

ファイトレメディエーションの現状と課題

吉田 光毅*¹・秋吉 美穂*¹・藤原 靖*¹

Keywords : *phytoremediation, heavy metal, phytoaccumulation, phytostabilization*

ファイトレメディエーション, 重金属, 吸収蓄積, 固定化

1. はじめに

ファイトレメディエーションは、ギリシャ語でPhyto(植物)とラテン語でremedium(修復)の造語で、植物利用による環境修復を意味する。草や樹木、根圏に生育する微生物を用いて、土壌、汚泥、底泥、地下水等の汚染物質を吸収、分解、大気中への蒸散により低減または固定化する方法である(図-1)¹⁾。ファイトレメディエーションを巡る世界の動きは活発であり、特に米国E.P.A.(Environmental Protection Agency)のホームページで検索すると60件以上のファイトレメディエーションに関する情報を入手する事ができる。これによると、200以上の汚染サイトで浄化実験が行なわれており、対象物質は主に油や揮発性有機化合物である²⁾。

国内においては、土壌、地下水汚染に関する法律の強化にとともない、工場跡地や操業中の工場敷地内で汚染土壌、地下水の調査・浄化が行なわれている。環境省のまとめでは、2003年の2月から2004年の8月までに、土壌対策法の指定区域として分類された件数は全国で20件以上あり、調査対策件数は今後も増加傾向にあると考えられる³⁾。汚染現場での浄化目標である土壌環境基準は水道水基準と同等の厳しい値に定められており、基準をみとすためには浄化期間が長期に及ぶ場合が多い。このため、コストが上昇し浄化行為の進まないことが懸念される³⁾。現在、汚染土壌、地下水の浄化を行なうために、安価な技術が求められており、その候補として微生物を用いた浄化方法(バイオレメディエーション)や植物を用いた浄化方法(ファイトレメディエーション)が注目されている。

農業分野では、農用地の重金属汚染土壌が過去に問題となり、農水省の機関で1970年代に土壌および作物体中の重金属などの分析法、重金属(汚染物質)の挙動、汚染物質の土壌-植物間の挙動についての研究がなされ

ている⁴⁾。また、環境庁の試験により、セイタカアワダチソウ、ヒマワリ、ヤナギなどがカドミウム吸収量の多い事が明らかとなっている⁵⁾。最近では、WHOとFAO合同の食品規格委員会であるCodexにおいてコメ・大豆などの食品カドミウム含量の基準値が検討され、コメについては含量0.2mg/kgが一時期提案された。もしも、値が日本で批准された場合、国内でこの生産される玄米の3.3%が基準値以上のカドミウムを含むと推定される。また、国内の草地飼料畑への微量重金属の投入量と畑での作物吸収合計を調査した研究報告⁶⁾では、家畜ふん尿から畑へのカドミウム投入量は年間2.3g/haに対し、作物吸収合計は0.5g/haとなり、国内で、表層土壌(非汚染地)のカドミウム現存推定量262gの約0.7%にあたるカドミウム量が1年ごとに増加する可能性が指摘されている。こうした様々な状況を受けて、農地のカドミウム汚染土壌対策の検討が活発化している。その対策技術の1

