

[総合報告]

ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復

王効拳* 李法雲** 岡崎正規** 杉崎三男*

要 旨

近年、様々な有機・無機汚染物質による低濃度・広範囲な土壌汚染が世界中で問題となっている。これらの土壌汚染の浄化には従来の物理化学的処理だけでは対応が困難なため、植物を活用するファイトレメディエーション技術が注目されている。ここでは、ファイトレメディエーションによる汚染土壌浄化の機構、研究・応用の現状と今後の展望について述べる。

種々な重金属類を浄化対象として研究が行われて、約400種類の重金属高蓄積植物が発見されており、それらの多くが環境修復の現場で商業的に使われている。一方、有機性有害物質の処理や放射性物質のファイトレメディエーションについても、有効であることが様々な試験から確認されている。産業レベルでの応用は重金属の浄化に比べ、まだ少ないが、有機性汚染物質の浄化にファイトレメディエーションを適用する研究開発の集積が期待されている。

米国を始めとして諸外国では、各種企業、公立、民間研究グループがファイトレメディエーション技術の研究開発及び応用分野に参入している。環境規制が厳しくなりつつある日本においても、将来性が有望視されている。現在、高浄化能力を持つ植物及び微生物の発見、植物－微生物－汚染物質間の相互作用の解明、植物－微生物の組合せ及び遺伝子技術の応用等による効率的なファイトレメディエーション技術の確立が緊急な課題となっている。

キーワード： 土壌汚染、ファイトレメディエーション、化学物質、根圏、植物、重金属、有機汚染物質

1 はじめに

土壌は、水、大気、生物とともに環境の重要な構成要素であって、人類の生活や経済活動の基盤である土地を構成しており、食糧の生産や物質の循環、生態系機能の維持の要として重要な役割を果たしている。しかし、社会の発展に伴い、さまざまな経路から環境中に排出される有害物質の増加による土壌汚染が顕在化してきている。特に、ここ数十年間、重金属類等の無機汚染物や残留農薬、揮発性有機化合物、PCB、ダイオキシン類、石油等有機汚染物による土壌汚染が世界中に広がって、人の健康及び生活環境を脅かしている。

このため、欧米等諸国では、法律による包括的な対応が図られている。1980年代から、米国のスーパーファンド法（CERCLA法）をはじめとして、オランダの土壌保護法、イギリスの環境法、ドイツの連邦土壌保護法などが制定されてい

る。これらの法律は、汚染土壌の修復義務を規定しており、汚染土壌に対する迅速かつ責任ある対応を義務づける厳しい責任追及主義を採用している。

日本では、過去において、50、60年代の水俣病や70年代の江東区六価クロム汚染等の公害問題が大きな社会問題となった。近年では、土壌汚染問題を取り巻く状況が大きく変化している。法制度の対応についてみると、農用地での土壌のカドミウム等、特定有害物質による汚染の防止、除去のため、1970年に土壌汚染防止法が公布された。この後、「土壌の汚染に係る環境基準」が1991年に定められ、ダイオキシン類対策特別措置法が1999年に制定された。さらに、2002年には土壌の特定有害物質の汚染による措置及び人の健康に及ぼす被害の防止に関する措置を定めた土壌汚染対策法が公布された。この法律には、米国のCERCLA法と同様に、汚染土壌の修復義務が規定されている。

* 埼玉県環境科学国際センター

〒347-0115 埼玉県北埼玉郡騎西町上種足914

** 東京農工大学大学院生物システム応用科学研究所

〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16

土壌汚染の顕在化及び法制度の強化を背景として、数多くの国で汚染事例の判明件数が増加している。現在、汚染サイトは米国に21.7万か所があるといわれる。日本では、「土壌の汚染に係る環境基準」の超過事例が1998年から高い水準で推移してきている。

土壌汚染が判明された場合、汚染物質の除去作業や環境基準を満たすような修復施策が不可欠となる。しかし、汚染土壌の浄化は非常に難しい処理工程である。これまで主に行われてきた掘削除去や化学物質の抽出作業等物理化学的な手法には、巨額な費用(一件当たり20~30億円)や処分場の用地確保の問題、二次汚染の懸念及び土壌の生物・化学等性能の破壊等種々の障害があるため、現在の土壌汚染浄化への適用が限定される。そこで、低コストの生物環境修復(バイオレメディエーション、Bioremediation)の技術開発が進められた¹⁻⁴⁾。なかでも、植物を利用したファイトレメディエーション(Phytoremediation)は、低コストであると同時に、太陽エネルギーを使用しているため、CO₂放出などの環境負荷がほとんどなく、汚染土壌の拡散の防止や緑化等に有効であるため、土壌修復技術として最も期待されている⁵⁻⁸⁾。

本稿では、ファイトレメディエーションの概念、浄化の機構、その展開と応用の状況及び今後の展望について議論する。

2 ファイトレメディエーションの概念と発展

2.1 ファイトレメディエーションとは

ファイトレメディエーションとは、植物の有害物質の吸収・蓄積・分解等多様な機能を利用して、汚染された土壌・底質、水等環境媒体の修復・浄化技術である^{7,9)}。ファイトレメディエーションはギリシャ語で「植物」という意味の“phyton”とラテン語で「修復・治療」を意味する“remediation”が合成された言葉である¹⁰⁾。この場合、植物ということは、陸生・水生を問わずすべての維管束を持つ独立栄養型生物を指しているが、汚染土壌を浄化する場合に利用された植物はほとんど樹・草・作物ような陸生型緑色植物となっている。

