大きく関与しているとされている。また、有機水銀を金属水銀に還元し、気化放出する遺伝子導入植物 (ユリノキ) が報告されている。

(5) ファイトトランスフォーメーション (Phytotransformation)

植物体内の酵素等により無機・有機汚染物質を吸収・分解し、無害化する。NO_x (窒素酸化物)、SO_x (硫黄酸化物) などの大気汚染物質を植物体内に取り込んで、窒素源・硫黄源などの栄養素に変換させる。

上記の5種類以外にも放射性物質を吸収する能力も研究されており、チェルノブイリ原子力発電所爆発事故の検討例⁴⁾は注目されている。成果の概要はヒマワリがセシウム137を根に、ストロンチウム90を花に

蓄積することが判明し、危険性が失われるまで30年以上かかる放射性物質を20日間で95%以上も除去できる能力を有する結果が得られている。また、枯渇が予想されているカドミウムやスズを植物に濃集させて回収する研究も進められており、環境分野のみならず資源分野においても植物の持つ能力を有効利用しようという試みがなされている。

3. ファイトレメディエーション研究の現状

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-3に示す。

表-3 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
グンバイナズナ	<i>Thlaspi caerulescens</i>	カドミウム、亜鉛
ミノソバ	<i>Persicaria thunbergii</i>	鉛、カドミウム
ヘビノネコザ	<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

国内における高集積植物の研究状況は、実用化へ向けた研究のほか、新たな植物を現地で捕らえ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考えられるが、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関係する特許は1998年より出願されている (表-4)。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-4 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

4. ファイトレメディエーションの長所・短所

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-5に示す。

ファイトレメディエーションの長所は、コスト的に

表-5 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⁷⁾

	ファイト レメディエーション	微生物によるバイオ レメディエーション	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
組織全体の 導入・管理	容易	困難	-

優位であり、植物を栽培することで景観が良いことや原位置処理のため汚染土を移動させる必要がなく二次的な汚染のリスクが少ないなどが挙げられる。また、植物に蓄積した重金属を回収することができればリサイクルにも役立てることができる。

一方、短所として、浄化の完了までに時間がかかることや重金属を完全に除去できないこと、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、植物のため天候に左右されることや、建設工事期間中に浄化が完了しない可能性がある。また、植物が吸収したり分解したりできる物質とできない物質があること、複合汚染等の浄化や土中深い場所の浄化には向いていないことなどが挙げられる。

確実性の観点から重金属を含む建設発生土をファイトレメディエーション単独で浄化を行うことには難点はあるが、覆土の植生として補助的に用いること、発生土が少量である場合には有効な手法となる可能性があり、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考えられる。

5. 北海道における適用の可能性

ファイトレメディエーションの現状として、国内における重金属を吸収する植物に関する研究例はあるものの、屋外への適用例は少ない。重金属の高集積植物(ハイパーアキュムレーター)としては、砒素に対するモエジマシダ、カドミウムに対するヘビノネゴザ等が知られているが、生育環境に関する制限もあり適用できる場所も限定されている。北海道においては、自然環境への影響(外来植物の排除)や寒冷地への適応性等を考慮すると、自生植物の中から見つけるのが望ましいことは言うまでもない。

防災地質チームでは、愛媛大学及び(株)フジタとの共同研究「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」により道内の鉱山や重金属の高濃度濃集地帯に自生する植物を調査することにより、先の条件を満たす高集積植物の取得を目指している。今後、その成果を報告することにした。

(文責：田本 修一)

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%20zulkakudai.htm>
- 3) 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.
- 4) Dushenkov, S., D. Vasudev, Y. Kapulnik, D. Gleba, D. Fleisher, K. C. Ting and B. Ensley：Removal of uranium from water using terrestrial plants, Environ. Sci. Technol. 31(12), pp.3468-3474, 1997.
- 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・土壤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) 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.