

植物を用いた汚染土壌の環境修復について*

井上 和幸**・岡田 真規子**・深山 敏明**

キーワード ①ファイトレメディエーション ②土壌汚染 ③鉛 ④ヒ素

要 旨

土壌汚染の事例が多い鉛およびヒ素に着目し、ファイトレメディエーションによるこれら有害物質の除去効率や植物による汚染原因物質の集積メカニズムについての研究を実施した。鉛またはヒ素の汚染土壌にカラシナ、ソバ、ヒマワリおよびライムギを生育した結果、鉛の集積濃度については4種類の植物で10~23mg/kgであり、ソバがもっとも高かった。また、ヒ素の集積濃度は4種類の植物で1.4~4.3mg/kgであり、ライムギがもっとも高かった。ヒマワリによる鉛の部位別集積濃度を測定し、葉・茎ともに地上に近い部位に集積されるとの知見を得た。また、ライムギによるヒ素の結果では、穂や茎に比べて葉により多く集積されるとの知見を得た。

1. はじめに

近年、土壌汚染状況調査や地下水調査等により、鉛などの重金属類やトリクロロエチレンなどの揮発性有機化合物による土壌汚染が顕在化している。環境省の調査結果¹⁾によれば、法に基づかないものも含めた土壌汚染調査事例は平成20年度末現在で8,965件であった。そのうち特定有害物質が基準を超過した事例は4,706件であり、なかでも鉛、ヒ素による汚染事例が多い。

平成22年4月に改正土壌汚染対策法が施行され、土地の形質変更時にも土壌汚染状況調査が必要に応じて求められることとなり、調査の契機が増えた。また、汚染が自然的原因によるものも法規制の対象となり、土壌汚染の事例はさらに増加する傾向となっている。

ファイトレメディエーションとは、植物が生育する際に水分や養分を吸収する働きを利用して、

土壌中から有害物質等を抽出除去する技術である。これは、汚染土壌の掘削除去技術に比べて有害物質等の除去効率は高くないが、浄化の際に必要な燃料等のエネルギーが少ないため、除去費用を抑えることができる²⁾。現在では、重金属類を高濃度に集積する植物がいくつか発見されており、たとえば、モエジマシダを用いたヒ素の浄化は実用段階に入りつつある³⁾。一方、修復の対象となる汚染土壌としては、市街地の客土等に使用される山林土壌などが想定されるため、これらの土壌に係るファイトレメディエーション活用可能性などの知見蓄積が望まれる。

当センターでは、鉛およびヒ素を添加した模擬汚染土壌を用いた植物の生育試験を実施し、これらの有害物質の除去効率や植物による汚染原因物質の集積メカニズムに係る若干の知見を得たので報告する。

*Study on Phytoremediation Against the Contaminated Soil

**Kazuyuki INOUE, Makiko OKADA, Toshiaki MIYAMA (石川県保健環境センター) Ishikawa Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science

表1 鉛またはヒ素を特異的に集積する植物(文献調査)

集積金属	科	和名	学名	集積能 (mg/kg)	文献
鉛	アブラナ科	カラシナ	<i>Brassica juncea</i>	34,500	4, 5)
	ナデシコ科	コバノツメクサ	<i>Minuartia verna</i>	11,400	4, 5)
	アブラナ科	ゲンバイナズナ	<i>Thlaspi rotundifolium</i>	8,200	2)
	キク科	ブタクサ	<i>Ambrosia elatior</i>	1,695	6)
	キク科	タンポポ	<i>Taraxacum officinale</i>	1,059	6)
	タデ科	ソバ	<i>Fagopyrum esculentum</i>	950	7)
	キク科	ヒマワリ	<i>Helianthus annuus</i>	540	7)
	イネ科	エンバク	<i>Avena sativa</i>	430	7)
	イネ科	トウモロコシ	<i>Zea mays</i>	375	8)
	ハゼリソウ科	ファセリア	<i>Phacelia campanularia</i>	300	7)
	ヒユ科		<i>Salsola vermiculata</i>	283.9	9)
	タデ科	ダツタンソバ	<i>Fagopyrum tataricum</i>	280	7)
	イネ科	ライムギ	<i>Secale cereale</i>	280	7)
	イネ科	オーチャードグラス	<i>Dactylis glomerata</i>	190	7)
	イネ科	スダックス(ソルガム×スーダングラス)		180	7)
	ヒユ科	ハマアカザ	<i>Atriplex colereii Maire</i>	176.1	9)
	イネ科	ギニアグラス	<i>Panicum maximum</i>	160	7)
	アオイ科	ケナフ	<i>Hibiscus cannabinus</i>	150	7)
	ムラサキ科	シャゼムラサキ	<i>Echium plantagineum</i>	147.4	9)
	イネ科	小麦	<i>Triticum aestivum</i>	139	8)
	タデ科	ミソソバ	<i>Persicaria thunbergii</i>	132	10)
マメ科	クロタラリア	<i>Crotalaria agatiflora</i>	130	7)	
イネ科	ベレニアルライグラス	<i>Lolium perenne</i>	120	7)	
イネ科	スーダングラス	<i>Sorghum sudanense (piper) Stapf</i>	120	7)	
アブラナ科	シロカラシ	<i>Sinapis</i>	100	7)	
ヒ素	キキョウ科	シーブスピット	<i>Jasione montana</i>	31,000	4, 5)
	イノモトソウ科	モエジマシダ	<i>Pteris vittata</i>	22,630	4)
	タデ科	ヒメスイバ	<i>Rumex acetosella</i>	195	11)
鉛およびヒ素	カヤツリグサ科	マツバイ	<i>Eleocharis acicularis</i>	Pb 133 As 731	12)

