

## 根圏における重金属汚染土壌の浄化 (I) ファイトレメディエーション

稲葉 尚子・竹中 千里

名古屋大学大学院生命農学研究科

**要旨**：重金属汚染土壌の浄化方法として最近注目されているバイオレメディエーションとファイトレメディエーションに関し、2回にわけて簡単に紹介する。今回は、植物を用いた重金属浄化方法（ファイトレメディエーション）について、Salt et al. (1995) による総説を中心に解説する。

**キーワード**：重金属汚染，重金属耐性植物，重金属蓄積植物，バイオレメディエーション，ファイトレメディエーション

### 1. はじめに

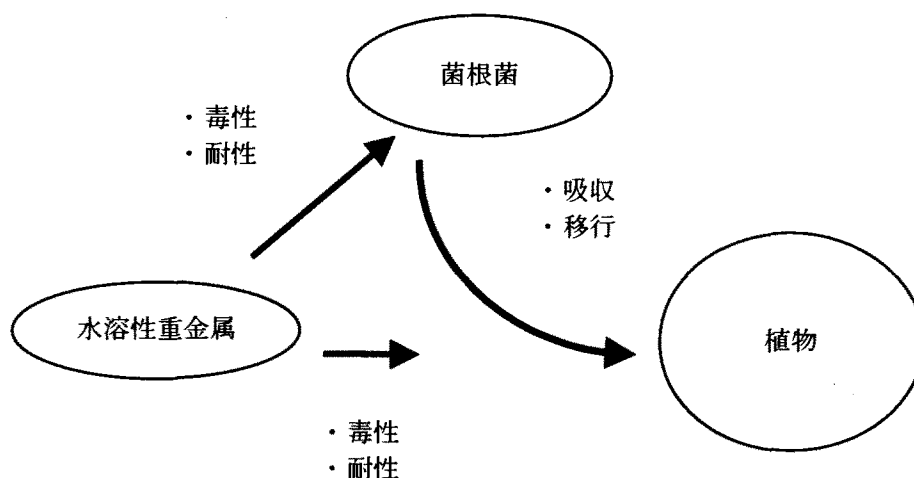
われわれの社会からは、産業活動に伴い、大量の廃棄物が排出され続けている。こうした廃棄物は、よほど危険な物質である場合は頑強な施設に保管されるが、大抵は十分な処理をしないまま、最終処分場に埋め立てられる。また、近年不法投棄も多発している。土壌中の産業廃棄物からは、有害な物質が溶出することがあり、こうした物質が処分場の土壌や、さらに地下水を汚染して問題となっている。こうした問題に対し、現在までに取られている対策の多くは、排土・客土などであり、汚染土壌に対して根本的な解決には至っていない。今後も増加するであろう産業廃棄物による環境汚染には、積極的な土壌の浄化対策が必要とされている。

10年ほど前から、「バイオレメディエーション」、「ファイトレメディエーション」といった言葉が使われ始め、微生物や植物を用いた汚染土壌の浄化の手法が急速に研究・実践されてきている。本来、土壌には微生物の生化学的作用による浄化機能が備わっているが、この能力を最大限に活用しようと考えられたのがバイオレメディエーションである。産廃から生じる有害物質には、主に有機塩素化合物と重金属が挙げられる。前者は無機物にまで分解することで無害化でき、特異的にこうした有毒物質を分解する菌が存在することが知られてきているので、バイオレメディエーションの効果が十分に期待できる (Anderson et al., 1993)。一方、重金属は分解することはできず、浄化にはより複雑なメカニズムがはたらくことになる。その全貌はまだ解明されていないが、微生物が生存・増

殖のために必要なエネルギーを得るために重金属を酸化または還元することで、重金属の化学的形態に変化が生じ、毒性が軽減する作用が例として挙げられる。

重金属汚染土壌に対しては、微生物によるバイオレメディエーションに対し、植物に重金属を吸収させて土壌を浄化するファイトレメディエーションも研究されている。一般的に、植物は重金属ストレスによって成長が阻害されるが、重金属に対して耐性を示し、高濃度の重金属を含有する土壌でも生育できる種が見つっている。こうした植物は、吸収した重金属を細胞壁に蓄積したり、フィトケレチンに結合させることによって無害化することが分かっている (Salt et al., 1995)。