汚染土壌の修復では、表1に示すように、様々な技術が使われている。今まで、一般的には掘削除去や化学物質の抽出作業等の物理化学的方法が実施されている。汚染事例の様態(汚染の規模と濃度、対象物質等)が様々であるため、ファイトレメディエーションと物理・化学的手法等の従来技術と定量的に比較し議論することは困難である。このため、表2に示す限られた項目について比較した。

従来の物理化学的方法は短期間で処理できるメリットはあるが、処理コストが高いことや、エネルギー消費量が大きいこと、また土壌機能の破壊、二次汚染の懸念があり、低濃度・広範囲的な汚染サイトへの対応が困難である。

一方、ファイトレメディエーションは、処理時間はかかるが、土壌を掘り返し加熱するためのエネルギー消費等がなく、太

陽エネルギーを利用し、植物の生長によって環境汚染物質を低減する修復技術である。このため、二酸化炭素放出等の環境負荷がほとんどないという特長をもち、広範囲の土、水、空気の状態の保全・維持(環境悪化の防止)にも有用な緑による環境調和型の技術である。特に低濃度・広範囲な土壌汚染浄化に適応可能になり、適用範囲が有機性、無機性、放射性汚染物質等非常に幅広いことも利点である。

表1 汚染土壌浄化技術の分類¹¹⁻¹³⁾

浄化技術分類	技術の種類
原位置浄化 (汚染土壌を掘削せずに土壌中の汚染物質濃度を低下させる技術)	原位置分解: 化学的分解・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を含む)・その他 原位置抽出: 土壌ガス吸引・ファイトレメディエーション・その他
掘削除去・処理 (汚染サイトから汚染土壌を掘削除去し、対象汚染物質を分離及び分解する技術)	分離処理法: 熱脱着・土壌洗浄法・揮発法・その他 分解処理法: 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を含む)・化学的分解・熱分解・その他
安定化 (汚染土壌から有害物質の溶出や拡散を防止するために、対象汚染物質の固化や封じ込め等の技術)	封じ込め: 原位置封じ込め・掘削除去後(対象地内/外)封じ込め(鋼矢板工・遮水工・遮断工等) 物理化学的処理: 不溶化・固化化・その他

表2 土壌汚染処理技術の性能比較

○:優 △:普通 ×:劣

比較項目	ファイトレメディエーション	バイオレメディエーション	物理・化学的手法
対象物質	無機 有機	有機	無機 有機
コスト	○	△	×
外部エネルギーの必要性	△	×	×
浄化効率	×	○	○
低濃度・広範囲汚染の対応	○	○	×
土壌性能の維持	○	○	×
外部環境の影響	×	△	○

2.2 ファイトレメディエーションの発展

植物利用による環境浄化は新しいものではない。1920年代には、土壌化学研究者や探鉱者等が金属を蓄積するため、植物の機能を利用した¹⁴⁾。日本には、ツタで大気を浄化したり、ヨシ林で水を浄化するなど、植物利用法が古くから存在している¹⁵⁾。但し、ファイトレメディエーションの概念の形成・発展、新しい植物テクノロジーの確立、多様な汚染環境修復への系統的な研究、開発及び応用は70年代から発展してきたものである。特に、湾岸戦争で大量に流出した原油中の重金属類をファイトレメディエーションで浄化する検討が進められてきた¹⁶⁻¹⁸⁾。

約30年前、植物の栽培、収穫及び金属高蓄積植物の処理による重金属汚染土壌の計画的な修復が提案された¹⁹⁾。

植物利用による土壌中有機汚染物の修復はもっと新しいものである²⁰⁾。筆者らはphytoremediationをキーワードとして、JST(科学技術振興事業団)及びPubMedの科学論文検索システムを用いて、世界及び日本で発表されたファイトレメディエーションをキーワードとして使った論文数を検索した。図1を示すように、90年代後半から発表論文数は著しく増えてきて、ファイトレメディエーションの研究開発が発展している。

現在、環境修復におけるキーテクノロジーの一つとして、ファイトレメディエーションを巡る世界の動きは活発化している。1998年アメリカで第3回、1999年カナダで第4回ファイトレメディエーション国際会議とワークショップが開催された。他に、EU/COST ACTION 主催の“Phytoremediation 2000- State of the Art in Europe”(クレタ島、2000年4月)、ISS(国際土壌学会)主催の“SOILREM 2000”(中国、2000年10月)等がある。また、1992年国際環境バイオテクノロジー学会(ISEB)が創立され、1996年アメリカで、1998年北アイルランドで、2000年日本で、2002年メキシコで環境バイオテクノロジーを主催し、ファイトレメディエーションに関する国際シンポジウム等がいくつか行われていた。ファイトレメディエーションの研究開発はアメリカ、カナダ、ヨーロッパを中心に中国や日本、タイ等諸国でも精力的に進められ、種々のファイトレメディエーションの技術等が世界中で注目されている。

3 ファイトレメディエーションの修復機構

植物による汚染環境修復は、対象となる汚染媒体、汚染物質及び活用する植物の能力により種々な修復機構が分けられている。これには環境負荷物質の吸収、吸着・固定、代謝・同化・分解等が挙げられる(表3)。以下、重金属等無機性汚染物質及び有機性汚染物質の修復機構について、説明する。

3.1 重金属等無機汚染土壌の修復機構

重金属(Cd、Hg、Pb、Cr、Cu、Al等)や放射性物質(Cs、Sr等)及び他の無機汚染物質(As等)による土壌汚染は、世界中で深刻な問題となっている。これらの汚染土壌のファイトレメディエーションが、主に植物の吸収・蓄積(ファイトエクストラクション)、根圏での固定(ファイトスタビライゼーション)及び空中への気化・放散(ファイトボラティライゼーション)等の機能によって実現されている(図2)。