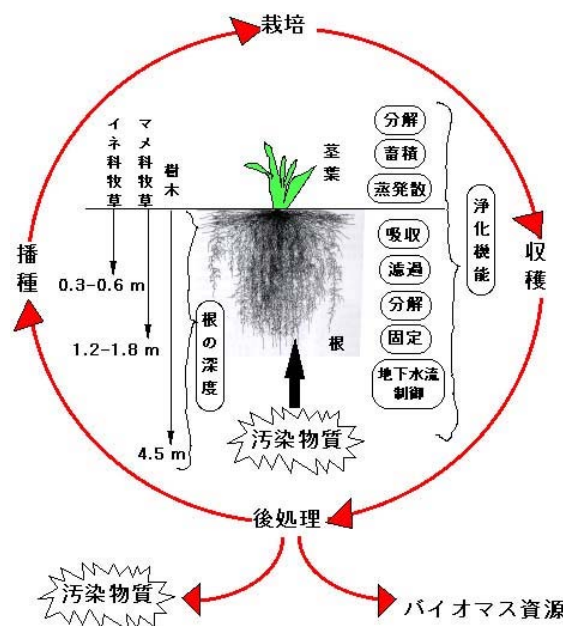


図-1 ファイトレメディエーションの流れ
Process of phytoremediation⁹⁾

*1 技術センター土木技術研究所水域・生物環境研究室

つとしてファイトレメディエーションも農水省研究機関の技術開発課題として取り上げられるようになった⁷⁾。

このようにファイトレメディエーションに関する研究動向は活発であるが、微生物を利用した浄化技術が石油汚染土壌を対象とした浄化事業に発展したのに対し、ファイトレメディエーションが実際の土壌浄化事業に利用された報告はまだない。本稿では、ファイトレメディエーション技術の現状と課題について考察する。なお微生物を利用した環境修復技術（バイオレメディエーション）については別稿「バイオレメディエーションの現状と課題」にて詳述する。

2. ファイトレメディエーションで期待される植物機能とその利点

ファイトレメディエーションで利用可能な植物の機能としては

- (1) 吸収蓄積 (Phytoaccumulation) : 根からの吸収と植物体への蓄積
- (2) 固定化 (Phytostabilization) : 地下部に不溶化、土壌の被覆
- (3) 蒸発散 (Phytoevaporation) : 葉の気孔等を介した大気中への気化
- (4) 根圏での分解 (Rhizodegradation) : 根圏微生物による分解
- (5) 吸収分解 (Phytodegradation) : 根から吸収と植物体内での分解
- (6) 地下水流制御 (Hydraulic control)
- (7) 根圏での表層水や地下水の濾過 (Rhizofiltration)

の7つが提唱されている。(表-1)⁸⁾。具体的な植物種としては、ハイブリッドポプラ、スギ科のラクウショウ、ニセアカシア、キワタ、牧草類、アブラナ科植物、ヤナギ、ヒマワリがあり、EPAのサイトにはこれらの植物種に期待できる機能がまとめられている(表-2)⁹⁾。たとえば重金属の吸収濃縮についてみると、表-3に示すようにアブラナ科の *Thlaspi* ではカドミウムを1,800mg/kg 蓄積し、インドカラシナでは鉛を34,500mg/kg蓄積する¹⁰⁾。また、モエジマシダではヒ素を22,600mg/kg蓄積する能力を持っている¹⁰⁾。また、ヤナギで試算された結果では、年間1ヘクタールあたり216.7グラムのカドミウムを除去する能力のある事が報告されている¹²⁾。

ファイトレメディエーションを他の土壌浄化技術と比較すると、

- 1) 土壌洗浄法などと比較して浄化処理後の土壌の物理化学的性状を大きく変化させない

表-1 ファイトレメディエーションで利用可能性のある植物機能⁸⁾
Types of phytoremediation-effects against various contaminants

機能	対象物質	
	重金属	有機汚染物質
吸収蓄積	Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn, As, Se, B	ヘキサハイドロ-1,3,5-トリニトロ-1,3,5-トリアジン(RDX)
固定化	Cr, Cu, Pb, Zn	?
蒸発散	Hg, Se	トリクロロエチレン (TCE)
根圏での分解	?	除草剤、多環芳香炭化水素 (PAH)、トリクロロエチレン (TCE)
吸収分解	?	トリニトロトルエン(TNT) トリクロロエチレン(TCE) 除草剤
地下水流制御	重金属、過剰肥料の地下水からの汲み上げ	農薬類の地下水からの汲み上げ
根圏での濾過	Pb, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn, Zn, Cr (VI)	?