注：7)については、文献より著者らが改編

2. 試験概要

2.1 文献調査による植物の選定

文献調査により、鉛またはヒ素を特異的に集積する植物を選定し表1にまとめた。この中から、①個体の入手が容易であるもの、②個体の栽培・生育が容易であるもの、③石川県内で自生しているもの、または日常的に栽培されているものから8種類の植物を選定し(表2)、2.3以降の試験に用いた。

2.2 試験に供する土の選定

生育試験を行う土を選定するため、農林水産省通知¹³⁾に従って、コマツナを用いた栽培試験を実施した。内径11.3cm、高さ6.5cmのノイバウエルポットに表3に示す供試土壌(園芸用土)をそれぞれ150g入れ、これらにコマツナの種子20粒を播種し、各土壌中の水分を最大容水量に対して60%に保つよう減水分を補給しながら、3週間栽培した。その後、地上部を刈り取って、それぞれの発芽数、地上部の長さ、葉の大きさおよび生体

表2 生育試験に供する植物

科	和名	学名
アブラナ	カラシナ	<i>Brassica juncea</i>
タデ	ソバ	<i>Fagopyrum esculentum</i>
キク	ヒマワリ	<i>Helianthus annuus</i>
イネ	ライムギ	<i>Secale cereale</i>
アオイ	ケナフ	<i>Hibiscus cannabinus</i>
キキョウ	キキョウ	<i>Platycodon grandiflorus</i>
マメ	レンゲソウ	<i>Astragalous sinicus</i>
キク	ヨモギ	<i>Artemisia princeps</i>

重を計測した(表3)。

コマツナの生育が良好であったのは、培養土、混合土AおよびBであり、同様な生育状況であった。なお、腐葉土の割合が多いほど土壌分析の前処理が困難であることから、以下の2.3~2.6の試験では、腐葉土の割合がもっとも少ない混合土Bを用いることとした。

2.3 模擬汚染土壌での生育試験による植物の選定

鉛およびヒ素による生育阻害の状況を把握するた

表3 供試土壌の性質

土の種類	含水率 (%)	熱しやく減量 (%)	塩基置換容量*3 (me/乾土100g)	容積重 (g/風乾土500mL)	最大含水量 (乾土当たりの重量%)
赤玉土	27	9.2	23	310	75
腐葉土	24	67	55	160	226
鹿沼土	19	12	31	190	135
培養土	24	37	32	190	179
混合土A*1	25	—	42	240	151
混合土B*2	26	—	28	280	109

注 *1: 赤玉土:腐葉土:鹿沼土が3:6:1 (容積比)
 *2: 赤玉土:腐葉土:鹿沼土が6:3:1 (容積比)
 *3: CEC, 陽イオン交換容量ともいう

表4 発芽試験の結果

土の種類	発芽数	植物(地上部)		葉	生体重 (g/鉢)
		長さ(中央値)*1 (mm)	長さ(最大値)*1 (mm)	大きさ*2 (mm)	
赤玉土	16	25	40	10	0.20
腐葉土	18	45	60	13	2.55
鹿沼土	20	45	50	12	1.37
培養土	18	100	125	25	5.45
混合土A	20	90	110	20	4.31
混合土B	20	90	110	25	5.22