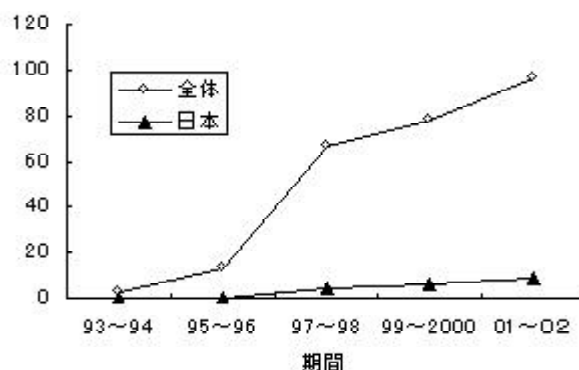


図1 ファイトレメディエーションをキーワードに含む論文数

表3 ファイトレメディエーションによる土壌浄化機構²²⁾

修復機構	説明	対象物質
ファイトエクストラクション(P hytoextraction)	植物の体内に汚染物質の吸収・蓄積	金属、放射性物質、その他
ファイトスタビライゼーション(Phytostabilization)	根及び分泌物による汚染物の吸着・沈殿・固定	金属・有機性汚染物質
ファイトステイミュレーション(Phytostimulation)	根圏微生物の増殖・活生化による汚染物の分解・無害化	有機性汚染物質(PAH、石油、TNT等)
ファイトボラティライゼーション(Phytovolatilization)	植物による気化・放散・除去	気化金属(Hg)等
ファイトトランスフォーメーション(Phytotransformation)	植物体内での分解・転換・無害化	有機性物質
ファイトマイニング(Phytomining)	植物の吸収・濃縮を用いた貴金属等の抽出・精錬	貴金属等

(1) ファイトエクストラクション(Phytoextraction)

対象汚染物質に対して高い耐性と蓄積性をもつ植物を利用して、土壌中の重金属等を植物体内に吸収・蓄積すること。これが無機性汚染物の浄化に最も利用されている。

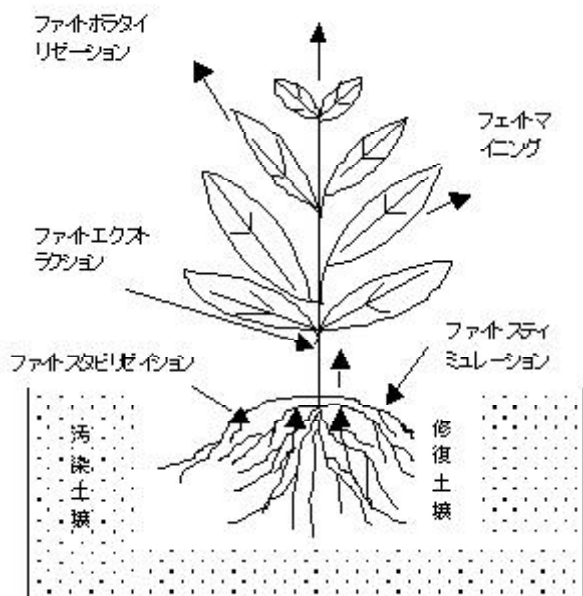


図2 ファイトレメディエーションによる土壌中重金属の浄化機構²¹⁾

ファイトエクストラクションの過程について、植物根から重金属還元酵素等が分泌され、土壌粒子に捕捉されている重金属を可溶化する。可溶化された重金属は植物根中に取り込まれる。その後、そのままの形態あるいはキレート化合物として根中に蓄積されるか、植物上部の茎葉組織に輸送される²²⁾。取り込む機構としては、各種重金属特有のイオンチャンネルや重金属輸送蛋白質等の存在と利用が推定されている²³⁾。

しかし、普通の植物では、有害な重金属等を体内に多く取り込むことができない。一般的に、ファイトレメディエーションに利用できる植物としては以下の特性を持つことが理想である²⁴⁾。

- ① 土壌中の重金属の濃度が低い場合にも、植物は多く蓄積することができる。
- ② 重金属に対して高い耐性及び高い蓄積能力を持つ。
- ③ 様々な重金属を集積する能力がある。
- ④ 成長が速く、生物量が多い。
- ⑤ 病虫害に対して、高い耐性がある。

汚染土壌の実用的な修復技術としては、重金属高蓄積植物 (hyperaccumulating plants) の選択と育成が特に重要である。重金属高蓄積植物は、大量の重金属を植物体内で蓄積、輸送ができ、毒性に耐性を有する特殊な機能を持つ植物である¹⁾。例としては、鉛に対して高い集積能力がある草類 (*Brassica juncea* L. 等) は自重 (乾重) の 1.5% の高濃度の鉛を集積することができる¹⁶⁾。現在、アメリカでこの草類の

圃場実験が行われている²⁵⁾。

植物が重金属を土壌濃度の何十倍、何百倍の濃度に濃縮した場合は、その植物を刈り取ることで汚染物質の除去ができる。また、濃縮した重金属を抽出あるいは回収することも可能であり、その資源の再利用が可能である。これはファイトマイニングとも呼ばれている。

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

植物を汚染土壌に植えた後、植物根およびその分泌物上に土壌中の汚染物質を吸着・沈殿させることによって、土壌中の重金属のバイオアベイラビリティ (Bioavailability) や毒性が低下し、土壌から溶脱しにくくなり、土壌中での移動、溶出、地下水への進入を防止するものである。そのメカニズムについては根からの分泌物による金属イオンの吸着、安定な金属配位化合物の形成、植物体内のリグニンによる捕捉等が考えられている²⁶⁾。しかし、植物による汚染物質の安定化は、植物が重金属に耐性を持つ原因の一つでもあり、実際には、土壌中の重金属が除去されにくくなる可能性もある。

