

# 土壌汚染と農産物

## ～植物を用いた農地の修復技術の実用化に向けて～

自然環境担当 王 効拳

### 1 はじめに

土壌は食糧生産と生態系機能維持の要として貴重な資源です。日本では、農地を中心として鉱山開発等に起因した重金属による土壌汚染及びそれによる健康被害が報告され、その一つであるイタイイタイ病はカドミウムにより神通川流域の土壌が汚染されたことによる深刻な公害問題として知られています。その後、法律の整備や様々な対策が図られ、国内では農地における問題は限定的なものになりました。しかし、アジアの諸国では、近年、急激な経済の発展に伴い、重金属等の有害物質による農地等の土壌汚染が深刻化しています<sup>1,2)</sup>。現在、中国では2,000万haの農地（日本農地総面積の約4.3倍）が汚染され、年間1,200万トン（日本のコメ消費総量の約1.6倍）の食糧が汚染によって廃棄されています<sup>2,3)</sup>。

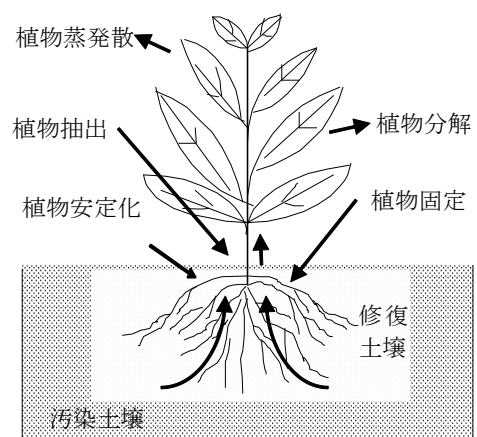
土壌が汚染されると、汚染物質が土壌中に長期間残留し、農産物などの植物が土壌の有害物質を吸収するため、農産物が汚染され、農産物の減産、地表水・地下水汚染にもつながります。これらの結果、人の健康被害、経済的損失なども引き起こすリスクが高くなります。このため、汚染された土壌、特に広範囲に及ぶ汚染土壌については、資源として有効利用しつつ効率的に修復する手法の確立が重要な課題となっています<sup>4)</sup>。

汚染土壌の処理・処分方法には、掘削除去及び最終処分場への埋立や化学薬剤による固定化・不溶化等があります。しかし、これらは土壌機能の破壊や汚染土壌を廃棄物として処理することなどによる二次汚染の懸念があり、また、巨額な処理費用が必要になります。当センターでは、近年、低コスト・低環境負荷型の汚染土壌修復技術として、植物の有する汚染物質の吸収・蓄積・分解などの機能を利用した修復技術（ファイトレメディエーション）を研究しています。ここでは、このファイトレメディエーション技術の実用化に向け、現在、実施している研究の概要について紹介します。

### 2 ファイトレメディエーションについて

ファイトレメディエーションとは、植物が光合成を行いながら成長する過程で、根や気孔から水分や養分を吸収、蓄積、分解、固定する能力を利用して、土壌や水、大気中の汚染物質を除去する技術です（図1）<sup>5)</sup>。排ガスなどによる二次汚染がなく、自然環境に調和し、低コスト・省エネルギーな技術であり、周辺生態環境の改善、地球温暖化防止などの地球環境保全にも役立つクリーンな技術です。しかし、処理効率が低く、修復に長い期間が必要であるなどの欠点もあり、利用に適した条件を設定する必要があります。

ファイトレメディエーションの汚染環境修復への体系的な研究開発は、1970年代から発展してきました。現在は、欧米を始め、日本、中国、オーストラリア等で精力的に研究が進められ、多くの民間企業も開発に