このように、定義上はバイオレメディエーションとファイトレメディエーションは異なる2つの手法として扱われている。しかし、微生物と植物は土壌環境において密接に関係しており、重金属汚染土壌の浄化に関していえば、それらを切り離して別物として扱うことは実際的ではない。特にファイトレメディエーションにおいて、植物が重金属を吸収する際に、その根圏において微生物が果たす役割は無視できないであろう。Leyval et al. (1997) は微生物の中でも特に菌根菌に注目し、重金属-菌根菌-植物の関係について次のように説明している (第1図)。菌根菌にとって重金属は有毒であると同時に、耐性をもつ種も存在する。また、菌根菌は植物体内への重金属の吸収・移行の役割の一部を担っている。従って、菌根菌の存在によって植物体への重金属蓄積が高まる効果



第1図 土壌中の重金属の生物学的利用性と重金属の植物・菌根菌への影響  
(Leyval et al., 1997 より改変).

(ファイトレメディエーション) と、菌根菌そのものへの重金属の蓄積による浄化の効果 (バイオレメディエーション) の両方が期待できる。しかし一方、重金属蓄積植物には菌根を形成しないものが多いことも報告されている (Leyval et al., 1997)。そこで、本レビュー (I) では従来のファイトレメディエーションについて取り上げ、植物と微生物のはたらきが絡み合った部分については、次回 (II) において詳しく述べることにする。ファイトレメディエーションについては Salt et al. による総説 (1995) を中心に紹介する。

## 2. 重金属と植物

産廃の最終処分場跡地や、鉱山・精錬所付近で、植生の遷移過程が攪乱されている例は多く見られる。こうした土壌からしばしば検出される重金属元素には Cu, Zn, Cd, Pb などが挙げられるが、こうした元素が必ずしも植物に不要な有害元素であるわけではなく、Cu, Zn また Mn, Ni, Co などは微量必須元素である。一方、Cd, Pb また Cr, Ag, Se, Hg などは植物による蓄積が見られるが、生理的なはたらきは知られていない。

後者に分類される元素は、根から吸収される際、細胞膜上のイオンポンプ、イオンチャンネルによる能動輸送において、必須元素と競合すると考えられている。重金属元素は根に侵入した後は、その場でなんらかの物質と結合、沈

殿して隔離されるか、地上部に移行する。

こうした重金属の挙動において重要なのがその化学的形態であり、生物学的利用性とある種の相関関係を示す。生物学的利用性とは土壌から生物へ移行可能な性質のことであり、土壌中の全含有量や、pH, Eh, 有機物・粘土含有量といった物理化学的性質、および吸収、蓄積、可溶化といった生物的作用によって決定される。土壌中の重金属の存在形態と、生物学的利用性については後で触れる。

## 3. ファイトレメディエーション

重金属汚染土壌の浄化の方法は、主に重金属の不動化あるいは土壌からの抽出・濃縮に限られている。近年注目を集めているファイトレメディエーションでは、次の3つの手法が考えられている (Salt et al., 1995); (1) 植物による吸収 (phytoextraction), (2) 根圏での濾過 (rhizofiltration), (3) 植物による安定化 (phytostabilization)。これらの中で、(2) は水耕栽培による重金属汚染水の浄化の手法であるため (Dushenkov et al, 1995), 今回は除外する。

### 3-1. 植物による吸収 (phytoextraction)

重金属を植物に吸収・蓄積させ、植物のバイオマスとして土壌から重金属を除去する方法である。代表的な重金属蓄積植物としては、

第1表 *Brassica juncea*と*Thlaspi caerulescens*の地上部と根への重金属蓄積係数.