この機能は、主に浄化後の土壌の保全策、また、埋立地等からの有害物質漏出の防止策等に適していると考えられている。

(3) ファイトボラタリゼーション (Phytovolatilization)

植物が土壌から吸収した汚染物を体内で気体物質に変化させ、無害化した物質として大気中に排出することである。これは揮発性汚染物質に適応されると考えている。1930年代、揮発態のセレン (Se) がゲンゲ属植物 (*Astragalus bisulcatus*) から排出される結果が報告された。その後、他の研究者は植物が環境中から吸収したセレンを気体状態のジメチルセレンニドに変化させると報告した²⁷⁾。また、セレンを蓄積する能力を持つ植物は、その能力を持たない植物と比べ、排出するセレンの形態が異なる¹⁾。Terryの研究により、大麦を植えた土壌からセレンが排出される速度は大麦を植えなかった土壌より 19.6 倍速いという結果が得られた²⁸⁾。セレンと同様に、水銀に対するファイトボラタリゼーションも期待しているが、このような植物はまだ発見されていない。現在、細菌体内から分離した水銀の還元酵素遺伝子を植物 (*Arabidopsis*) に導入し、植物は土壌から吸収した水銀を気体水銀に還元し、大気中に排出することが観測された^{1, 29)}。

3.2 有機物汚染土壌の修復機構

有機物汚染土壌のファイトレメディエーションは、主に植物による汚染物の吸収 (ファイトエクストラクション) 及び植物根から分泌された様々な分解酵素と根圏での微生物の増殖

及び活性化(ファイトスティミュレーション)により土壌中の有機汚染物を分解・除去させることである。

(1) 有機汚染物質のファイトエクストラクション

植物が有機汚染物を直接に吸収することは、有機物を体内に取り込んで、その後、代謝や分解あるいは気化が行われることである。植物による有機汚染物を直接に吸収する働きは、古くから沼の硝酸イオン、アンモニアイオン等富栄養物質の吸収除去に利用されている。但し、人工的に作り出された難分解性有機汚染物に対して、大量の吸収除去に利用するのは新しい挑戦である。植物による有機汚染物質の吸収は、重金属の場合と類似しており、対象物質の有効性、吸収メカニズム及び利用植物の特徴によって、大きな差異がある。

中程度の疎水性有機化合物(塩素系有機溶媒、低級脂肪酸等)について、植物による吸収・除去の可能性が示唆されている²³⁾。疎水性が高い有機汚染物は、植物根細胞壁の透過が困難であり、また土壌粒子に強固に吸着されているため、吸収が困難と考えられている。

農薬や殺虫剤が植物に吸収されることが確認されている¹⁾、²⁰⁾。また、Puri氏らの研究では、ヘキサンに溶かした異性体組成の分かったPCBを土壌に添加し、この汚染土壌に植えたオオムギやトマト体中のPCBを分析し、植物がPCBを吸収することが明らかになった³⁰⁾。

(2) 有機汚染物質のファイトスティミュレーション

生長中の植物根は、その根圏土壌中の微生物の増殖及び活性を促進する。これはPhytoremediation ex plantaと呼ばれている¹⁾。根圏土壌中の微生物数は根圏以外の土壌中の微生物数と比べ、非常に多いことが知られている⁷⁾。これによって、土壌中の有機性有害物質の分解を促進することができると考えられる。根圏の微生物数が増える理由としては、植物から分泌する物質が微生物にとって栄養源になることが考えられている。また、植物が根圏土壌中に酸素を供給するため、有機汚染物に対して好気性の分解を促進することも考えられている³¹⁾。

さらに、植物からは多様な分解酵素(エステラーゼ、チトクロームP450、アミダーゼ等)が分泌される。これらの酵素の働きによるTNT、トリクロロエチレン、PAHs、PCB等難分解性有機汚染物の分解が挙げられる¹⁰⁾、²⁰⁾、³²⁾。

4 ファイトレメディエーションの研究応用状況

ファイトレメディエーションの歴史は短いですが、米国を始め、ヨーロッパ、日本、カナダ、中国等諸国で盛んに研究開発が行われており、その一部が実用化されている。これには多く

の民間企業が参入しているのみならず、政府、大学、研究機関も関わっている²⁾、³³⁾。

現在、ファイトレメディエーションによる修復対象とする有害物質は、汚染金属元素、半金属元素(ヒ素等)、石油系炭化水素化合物、農薬、爆薬、塩素系溶媒等が確認されている(表4)。

表4 ファイトレメディエーションによる処理可能な物質

無機化合物		有機化合物	
金属	B, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se	塩素物	TCE, PCE, PCB, ビレン、MTBE等
放射物	Cs, U, ³ H, Sr	爆発物	DNT, TNT, RDX等
その他	As, ClO ₄ , F, Na, NH ₄ ,	石油系炭水化合物	BTEX, TPH等
		木材防腐剤	PCP, PAHs等
		農薬・殺虫剤	アトラジン、ベンタゾン、DDT, 2,4-T等

4.1 無機物汚染土壌のファイトレメディエーションの現状

無機汚染物質、特に重金属類のファイトレメディエーションは、植物に備わった耐性・吸収・蓄積能力を用いた最も成功した浄化例として認められている。現在、Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Cu, Fe, Co等重金属、U, Cs等放射性物質及びホウ素、砒素等の無機物が修復の対象となっている。特に、1980年代から、重金属高蓄積植物に関する研究が活発に行われてきた。