表-2 汚染物質、浄化対象、浄化効果と植物種との関連 (文献9より改変)

Relationship between plant species and contaminants for phytoremediation

汚染物質 浄化対象	有機汚染物質			重金属, 窒素, リン		
	土壌	底泥	地下水	土壌	底泥	地下水
アルファルファ	×	×	×	○3	○3	×
アブラナ科 <i>Alyssum</i>	×	×	×	○1	○1	×
アブラナ科 <i>Thlaspi</i>	×	×	×	○1	○1	×
アブラナ科 インドカラシナ	×	×	×	○1, 2, 3	○1, 2, 3	○7
イネ科牧草類	○4	○4	×	○2	○2	×
キワタ	×	×	○6	×	×	○6
レッドマルベリー	○4	○4	×	×	×	×
スギ科 ラクウショウ	○4, 5	○4, 5	○5	×	×	×
ニセアカシア	×	×	×	○3	○3	×
ヒマワリ	×	×	×	○1	○1	○7
ハイブリッドポプラ	○4, 5	○4, 5	○5, 6	○1, 2, 3	○1, 2, 3	○6
ヤナギ	○4, 5	○4, 5	○5, 6	×	×	○6

○ : 効果あり、× : 効果不明、数字は効果の位置付け (1 : 吸収蓄積、2 : 固定化、3 : 蒸発散、4 : 根圏での分解、5 : 吸収分解、6 : 地下水位制御、7 : 根圏での地下水などの濾過)

表-3 重金属超集積植物の例 (文献10より改変)

Hyperaccumulators of heavy metals in higher plants

植物種名	対象金属 (乾燥重量あたりの含有量)
アブラナ科 <i>Alyssum</i>	ニッケル (30,000mg/kg)
アブラナ科 インドカラシナ	鉛 (34,500mg/kg)
アブラナ科 <i>Thlaspi</i>	カドミウム (1,800mg/kg)
キク科 ブタクサ	亜鉛 (4,000mg/kg)
ナデシコ科 コバノツメクサ	鉛 (11,400mg/kg)
ミゾソバ	カドミウム (2,000mg/kg)
モエジマシダ	ヒ素 (22,600mg/kg)

2) 低コストな浄化技術

という特徴をもっている。コストについては実際に事業化した例がないため、不明確な部分が多い。EPAの資料では、鉛汚染土壌の浄化に掘削や封じ込めといった従来の浄化技術を適用した場合と比較して、ファイトレメディエーションを適用すると50~65%のコスト削減となる事が報告されている。石油汚染土壌の場合はファイトレメディエーションを適用すると、80%のコスト削減になることが試算されている⁸⁾。

3. ファイトレメディエーション技術の課題

3.1 植物の選定

ファイトレメディエーション技術は、播種→育苗→植えつけ→栽培管理→収穫→後処理からなり、基本的には農作業と変わらない。使用する植物種については、国内での栽培特性が優れ、栽培方法もじゅうぶんに確立したものを利用の方が収量を予測する上で確実と考えられる。また、種子の値段が安く大量供給が可能な植物を選定の方が有利である。農業環境技術研究所の杉山と阿江¹⁰⁾は、低濃度のカドミウムで汚染された水田の浄化には、種子が安価で安定供給され、農家の肥培管理も周知のイネを利用の方が現実的な事を指摘している。

海外で選抜された浄化用植物を大量に国内で扱う場合には、在来植生に対する影響も考慮する必要がある。例えば、表-3に示した外来種の中で、国内では近縁の在来種が国内の絶滅種をまとめたレッドデータブックに登録されているものもある。こうした場合には、周囲の植生に対する影響についての調査も新たに必要となる。また、海外で選抜された植物を国内へ適用しても、気候が異なるため植物の浄化能力が最大限発揮できない場合もある。早川と栗原¹³⁾は、海外の研究事例で人工砂質土壌で52倍のカドミウム濃縮率が報告されているアブラナ科インドカラシナ¹⁴⁾を用いて、国内の沖積土試験圃場(カドミウム全含有量4mg/kg)で吸収試験を行なった。その結果、インドカラシナ植物体中のカドミウム含有量は1~8mg/kgで濃縮率は0.25~2倍程度に過ぎず、ケナフ(カドミウム含有量10mg/kg)にも及ばなかった事を報告している。こうした意味では、日本に適応し栽培も容易で、収穫量の安定した植物の中から比較的浄化能力の高い植物種を選定の方が確実であるように考える。