参入しています<sup>1,4)</sup>。ファイトレメディエーションが修復対象とする有害物質としては、金属(カドミウム、鉛、銅、亜鉛等)、半金属(ヒ素等)、放射性物質、石油系炭化水素化合物、農薬等が確認されています。また、重金属を高濃度に蓄積する植物に関する研究が活発に行われてきました。重金属高蓄積植物は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水銀においては 10ppm、カドミウムにおいては 100ppm、クロム、銅、鉛においては 1,000ppm、亜鉛、ニッケルにおいては 10,000ppm 以上になるとの報告があります<sup>1)</sup>。これまでに、少なくとも 45 科、約 400 種の重金属高蓄積植物が報告され、これらの発見の多くは、特許により保護されています<sup>1)</sup>。

しかし、ファイトレメディエーションは、広範に実用化されるまでには至っていません。その原因として、①他の技術に比べて修復効率が低く、修復に長い期間を要すること、②トータルコストは低いですが修復期間には収入(利益)が得られないことが挙げられています。従来のファイトレメディエーションは、重金属高蓄積植物等の特殊な植物(専用植物)を開発し、汚染土壤に栽培した後に、収穫した植物を焼却処理するものです。このような特殊な植物は一般に高価であり、収穫後の焼却処理にはさらに処理コストがかかります。このため、汚染土壤のファイトレメディエーションの実用化を促進するには、修復効率の改善だけでなく、修復期間における収益性の確保が非常に重要な課題となっています。

### 3 収益型ファイトレメディエーション技術の構築

#### 3.1 研究目的

本研究では、汚染土壤の効率的な修復と有効利用を同時に実現するため近年注目されている低コスト・低環境負荷型のファイトレメディエーション技術を利用し、この手法の課題を克服するために改良することを目的としました。そこで、専用植物の代わりに、高付加価値の資源植物の活用による新たな「収益型のファイトレメディエーション技術」(図2)の構築を目指します。資源植物

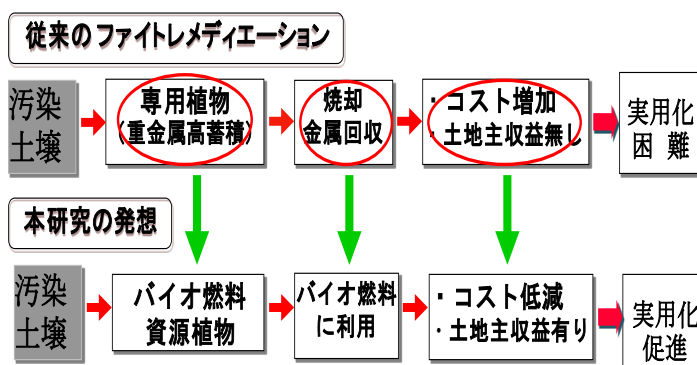


図2 従来のファイトレメディエーションと本手法の比較

としては、バイオ燃料の原料等として利用可能な植物を利用します。収穫した植物は、焼却処分ではなく、バイオ燃料の原料として利用することで、土地所有者は修復期間中でも安定した収益を得ることができる仕組みとなります。

#### 3.2 研究方法

##### 3.2.1 実験場所

日本国内では、本手法の検討に適切な土壤汚染地が確保できないこと、また、前述のように中国では実際に土壤汚染修復が喫緊の課題となっていることから、本研究では、中国の土壤汚染地を対象として選定しました。中国の研究機関と連携して、中国の中西部にある山西省、東部の上海市、東北部の吉林省で、資源植物を用いた現場栽培試験を行いました。

##### 3.2.2 資源植物における土壤修復効果の評価-専用植物との比較

現場栽培試験に先立ち、本手法を確立するため、現地で通常栽培されている植物について、その重金属の蓄積性を水耕栽培及び汚染土壤ポット栽培で試験しました。検討した植物は、資源植物として

はトウモロコシ、ヒマワリ、また専用植物として報告されている鶏眼草(*Kummerowia striata*; KS)と銅草(*Elsholtzia haichouensis sun*; ES)です。これら植物の地上部における、鉛、銅、カドミウム等の重金属蓄積性を比較し評価しました。