重金属高蓄積植物は組織内で普通の非蓄積性植物より100倍以上の蓄積能力がある植物種と定義され、これらの植物体内の重金属濃度はHgにおいては10ppm、Cdにおいては100ppm、Co, Cr, Cu, Pbにおいては1000ppm、Zn, Niにおいては10,000ppm以上になるとのことである⁴⁾。現在、少なくとも45科約400種の重金属高蓄積植物が報告されている。例として、重金属高蓄積植物及びその蓄積能力を表5に示した。これらの多くは、すでに米国で産業化されている³³⁾。

新しい発見は近年も続いている。例えば、フロリダ大学のマー博士の研究グループは、効率的にヒ素を吸収するシダの一種及びその効率的な吸収方法を発見した。実験によると、学名をポテリス・ビタータ(*Pteris vitatta*)というシダの一

表5 重金属高濃度濃縮植物種及び蓄積能力

植物種	金属	蓄積濃度(ppm)
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn, Cd	51,600, 18,000 ²³⁾
<i>Ipomea alpina</i>	Cu	12,300 ²³⁾
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Co	10,200 ²³⁾
<i>Astragalus racemosus</i>	Se	14,900 ⁴⁾
<i>macadamia neurophylla</i>	Mn	51,800 ²³⁾
<i>Psychotria douarrei</i>	Ni	47,500 ²³⁾
<i>Thlaspi rotundifolium</i>	Pb	8,200 ²³⁾

種では組織内のヒ素の濃度が汚染土壌の200倍ほど高かった。シダの葉中のヒ素濃度は20,000ppm以上にもなることがある。更に、シダはヒ素濃度が極めて低い土壌からでも吸収して、組織内に蓄積できることが分かった。シダがヒ素を蓄積する原因はまだ明らかにされていないが、シダがヒ素の吸収、組織内の分散、解毒に関する機構の研究が続けられている^{33, 34)}。

放射性物質のファイトレメディエーションについても、アブラナ科、アカザ科の植物、ヤナギ、ヒマワリ、トウモロコシを用いて実験が行われている。アカザ科の植物やその近縁種がCsに対する吸収特性が高いことが確認されている^{2, 10)}。植物の重金属や放射性物質の蓄積メカニズム等は、まだよく分かっていないが、取り込まれた重金属イオン等が細胞内のファイトキレチン、リンゴ酸、クエン酸、ヒスチジンなどとキレート化合物を形成し、無毒化・蓄積されると考えられている。

4.2 有機物汚染土壌のファイトレメディエーションの現状

植物栽培による外来性有機汚染物質の分解についても、特に80年代から種々の研究がなされている。現在、ファイトスティミュレーションによる汚染土壌修復は、農薬、TCE、石油、TNT、PAHs、PCP、PCBsなど多くの有機汚染物に対して有効であることが様々な実験室やフィールド試験から確認されており^{5, 20)}、米国やヨーロッパで産業化が進んでいる²⁾。

有機物汚染土壌のファイトレメディエーションについては、比較的早くからイネによるパラチオンの分解³⁵⁾、カヤツリグサ科の*Cyperus esculentus*等によるTNTやRDX等の分解¹⁰⁾が知られている。近年、農薬、石油系炭化水素化合物、TCE等汚染物質の修復には、草本や木本植物を利用する修復が、よく研究されている。PCB、DDT、ダイオキシン類等難分解性化合物について、植物は一般に分解能力がないとされているが、ある植物(クワ、リンゴ、ニセアカシア等)の根がPCB分解菌の成長を促進するフェノール化合物を分泌することが見出されている^{20, 36, 37)}。Fletcher と Hedge³⁶⁾は、フェノールを分泌する17種類の植物をスクリーニングしており、環境修復への実際の利用が期待されている。また、植物の根から分泌される様々な有機物質分解酵素の利用や、ダイオキシン類等有機汚染物質の分解能力を持つ微生物の接種等による、浄化効果の向上に関する研究が注目されている。

表6は近年の研究例として、利用した植物、浄化対象物質

及び浄化効果を示した。ファイトレメディエーションによる有機汚染物質の汚染サイト修復の実際の応用は現在初期の段階にある。その浄化効果及び応用レベルは重金属の浄化に比べてまだ低い。

5 今後の展開

ファイトレメディエーションが米国やヨーロッパ等で注目される大きな理由の一つは、低い修復コストである。1980年代、汚染土壌の修復のため、オランダは約15億ドル(US \$、以下同じ)、ドイツは60億ドルを投資した。1990年代、米国は100億以上ドルを投資した。Cooksonら³²⁾によって、21世紀には、汚染土壌の修復のため、全欧で1.33兆ドルを投資しなければならないと言われている。

従来の物理化学的方法による汚染土壌の修復コストは、平均で一つの汚染地域に1,600~2,500万ドルの巨額の費用が必要である。米国ではCERCLA法を制定してから約20年経ったにもかかわらず、実際には汚染土壌の修復はほとんど進展していなかった。その最大の理由は、汚染土壌の修復には巨額の費用がかかることである。その後、米国では汚染土壌の修復を徹底するために経済合理性を重視する方向に方針が転換された。

このため、微生物や植物等生物利用による環境修復の技術の研究開発が進められた。このような修復技術は物理・化学的処理に比べ、低コストで原位置処理も可能となっている。中でも、植物を利用したファイトレメディエーションは、社会の同意が得易い自然な浄化過程(Natural processes)と言われ、注目されている。

現在、世界のファイトレメディエーションは科学技術としての成長だけでなく、産業としても成長している^{22, 33)}。米国でのファイトレメディエーションの市場総額は1999年には30~49百万ドル、2000年には50~86百万ドル、2002年には100~170百万ドルであり、2005年にはほぼ2000年の5倍に成長し、235~400百万ドルになると見積もられている(図3)。

環境規制が厳しくなりつつある日本でも将来性を有望視されている。1999年の日本市場は1億円と見られており、2005年には約8億円になるとみなされる(図4)。また、このまま生長すると仮定として、2020年には約250億円規模になると予測されている³³⁾。