3.2 浄化能力の年間変動と適用範囲の限界

植物の汚染物質の吸収量は毎年の降雨量、日照量、肥培管理に応じて変動する。例えばイネの同一品種でも、玄米のカドミウム濃度が栽培年度に応じて、最大0.01から0.05mg/kgとばらつくことが分かっている¹⁷⁾。浄化期間の試算には年間変動幅の推定も重要となる。これまで年間変動幅の考慮は全くなされていないが、国内の圃場やポット試験の結果からイネ¹⁰⁾やケナフ¹³⁾のカドミウム収奪量は、年間当たり100g/ha~200g/haと評価されている。

この数値を元にとると、カドミウム含有量の低減(環境省令第29号:150mg/kg以下)よりも溶出量(環境省告示第46号:0.01mg/l以下)の低減を目標とする方が、ファイトレメディエーションの適用性は高いと考えられる。例えば、カドミウム溶出基準値の3倍(0.03mg/l)の

対象地について、土の乾燥密度を1t/m³、汚染深度を30cmと仮定すると、収奪目標値は900g/haとなる。年間収奪量が200g/haのケナフであれば浄化期間は4~5年と推定される。

射撃場のように土壌の鉛含有量が1,000~10,000mg/kgの範囲の土地では、植物による浄化期間は1,000年以上と算出されている。年間2作で700g/haの鉛の収奪が可能なソバ¹⁶⁾でも数年で100%の鉛収奪を目標に設定する事は困難である。この場合、ファイトレメディエーションは汚染地帯からの拡散防止技術として位置づけされている¹⁵⁾。

以上まとめると、ファイトレメディエーションは、重金属の全含有量が環境基準値以下だが、その溶出量が環境基準を最大3倍程度こえる広域な地域での重金属収奪または拡散防止技術として有効と考えられる。

3.3 浄化に用いた植物体の収穫と後処理技術

栽培植物を収穫する際の一般的な課題として、収穫期に後処理工程が一時期に集中するため処理施設の大規模化と年間稼働率の低さが問題となる。年間2作の栽培の実施、収穫時期の分散化、収穫後の貯蔵技術などを組み合わせ、後処理工程を分散化させるような工夫も必要となる。

植物の浄化能力の評価については多くの論文や特許が発表されているのに比べて、浄化に用いた植物体の後処理法の研究例は非常に少ない。近年、カドミウム浄化後のイネの回収と焼却処理試験が実施されている¹⁸⁾。この試験では、カドミウムを吸収したイネを梱包し、圃場で自然乾燥し減量後に焼却した。イネを800℃以上の条件で焼却し、カドミウムを金属イオンとして揮散させ、燃焼主灰からカドミウムを100%分離した。さらにカドミウムはバグフィルターで回収できることを示した。現状では、焼却以外の後処理方法について研究例は少ない。

ファイトレメディエーションは、その浄化工程を太陽エネルギーに依存し、化石燃料の依存性が少ない浄化技術として優れた可能性を秘めている。他の土壌浄化対策技術と比較した場合、焼却処理がファイトレメディエーションにとって最適であるかは植栽に使用する散水施設やトラクターなどの動力エネルギーの試算も含め様々な角度からみた試算が必要となる。他の技術分野ではバイオマスリファイナリーのように、リグニンやセルロースなどバイオマス成分を化学工業原料として利用する研究が盛んに行なわれている。汚染物質の浄化に使用した植物体からバイオマス成分と汚染物質を分別する技術開発も後処理方法の1つとして今後重要になると考えられ