### 3.2.3 資源植物を用いた収益型修復技術の構築の現場試験

中国の研究機関と連携した現場栽培試験の例を紹介します。図3は山西省の試験現場でトウモロコシやソルガム(コーリャン)等の資源植物を栽培したときの様子です。収穫した植物は、根、茎、葉、実などの部位ごとに区分して重金属濃度を測定しました。部位ごとの乾燥重量に重金属濃度を乗じ、植物が土壌から吸収した重金属量を算出して、浄化効果を評価しました。また、植物の生育状況、植物体内の重金属蓄積特性を解明し、収益性について検討して、各地域における汚染土壌の浄化に適する資源植物を抽出しました。



図3 山西省現場試験の様子

## 3.3 研究結果

### 3.3.1 資源植物における土壌修復効果の評価

本実験で使用した資源植物であるトウモロコシとヒマワリは、専用植物のESとKSに比べ生育力に優れており、修復能力を表す土壌単位面積あたりの植物の地上部の重金属蓄積量は専用植物に劣っていませんでした(表2)。特にヒマワリの蓄積量はESとKSに比べ数倍高いことが明

表2 植物の地上部における重金属蓄積量  
( $\mu\text{g}/\text{pot}$  平均値 $\pm$ 誤差)

	鉛	銅	カドミウム
トウモロコシ	10.8 $\pm$ 1.1	6.06 $\pm$ 0.62	4.50 $\pm$ 1.28
ヒマワリ	60.6 $\pm$ 18.6	20.7 $\pm$ 2.5	29.1 $\pm$ 3.9
ES	27.2 $\pm$ 2.6	5.09 $\pm$ 1.61	5.56 $\pm$ 0.61
KS	8.46 $\pm$ 0.94	3.08 $\pm$ 0.95	3.76 $\pm$ 0.38

ES: 銅草、KS: 鶏眼草

らかにになりました。従って、専用植物を用いた従来のファイトレメディエーションの代わりに、バイオ燃料用資源植物の利用が有望な手法であることが示されました<sup>6)</sup>。

### 3.3.2 資源植物を用いた収益型修復技術の構築の現場試験

山西省の試験例では、植物の全バイオマス量は、トウゴマ>ソルガム=トウモロコシ>ヒマワリ=油ヒマワリ=大豆>菜の花>落花生の順でした(図4)。バイオ燃料として利用しやすい実の収穫量は、トウモロコシとソルガムが最も高い値でした(図4)。ソルガムはニッケル(Ni)、銅(Cu)、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、亜鉛(Zn)、ヒ素(As)、クロム(Cr)に対する蓄積量が最も高いことが分かりました(表3)。トウモロコシとトウゴマも高い蓄積量が示されました。詳細なデータは示していませんが、植物体内の地上部各部位の重金属蓄積量は一般的に茎と葉も高い値でした。また、上海市における実験では、ヒマワリ、菜の花の生育量が大きく、重金属の蓄積量も高いことが明らかになりました。吉林省においては、トウモロコシの収穫量、重金属に対する蓄積量が高いという結果でした。

以上のように、植物のバイオマス量、実の収穫量、修復能力を表す重金属蓄積量は植物の種類及び地域により大きな差がありましたが、三地域の汚染土壌において、それぞれ適切な修復用資源植物の種類が明らかになりました。これにより、ソルガム、トウモロコシ、菜の花、ヒマワリ等は重金属の蓄積性が相対的に高く、バイオ燃料の原料として利用可能なことから収益性が期待できるため、汚染土壌の修復と有効利用に活用できると考えられます。