現在、ファイトレメディエーションについての研究は主に米国、カナダ、ヨーロッパで行われている。しかし、ファイトレメディエーションの国際市場を考えると、ロシア、アジアやラテンアメリカの多く国で不適正な埋立てによるごみと廃水の処理が行われているため、大きな修復市場があると見られている。今後の土壌浄化技術にはファイトレメディエーションが重要な役割を占め、国際間の協力が必要不可欠である。

今までの研究及び将来のニーズに基づいて考察すると、

表6 ファイトレメディエーションによる有機汚染土壌修復の適用・研究事例

対象物質	植物	試験規模(地点)	結果概要・参考文献
石油 (PAH)	クロバー	野外修復(米国)	明らかに分解効果があった ³⁸⁾ 。
ディーゼル油、原油	イタリアンライグラス、フェスキュ	ポット試験(米国)	ディーゼル油及び原油土壌の修復率は対象標準のそれぞれ207及び209%を示した ³⁹⁾ 。
木材防腐剤 (PCP、PAH)	ペレニアルライグラス	温室試験(米国)	栽培区は64日間でPCPが57%、PAHが90%減少し、対照区より顕著に高かったが、258日後栽培区と対照区は有意差がなかった ⁴⁰⁾ 。
石油 (PAH)	トウモロコシ、白色クローバ	野外修復(イタリア)	汚染サイト内の作物の中にトウモロコシと白色クローバの浄化能力は最高となった ⁴¹⁾ 。
PCB、TNT、ピレン	イネ科・マメ科植物(リードカナリーグラス、スイッチグラス、トールフェスク、メドハギ等)	温室試験(米国)	6ヶ月後PCBの減少率は、リードカナリーグラス、スイッチグラスとレンリソウ属による49%、トールフェスク、キビ属とメドハギによる36%であって、TNT、ピレンは植栽無しを含め、97%以上になった ⁴²⁾ 。
TNT	メドブロムグラス、ハルガヤ、ペレニアルライグラス	実験室(米国)	白色腐朽菌を接種したメドブロムグラスはTNTレベルを対照地の30%まで低下させた ⁴³⁾ 。
PAH	ライグラス	ポット試験(フランス)	根圏での生物分解による36~66%のPAHが消失した。VA菌接菌の接種によって分解の促進が可能である ⁴⁴⁾ 。
石油系化合物	バミューダグラス、トールフェスク、ホワイトクローバ	フィールド実験(米国)	植生区は24ヶ月でTPHが40%以上、フルオレンが58-100%減少し、対照区より顕著に高かった ⁷⁾ 。
石油系化合物	バミューダグラス、トールフェスク	温室試験(米国)	無機施肥による浄化効果の促進効果を示した ⁴⁵⁾ 。
ディーゼル油	ペレニアルライグラス	実験室(ニュージーランド)	102日間でのTPH減少率は、グラス栽培処理は約60%、対照より著しい高かった ⁴⁶⁾ 。

ファイトレメディエーションに関する主要な課題は以下のよう
に考えられる。

- ①植物の重金属を高度に蓄積するメカニズムについての研究及び重金属に対して高濃度蓄積能を持つ植物の開発(ここでは、遺伝子組み換え技術を利用し、重金属耐性植物の育成が今後の重要な課題である。また、根については微生物によって可溶化された重金属を吸収し茎葉部へ輸送する重要な役割があり、今後は重金属の複合やPCB等有機汚染土壌における根の吸収性・分解性の解明が期待される)。
- ②植物における汚染物質の修復能力と環境条件の関係。
- ③有用植物と有用微生物の組合せシステムの構築等によ

る効率的な汚染土壌修復技術の確立。

- ④ファイトレメディエーションの修復過程及び汚染物の分解に関する数学的モデルの構築やリスクアセスメントに関する研究。

6 おわりに

環境問題は人類に課せられた21世紀の緊急の課題であり、工業や農業等の産業活動に由来する種々の合成化学物質、石油、重金属などは、深刻な環境汚染を引き起こしている。この中、上述のように、ファイトレメディエーションは、将来最も有望な修復技術の一つとして注目されている。

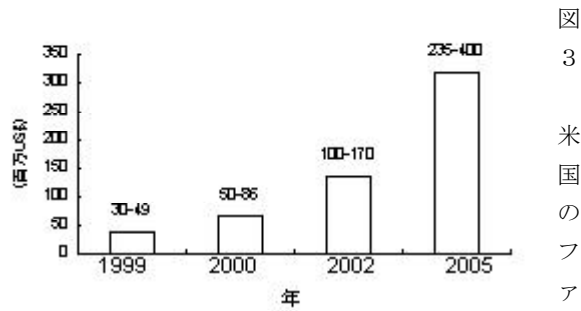


図3 米国のファイトレメディエーションの市場予測²²⁾

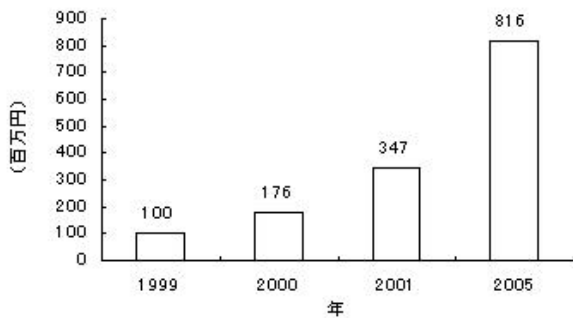


図4 日本のファイトレメディエーション市場予測³³⁾

ファイトレメディエーションは技術としてはまだ発展の初期段階であり、修復対象汚染物質及び適用植物種の範囲の拡大、処理能力の向上が必要であるものの、大きな発展性を有すると考えられる。今後は、重金属類や有機汚染類等を対象に、遺伝子工学や他の修復技術との組合せ等を活用して、安全かつ効率的なファイトレメディエーション技術の構築を進めることは重要である。環境修復ビジネスは、米国やヨーロッパ巨大な市場がすでに形成されており、世界中に拡大している。