注 *1: 地表面から葉を立てた際にもっとも高い部位までの長さ(草丈)
 *2: 葉の長さを最も長くなるよう測定した位置における長さ

め、混合土Bに鉛またはヒ素を一定量添加して作成した模擬汚染土壌で生育試験を実施した。すなわち、混合土Bに硝酸鉛 $Pb(NO_3)_2$ または亜ヒ酸 H_3AsO_3 をそれぞれの金属の濃度が1,000mg/kg または100mg/kg となるよう添加した。高さ7.6cm, 容量360mlのポリエチレン製ポット, 混合土B 150g, これに8種類の種子6粒(ヨモギについては, 0.03g/鉢)を用い, 各土壌中の水分を最大含水量に対して80%に保つよう減水分を補給しながら, 屋外ビニールハウス内(図1)にて35日間栽培した。

生育期間終了後はそれぞれの植物を地表面で刈り取り, 「土壌, 水質及び植物体分析法¹⁴⁾」により, 80℃, 24時間乾燥し, 乾燥重量を求めた。また, 植物中の鉛およびヒ素の含有量は, 日本工業規格 K 0102の5.3により有機物質を分解した後, 鉛についてはICP発光分光分析法(パーキンエルマー社製 Optima 3300XL)またはICP質量分析法(アジレントテクノロジー社製7700x)にて, ヒ素については水素化物発生ICP発光分光分析法またはICP質量分析法にて行い算出した。それらの結果を表5に示した。

鉛1,000mg/kgの模擬汚染土壌では, キキョウ



図1 屋外生育試験用ビニールハウス

以外の植物7種類の生育が良好であった。ヒ素1,000mg/kgの模擬汚染土壌では, カラシナ, ケナフ, レンゲソウ, キキョウの発芽数が少なく, 発芽数が5個体以上確認された植物においても, 収穫された植物の乾燥重量が, ヒ素100mg/kgよりも少ないことから, ヒ素の濃度が1,000mg/kgの模擬汚染土壌では, すべての種類の植物の生育が不良であった。以上から, 2.4ではカラシナ, ソバ, ライムギ, ヒマワリを用いることとした。

2.4 鉛およびヒ素の植物への集積濃度の算出

カラシナ、ソバ、ライムギおよびヒマワリを、2.3と同様に調製した模擬汚染土壌を用いて(表6)、平成22年5月～6月(49日間)生育させ、生育

表5 生育試験の結果

植物の種類	項目	Pb(mg/kg)		As(mg/kg)	
		100	1,000	100	1,000
カラシナ	発芽数	6	6	6	0
	長さ(最大値)(mm)	105	120	100	—
	乾燥重量(g)	0.56	0.73	0.47	—
ソバ	発芽数	6	6	6	5
	長さ(最大値)(mm)	360	370	340	250
	乾燥重量(g)	1.21	1.59	1.12	0.53
ライムギ	発芽数	6	6	6	6
	長さ(最大値)(mm)	190	235	200	90
	乾燥重量(g)	0.45	0.72	0.45	0.08
ヒマワリ	発芽数	6	6	6	6
	長さ(最大値)(mm)	235	250	240	205
	乾燥重量(g)	1.45	1.91	1.23	0.64
ケナフ	発芽数	2	5	5	1
	長さ(最大値)(mm)	90	80	80	55
	乾燥重量(g)	0.36	0.71	0.57	0.05
レンゲソウ	発芽数	4	6	5	0
	長さ(最大値)(mm)	40	37	40	—
	乾燥重量(g)	0.04	0.06	0.03	—
キキョウ	発芽数	0	0	1	0
	長さ(最大値)(mm)	—	—	3	—
	乾燥重量(g)	—	—	<0.01	—
ヨモギ (0.03g/鉢)	発芽数	31	41	29	6
	長さ(最大値)(mm)	20	20	20	2
	乾燥重量(g)	<0.01	0.04	0.02	<0.01

表6 試験に用いた模擬汚染土壌および種の量

植物の種類	模擬汚染土の量 (g)	播種数 (個)
カラシナ	4,900	197
ソバ	2,300	92
ヒマワリ	1,900	102
ライムギ	7,900	315

期間終了後(図2)は2.3と同様に乾燥重量、植物中の鉛およびヒ素の含有量を測定し集積濃度を算出した。

鉛を添加した模擬汚染土壌の生育試験結果および植物への集積濃度を表7に、ヒ素を添加した模擬汚染土壌の結果を表8に示した。

4種類の植物の乾燥重量は17.4～49.2gであった。また、乾燥植物当たりの鉛の集積濃度は4種類の植物で10～23mg/kg(土壌濃度の1.0～2.3%)であり、ソバが23mg/kgともっとも高かった。ヒ素の集積濃度は、4種類の植物で1.4～4.3mg/kg(土壌濃度の1.0～4.3%)であり、ライムギが4.3mg/kgともっとも高かった。