る。

4. まとめ

土壌浄化技術の1つとして期待されているファイトレメディエーションの適用範囲の現状と課題について考察した。その適用範囲としては、カドミウムを例とした場合、溶出基準の2～3倍程度の重金属の汚染地帯について、5年程度の収奪が可能と予測された。重金属の収奪は、降雨、施肥条件、植物の生育に依存すると考えられるので、浄化技術としての確実性を高めるには、年間収奪量の変動予測が必須となる。また、収穫後の後処理法について焼却だけでなく、バイオマス成分の有効利用と結び付けた選択技も必要となるかもしれない。当社においても、以上のような観点をもとに、ファイトレメディエーション技術開発にとりくんでいる。

謝辞

農用地の微量重金属の動態に関する研究動向は（独）農業生物資源研究所の川内郁緒先生に御教示をうけた。

参考文献

- 1) 森川弘道, 高橋美佐, 河村義史: ファイトレメディエーションによる環境修復の新展開, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol.1, pp.1-14, 2001.
- 2) USEPAホームページ, <http://www.epa.gov.superfund/phyto.htm>
- 3) 浅田素之, 海見悦子: 植物を用いた浄化手法 (ファイトレメディエーション) 実用化の展望, 環境技術, Vol.34, pp.264-271, 2005.
- 4) 農林水産技術会議事務局: 研究成果92 農用地土壌の特定有害物質による汚染の解析に関する研究, pp.1-105, 1976.
- 5) 環境庁水質保全局: 重金属特異吸収植物検索研究報告書, pp.1-20, 1975.
- 6) 森昭憲, 賽示戸雅之, 近藤照, 松波寿弥, 我が国の草地飼料畑における微量重金属の堆肥による投入量と牧草および飼料作物による収奪量, 日本土壌肥科学雑誌, Vol.75, pp.651-658, 2004.
- 7) 農業環境技術研究所: 第21回 土・水研究会資料 『農耕地における重金属汚染土壌の修復技術の現状と展望』, pp.1-20, 2004.
- 8) Pivetz, B.E.: Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites, USEPA, pp.1-15, 2001.
- 9) USEPA: Brownfields Technology Primer: Selecting and using phytoremediation for site clean up, Office of solid waste and emergency response, USEPA, pp.1-20, 2001.
- 10) 杉山恵, 阿江教治: カドミウム汚染土壌に対するファイトレメディエーションの有用性と問題点, 第21回土・水研究会資料, pp.8-14, 2004.
- 11) 近藤敏仁: ヒ素・鉛汚染土壌のファイトレメディエーション, 第21回土・水研究会資料, pp.26-34, 2004.
- 12) Greger, M. and Landberg T: Use of willow in phytoremediation. Int J. Phytoremediation. Vol. 1, pp. 115-123, 1999.
- 13) 早川孝彦, 栗原宏幸: 重金属環境汚染に対するファイトレメディエーション技術の実用化に向けて, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol.2, pp.103-115, 2002.
- 14) Kumar, P.B.A.N., V. Duschkov, H. Motto, and I. Raskin: Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. Environmental Sci. Technol. Vol. 29, pp. 1232-1238, 1995.
- 15) 田村英生, 本田宗央, 日比野陽子, 佐藤健: 植物による鉛汚染土壌の浄化 (1) ーソバの鉛蓄積能力ー, 日本土壌肥料学会, pp.15, 2004.
- 16) 佐藤健, 木村努, 酒井宗, 本田宗央, 高見澤一裕, 加藤公夫, 田村英生, 日比野陽子, 小島淳一: 植物機能を活用した射撃場汚染の原位置浄化と拡散防止, 地下水技術, Vol.45, pp.33-43, 2003.
- 17) 阿江教治, カドミウム吸収能の低いイネ・ダイズの検索, 第19回土・水研究会資料, pp.33-36, 2002.
- 18) 谷口彰, カドミウム汚染土壌の植物による修復技術一貫体系の確立, 第21回土・水研究会資料, pp.15-20, 2004.