重金属溶液による8日間の水耕栽培の結果 (Salt et al. 1995より改変)

金属	初期濃度(mg/L)	蓄積係数 ± SE			
		地上部		根	
		<i>Brassica</i>	<i>Thlaspi</i>	<i>Brassica</i>	<i>Thlaspi</i>
Cd	5	175±16	59±12	20574±4295	4258±168
Cu	1	159±32	623±265	55809±9221	60716±21510
Cr	0.4	80±8	89±15	5486±393	8545±2677
Ni	1	587±115	2739±383	11475±125	8425±4220
Pb	5	3±1	29±23	1432±1409	7011±3616
Zn	3	49±31	770±320	1816±1739	2990±1424

蓄積係数 = 植物組織中の重金属濃度 / 溶液中の初期濃度 (( $\mu\text{g/gDW}$ ) / ( $\text{mg/L}$ ))

*Thlaspi caerulescens* やアブラナ科の植物である *Brassica juncea*, *Brassica napus*, *Brassica rapa* などが挙げられ (Brown et al., 1994; Ebbs and Kochian, 1997; Ebbs et al., 1997; Kumar et al., 1995; Salt et al., 1995), 日本ではヘビノネゴザ (*Athyrium yokoscense*) が知られている (茅野・小畑, 1988; 三宅ら, 1993).

Brawn et al. は (1994), Zn 精錬所の汚染土壌を用いて, *Thlaspi caerulescens* とトマト (*Lycopersicon esculentum*) の重金属蓄積を比較している. トマトが Zn 過剰害によって引き起こされたリン欠乏症状を示したのに対し, *Thlaspi caerulescens* は重金属ストレスによる収量減なしで, Zn では  $18,455\text{mg kg}^{-1}$ , Cd については  $1,020\text{mg kg}^{-1}$  まで地上部に蓄積することを示した. これは1ポット当たりの蓄積量として, トマトの 218 倍 (Zn), 2,028 倍 (Cd) に相当する. このような *Thlaspi caerulescens* の高い重金属蓄積能力を利用すれば, 1ポット (1.8kg 乾重) 分の汚染土壌 (Zn 濃度: 2100ppm) を 28 年で浄化できると試算している.

それに対し Ebbs and Kochian (1997) は, *Thlaspi caerulescens* は個体が小さく成長速度も遅いことから, 大規模なファイトレメディエーションには不向きであると指摘している. その代わりとして, アブラナ科の植物 *Brassica juncea*, *Brassica napus*, *Brassica rapa* の有用性を Zn と Cu を用いた水耕栽培で検討している. その結果, *Thlaspi caerulescens* とは異なり, 重金属処理による地上部・地下部の収量減が認められたものの, Zn の蓄積能力は高く, 1個体当たりの地上部

への蓄積量は 1.2~1.6mg であると報告している. このことから, これらの植物がファイトレメディエーションに有効であると結論づけている. 表1に Salt et al. (1995) によって求められた *Brassica* と *Thlaspi* の地上部と根への蓄積係数 [植物組織中の重金属濃度 ( $\mu\text{g/gDW}$ ) / 溶液中の初期濃度 ( $\text{mg/L}$ )] を示す.

### 3-2. 植物による土壌安定化 (phytostabilization)

植生が失われた重金属汚染土壌は, 侵食を受けやすくなり, 土壌流出による汚染拡散のおそれがある. このような土壌に重金属耐性植物を植え, 植生を復活させることもファイトレメディエーション技術のひとつである. Smith and Bradshaw (1979) は, *Agrostis tenuis* や *Festuca rubra* などは酸性の Pb/Zn 汚染土壌, 石灰質の Pb/Zn 汚染土壌, Cu 汚染土壌などの植生回復に幅広く有効であると述べている.

また Salt et al. (1995) は, 重金属蓄積植物が汚染土壌から地下水への重金属の流出を防ぐ役割を果たすことも報告している. 例えば, *Brassica juncea* を植栽することにより, Pb 汚染土壌からの Pb の流出を約三十分の一に抑えられること, また *alfalfa* の根が, 有害な Cr (VI) を毒性の低い Cr (III) に還元することが示されている (Losi et al., 1994).