日本の土壤環境汚染対策技術の現状を見ると、最終処分場の不足といった課題があり、汚染土壌をオンサイトかつ低コストで処理するための技術開発を強化することが重要であると考えられる。また、土壤対策法の導入を契機に土壤汚染の浄化ケースが増大することになり、より安価なコストで短期間に処理することが一層重要となってくる。さらに、広範囲にわたり微量に存在する有害な内分泌攪乱化学物質汚染の処理は、物理・化学的処理など従来技術の対応が困難である。

このように考えると、ファイトレメディエーション技術の確立に向けた研究の推進が望まれる。また、日本において、ファイトレメディエーションの産業化のために、米国やヨーロッパ等諸国での研究開発等を参考として、日本の環境に適した技術導入が必要と考えられる。今後、日本におけるファイトレメディエーション研究開発および産業化の推進の展開が注目される。

謝辞

五井邦宏氏(当センター企画室)、橋本大吾博士(東京農工大学)から有益なご意見を頂きました。また、本調査の一部は中国国家自然科学基金(#29807002)及び中国教育部青年骨幹教師計画により行いました。記して深く感謝の意を表します。

文献

- 1) Salt, D.E., Smith, R.D. and Raskin, I. (1998) Phytoremediation, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Bio.*, 49, 643-668.
- 2) Lelie, A.V.D., Schwitzguebel, J.P., Glass, D.J., Vangronsveld, J. and Baker, A.A. (2001) Assessing phytoremediation progress in the United States and Europe, *Environ. Sci. Technol.*, 35(21), 446-452.
- 3) In situ remediation of contaminated soil by plants "PHYTO-REM" web site (<http://www.ensaia.u-nancy.fr/Recherche/solenviro/phytoform.htm>)
- 4) Lasat, M.M.(2002) Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms, *J. Environ. Qual.*, 31, 109-120.
- 5) Anderson, T. A. (1993) Bioremediation in the rhizosphere, *Environmental Science and Technology*, 27(13), 2630-2635.
- 6) Cunningham, S.D. and Berti, W.R. (1993) Phytoremediation of contaminated soils: Progress and Promise. 205th National Meeting, American Chemical Society, 265-268.
- 7) Fiorenza, S., Oubre, C.L. and Ward, C. H. (2000) Phytoremediation of Hydrocarbon-contaminated Soil, CRC Press LLC.
- 8) Li, F. Y. and Zang, S. L.(2003)Bioremediation of contaminated soil, *Chinese Journal of Ecology*, (1), 35-39.
- 9) Adam, G. and Duncan, H. (2002) influence of diesel fuel on seed germination, *Environmental Pollution*, 120, 363-370.
- 10) 吉原利一, 後藤文之, 増田太郎(2000)植物による環境修復(1)ー現状と遺伝子工学の適用に関する調査, 電力中央研究所我孫子研究所報告, U00022, 1-36.
- 11) 内藤克彦 (2002) 土壤汚染対策法について, *環境研究*, 127, 28-39.
- 12) 佐藤男也 (2001) 土壤汚染の顕在化と対策, *環境研究*, 122, 96-103.
- 13) JFEの環境ソリューションホームページ(<http://e-solution.jfeholdings.co.jp/kankyo-q/q3-1.html>)
- 14) Hawkes, H.E., and Webb, J.S.(1962)Geochemistry in Mineral Exploration, Harper and Row.
- 15) 森川弘道(2002) ファイトレメディエーションによる環境保全・修復の新展開, *環境科学情報*, 31-1, 30-36.
- 16) Kumar, P. B., Dushenkov, A. N. and Motto, H. (1995) Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils, *Environ. Sci. Technol.*, 29(5), 1232-1238.