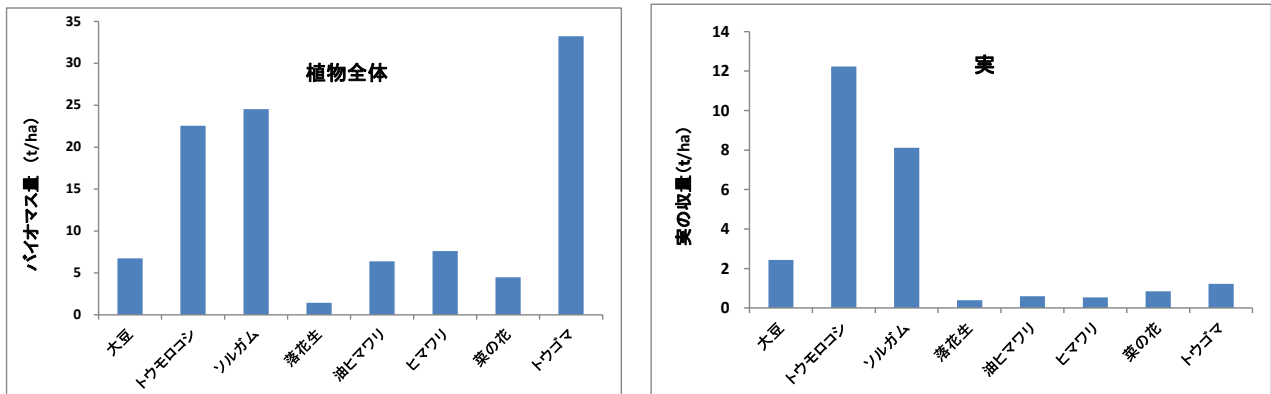


図4 山西省試験区における資源植物のバイオマス量と実の収量

表3 山西省試験区における植物地上部の重金属蓄積量 (g/ha)

	ニッケル	銅	カドミウム	鉛	亜鉛	ヒ素	セレン	クロム
大豆	22	76	0.8	11	216	313	5.1	75
トウモロコシ	44	141	1.9	20	512	1010	7.4	219
ソルガム	76	220	5.7	46	819	1050	8.5	250
落花生	8.4	28	0.5	2.1	63	48	1.2	15
油ヒマワリ	24	127	2.7	11	268	172	4.3	47
ヒマワリ	78	166	2.8	20	280	216	4.0	92
菜の花	31	101	2.1	12	187	146	5.4	50
トウゴマ	59	155	1.0	27	708	673	13.7	181

本研究の結果から、従来のファイトレメディエーション技術を改良した「収益型のファイトレメディエーション技術」の有効性が期待できます。将来、本研究で開発した技術を、農地の土壌汚染に有効な対策方法として普及させることで、農地資源と食糧の確保、農家の収益性の確保、生態環境保全、人の健康保護、持続可能な社会の構築、海外の汚染土壌の修復支援に貢献していきたいと考えています。

## 謝辞

本研究の一部は（独）日本学術振興会科学研究費（課題番号：23405049）の助成を受けて実施しています。山西農業大学資源環境学部、上海大学環境と化学工学部、中国吉林省農業環境資源研究センターから多大なご協力をいただきました。記して感謝いたします。

## 文献

- 1) 王効挙 (2007) ファイトレメディエーションによる汚染土壌の改善技術の現状と課題. 都市緑化技術, 63, 31-34.
- 2) 西村実 (2012) 中国における土壌汚染対策の現状と日系企業のビジネスチャンス. 日中環境産業, 48, 48-53.
- 3) 如月隼人 (2013) 中国カドミウム米 10%が基準超、耕地 2000 万 ha 重金属汚染, Search China.
- 4) Oh K., Li T., Yonemochi S. *et al.* (2013) Development of profitable phytoremediation of contaminated soils with biofuel crops. Journal of Environmental Protection, 4, 58-64.
- 5) 孔繁翔、尹大強、嚴国安 (2013) 環境生物学, 高等教育出版社, 361-367.
- 6) Oh K., Li T. *et al.* (2013) Study on tolerance and accumulation potential of biofuel crops for phytoremediation of heavy metals. IJESD 4(2), 152-156.