このような phytostabilization に適した植物は, 高濃度の金属に対する耐性があり, 根からの吸収, 沈殿, 還元反応などによりこれらの金属を不動化することができ, また地上部への蓄積が少ない性質を持つ植物であることが望まれる. 地上部への蓄積が少なければ, 刈り取った部分を危険な汚染物として取り扱う必要がな

くなるからである。

#### 4. 植物へ吸収されやすい重金属の形態とその利用

重金属汚染土壌からの植物への吸収・蓄積は、土壌中での重金属の存在形態に依存する。土壌中での重金属は主に次のような形態をとっている。(1) 土壌溶液中の遊離イオンあるいは溶存金属錯体、(2) イオン交換態あるいは鉱質土壌成分への選択的な吸着態、(3) 有機物結合態、(4) 酸化物、炭酸塩、水酸化物などの不溶性化合物、(5) ケイ酸塩鉱物の構造内。人為的な汚染に由来する重金属は主に(1)から(4)の形態をとっており、その中で植物に最も吸収されやすいのが(1)の形態であり、(2)の一部も吸収されている。植物への吸収によるファイトレメディエーションを効果的に行うには、重金属の形態を吸収されやすい化学形にすることが有効である。そのために、キレート剤やpH調節剤、還元剤などの土壌改良剤の使用が提案されている。キレート剤は、重金属をキレート錯体として植物に取り込まれやすい形にするだけでなく、吸着している金属の脱着やFe/Mn酸化物や沈殿している化合物の溶解を促進することにより、植物への吸収を増加させる。Salt et al. (1995)は、キレート剤の添加により、*Brassica juncea*のCd吸収が約5倍増加したと報告している。また、pHを低下させ重金属を土壌溶液中に溶解することにより、植物への吸収を促進することができる。この目的には、アンモニウム塩を含む肥料や土壌酸性化剤の使用が効果的であることが示唆されている(Salt et al., 1995)。さらに、植物根が本来持つ機能である有機酸や還元剤の分泌によるFe/Mn酸化物の溶解を、添加剤で促進することも試みられている。Blaylock and James (1994)は、アスコルビン酸などの有機酸の添加で、オオムギとコムギのSe吸収が高まったことを報告している。

#### 5. 植物による重金属蓄積のメカニズム

植物への吸収を利用したファイトレメディエーションを実際の技術として使用していくためには、植物による重金属蓄積のメカニズムを理解しておくことが必要である。

##### <根からの吸収>

根への取り込みには、三つのメカニズムが明らかとなっている。

まず、根から金属キレート物質(phytosiderophores)を分泌し、根圏の金属

を可溶化する。イネ科植物におけるムギネ酸などが代表例として挙げられる。また、メタロチオネインやフィトキレチンに関係する金属キレートタンパクも同様の機能をもつことが示唆されている(Rausser, 1990; Robinson et al., 1993)。次に、根の原形質膜結合金属還元酵素によって、土壌に結合している金属を還元するメカニズムも報告されている(Welch et al., 1993)。三番目として、根からプロトンを放出することにより根圏のpHを低下させ、金属を可溶化することができる。このようなメカニズムは菌根菌の機能としても、同様にあてはまる。可溶化した重金属は、細胞外あるいは細胞内の経路を通して、根の内部に取り込まれる。

##### <細胞内輸送>

根に取り込まれた重金属は、根に蓄積されるかあるいは地上部に運ばれる。地上部への輸送は、木部を通して行われ、地上部では、師部を通して再分配される。一般に、木部の細胞壁は陽イオン交換能が高いので、金属イオンの移動は困難である。そこで、Cdクエン酸錯体のような金属キレートの形で輸送されると考えられている。