- 17) Radwan, S. (1995) Oil biodegradation around roots, *Nature*, 376(27), 302.
- 18) 土肥哲哉(1997) Phytoremediation? 植物根の意外な可能性について, 根の研究, 134-136.
- 19) Utsunomiya, T.(1980)Japanese patent Application Publication, Kokai: 57-190, Application number 55-72959.
- 20) Alkorta, I. And Garbisu, C. (2001) Phytoremediation of organic contaminants in soils, *Bioresource Technology*, 79, 273-276.
- 21) 孔繁翔、尹大強、嚴国安 (2000) 環境生物学, 高等教育出版社, 361-367.
- 22) Glass, D.J. (1999) U.S. and International Markets for Phytoremediation,1999-2000, D. Glass Associates, Inc., Needham, Massachusetts, U. S. A.
- 23) 高野博幸, 丸田俊久(2000)Phytoremediation: 植物利用による環境修復技術, 太平洋セメント研究報告, 138, 73-80.
- 24) Watanabe, M. E. (1997) Phytoremediation on the brink of commercialization, *Environ. Sci. Technol.*, 31(4), 182-186.
- 25) Doloress, G., Nikolai, V. B. and Ludmyla, G. B. (1999) Use of plant roots for phytoremediation and molecular farming, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(11), 5973-5977.
- 26) Cuningham, S.D.(1995)Phytoremediation of contaminated soil: *Trend in Biotechnology*, 13(9), 393-397.
- 27) Evans, C.S., Asher, C.J. and Johnson, C.M. (1968) Isolation of dimethyl diselenide and other volatile selenium compounds from *Astragalus racemosus*(Pursh), *Aust. J. Biol. Sci.* 21, 13-20.
- 28) Terry, N. and Zayed, A.(1998)Phytoremediation of selenium, *in Environmental Chemistry of Selenium*, edited by William T. Frankenberger, Jr. and Richard, A.E. and Marcel Dekker, Inc., New York, 633-655.
- 29) Martin, A.(1999)Biodegradation and bioremediation, *Academic Press*, 377-391.
- 30) Puri, R. K., Ye, Q.P., Shubender, K., William, R. L. and Puri,V.(1997)Plant uptake and metabolism of polychlorinated biphenyls (PCBs), *Plants for environmental studies*, CRC Press.
- 31) Walton, B. T. and Anderson, T. A. (1992) Plant-microbe treatment systems for toxic waste, *Current Opions in Biotechnology*, 3, 267-270.
- 32) Cookson, J. R. (1995) *Phytoremediation engineering: Design and application*, McGraw-Hill, Inco., New York.
- 33) 月刊エコインダストリー編集部 (2001)ファイトレメディエーション市場, 月刊エコインダストリー, 6(5), 40-45.
- 34) Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y. and Kenelley, E.D. (2001) A fern that hyperaccumulates arsenic, *Nature*, 409, 579.
- 35) Redd, B.R. and Sethunathan, N.(1983)Mineralization of parathion in the rice rhizosphere, *Appl. Environ. Microbiol.*, 45, 826-829.
- 36) Fletcher, J.S. and Hedge, R.S. (1995) Release of phenols by perennial plant roots and their potential importance in bioremediation. *Chemosphere* 31, 3000-3016.
- 37) 日本土壌肥料学会 (2000) 植物と微生物による環境修復, 博友社.
- 38) Banks, M.K., S. Pekarek, K. Rathbone and A.P. Schwab. (1997) Phytoremediation of petroleum contaminated soils: Field assessment,. In:Hinchee, R.E. et al.(eds.), 4th Battelle Memorial Institute in situ and on-site bioremediation international symposium (New Orleans, April 28-May 1), Vol3, 305-308.
- 39) Reynolds, C.M., Koenen, B.A., Carnahan, J.B., Walworth, J. L. and Bhunia, P. (1997)Rhizosphere and nutrient effects on remediating subarctic soils, *In Situ On-Site Bioremediat*, 4 (1), 297-302.
- 40) Ferro, A., Kennedy, J. and Knight, D. (1997) Greenhouse-scale evaluation of phytoremediation for soils contaminated with wood preservatives, *In Situ and in-site Bioremediation*, 4(3), 309-314.
- 41) Porta, A., Filliat, N. and Plata, N.(1999) Phytotoxicity and phytoremediation studies in soils polluted by weathered oil, *Phytoremediation Innov Strateg. Spec. Remedial Appl.*, 51-55.
- 42) Dzantor, E.K., Chekol, T., and Vough, L.R.(2000)Feasibility of using forage grasses and legumes for phytoremediation of organic pollutants, *J. Environ. Sci. Health Part A*, 35(9), 1645-1661.
- 43) Siciliano, S.D. and Greer, C.W. (1999)Plant-bacterial combinations to phytoremediate soil contaminated with high concentrations of 2,4,6-Trinitrotoluene, *J. Environ. Qual.* 29, 311-316.
- 44) Binet, P., Portal, J.M., and Leyval, C. (2000) Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the rhizosphere and mycorrhizosphere of ryegrass, *Plant Soil*, 227(1/2) 207-213.
- 45) Hutchinson, S.L., Banks, M.K.and Schwab, A.P.(2001)Phytoremediation of aged petroleum sludge: Effect of inorganic fertilizer, *J. Environ. Qual.* 30, 395-403.
- 46) Hou, F.S.L., Mike, M.W., Leung, D.W.M. and Macpherson, D.J. (2001) Variations in phytoremediation performance with diesel-contaminated soil, *Environ. Technology*, 22, 215-222.

Phytoremediation of Contaminated Soil

Xiaoju WANG, Fayun LI, Masanori OKAZAKI and Mitsuo SUGISAKI

Abstract

Soil contamination from various organic and inorganic pollutants has been attracting considerable public attention world-wildly over the last decades. Enormous cost and other reasons, however, have made the traditional physicochemical soil restoration methods difficult to meet the needs in treating current soil contamination problems. Phytoremediation is a technology that uses plants to remove, destroy or sequester hazardous substances from the environment. It has been regarded as one of the most promising technologies that are seeing increased use to restore contamination sites, and has attracted extensively substantial interest. In this review, we discussed phytoremediation on its mechanisms, research and application status, and potential development and research priorities in the future.

Phytoremediation of various heavy metal-polluted soils have been well studied, and so far, more than 400 plant species have been found to be available for accumulated heavy metals, and most of these plants are commercially used in site remediation. Phytoremediation of organic pollutants is also receiving more and more attention, and some positive results on phytoremediation of soils contaminated with organic compounds have been obtained. Although on-site application is still comparatively small, phytoremediation is becoming increasingly popular as an unobstructive and cost-effective remediation strategy.

Numerous nonprofit research groups are currently conducting research on phytoremediation, and many companies are using it commercially. As Japan is strictly regulating its environmental contamination countermeasures, phytoremediation will also be an increasing field for research and business. An urgent need exists on developing high-efficiency phytoremediation systems through finding new high-remediation plants and microbes, better understanding and exploiting the interactions among plants, microorganisms and pollutants (especially the organic xenobiotics), application of microbe-plant combination and genetic engineering technology.

Key words: Soil contamination, phytoremediation, hazardous substances, rhizosphere, plant, heavy metal, organic pollutant