##### <重金属抵抗性>

植物の重金属に対する抵抗性には、細胞内への侵入の阻止、侵入した重金属の無毒化、抵抗性代謝系の活性化などが挙げられる。細胞内への侵入阻止は、根端の分裂組織など一部の組織で見られる。また、重金属の無毒化には、キレート化、隔離、沈殿などのメカニズムが挙げられる。Znは有機酸とキレート化して、液胞内に蓄積することが報告されている(Mathy, 1977)。また、Cdもフィトキレチンと結合して液胞に蓄積することが知られている(Rausser, 1990)。Cuに対する応答としてもフィトキレチンが生成するが、Cdの場合と異なり、Cu結合メタロチオネイン様分子も生成することが見いだされている。*Brassica juncea*では、Pbへの応答としてフィトキレチンの生成が報告されている。このように、金属ストレスに対する植物の抵抗性については、メタロチオネインやフィトキレチンなどの誘導生成が重要な役割を果たしていると考えられている。

#### 6. さいごに

Salt et al. (1995)は、植物への吸収によって汚染土壌を浄化する際のコストを試算している。それによると、深さ50cmの1エーカーの土壌を浄化するのに、従来の排土による除去では最低40万ドル必要であるのに対し、ファ

イトレメディエーション技術を用いると、6万ドルから10万ドルで済むと報告されている。また、この手法は生態学的にも好ましいことから、さらなる研究による実用化が期待される。

### 引用文献

- Anderson, T.A., Guthrie, E.A., Walton, B.T. 1993. Bioremediation in the rhizosphere. *Environ. Sci. Technol.* 27: 2630-2636.
- Blaylock, M.J., James, B.R. 1994. Redox transformations and plant uptake of selenium resulting from root-soil interactions. *Plant Soil* 158: 1-12.
- Brown, S.L., Chaney, R.L., Angle, J.S., Baker, A.J.M. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc- and cadmium-contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 23: 1151-1157.
- 茅野充男, 小畑仁 1988. 重金属と植物. 茅野充男, 斉藤寛編, 重金属と生物. 博友社, 東京. pp100-117.
- Dushenkov, V., Kumar, P.B.A.N., Motto, H., Raskin I. 1995. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous stream. *Environ. Sci. Technol.* 29: 1239-1245.
- Ebbs, S.D., Kochian, L.V. 1997. Toxicity of zinc and copper to *Brassica* species: Implication for phytoremediation. *J. Environ. Qual.* 26: 776-781.
- Ebbs, S.D., Lasat, M.M., Brady, D.J., Cornish, J., Gordon, R., Kochian, L.V. 1997. Phytoremediation of cadmium and zinc from a contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 26: 1424-1430.
- Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I. 1995. Phytoextraction: The use of heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.* 29: 1232-1238.
- Mathys, W. 1977. The role of malate, oxalate, and mustard oil glucosides in the evolution of zinc-resistance in herbage plants. *Physiol. Plant.* 40: 130-136.
- 三宅博, 岡本日佐子, 広瀬竜郎, 伊豆田猛, 戸塚績 1993. 銅製錬所煙害地における重金属耐性植物ヘビノネゴザの生育特性. 人間と環境 19: 2-11.
- Layval, C., Turnau, K., Haselwandter, K. 1997. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza* 7: 139-153.
- Losi, M.E., Amerhein, C., Frankenberger, W.T. Jr. 1994. Bioremediation of chromate-contaminated groundwater by reduction and precipitation in surface soils. *J. Environ. Qual.* 23: 1141-1150.
- Robinson, N.J., Tommey, A.M., Kuske, C., Jackson, P.J. 1993. Plant metallothioneins. *Biochem. J.* 295: 1-10.
- Rausser, W.E. 1990. Phytochelatins. *Annu. Rev. Biochem.* 59: 61-86.
- Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N.P.B.A., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I., Raskin, I. 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology* 13: 468-474.
- Smith, R.A.H., Bradshaw, A.D. 1979. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes. *J. Appl. Ecol.* 16: 595-612.
- Welch, R.M., Norvell, W.A., Schaefer, S.C., Shaff, J.E., Kochian, L.V. 1993. Induction of iron (III) and copper (II) reduction in pea (*Pisum sativum* L.) roots by Fe and Cu status: Does the root-cell plasmalemma Fe (III) -chelate reductase perform a general role in regulating cation uptake?. *Planta* 190: 555-561.

Title: Remediation of heavy metal - contaminated soil in the rhizosphere

Author: INABA, S. and TAKENAKA, C.

(Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University)