2.5 ヒマワリによる鉛の部位別集積濃度

植物のどの部位に鉛が集積されるかを把握するため、ヒマワリを例にとり、鉛1,000mg/kgの模擬汚染土壌を用いて、部位別の集積濃度を測定した。試験期間は平成23年10月～12月(68日間)で、ヒマワリの種子を36粒播種し、ビニールハウス内にて生育させた後、ヒマワリを地表面で刈り取り、5種類の部位に分け(図3)、それぞれの刈取重量、乾燥重量および鉛の含有量から部位別の集積濃度を求めた(表9)。

鉛の集積濃度は3.5～46mg/kgの範囲であり、茎・葉ともに地上に近い部位に集積され、地上から離れているほど集積濃度が低下する傾向が見られた。この結果から、ヒマワリを用いて汚染土壌から鉛を除去するためには、長期間ヒマワリを生育させるよりも、数10cm程度にまでヒマワリを生育させ、刈り取り、また生育させるという一連の操作を繰り返した方が、全体としての除去効率がよい可能性が考えられた。これについてはさらなる研究を実施していきたいと考えている。

2.6 ライムギによるヒ素の部位別集積濃度

次に植物のどの部位にヒ素が集積されるか把握



図2 生育試験の様子(左からカラシナ、ソバ、ヒマワリ、ライムギ)

表 7 生育試験結果および植物への集積濃度

(模擬汚染土壌：Pb 1,000mg/kg)

植物の種類	生育株数 (株)	植物(地上部)				鉛の集積濃度* (mg/kg)	大きさ (中央値) (mm)
		長さ (中央値) (mm)	長さ (最大値) (mm)	乾燥重量 (g)			
カラシナ	188	200	290	42.1	22	82	
ソバ	92	330	500	24.2	23	60	
ヒマワリ	102	390	450	34.4	10	80	
ライムギ	263	410	500	49.2	15	430	

注：※ 乾燥植物当たりの集積濃度

表 8 生育試験結果および植物への集積濃度

(模擬汚染土壌：As 100mg/kg)

植物の種類	生育株数 (株)	植物(地上部)				ヒ素の集積濃度* (mg/kg)	大きさ (中央値) (mm)
		長さ (中央値) (mm)	長さ (最大値) (mm)	乾燥重量 (g)			
カラシナ	197	180	315	31.0	1.4	57	
ソバ	91	300	470	17.4	1.6	45	
ヒマワリ	102	400	450	33.3	2.8	68	
ライムギ	294	410	540	33.2	4.3	410	

注：※ 乾燥植物当たりの集積濃度

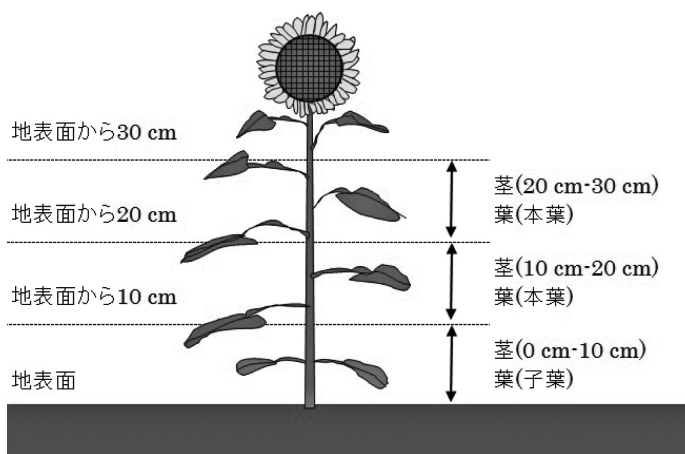


図 3 ヒマワリの分割部位

表 9 ヒマワリの部位別生育試験結果および鉛の集積濃度

部位	刈取重量 (g)	乾燥重量 (g)	鉛の集積濃度* (mg/kg)
茎(20cm-30cm)	13.4	1.9	4.9
茎(10cm-20cm)	20.6	3.3	20
茎(0cm-10cm)	34.3	4.9	46
葉(本葉)	15.3	3.2	3.5
葉(子葉)	4.9	1.1	16

注：※ 乾燥植物当たりの集積濃度

するため、ライムギを例にとり、ヒ素100mg/kgの模擬汚染土壌を用いて、部位別の集積濃度を測定した。試験期間は平成22年11月～23年3月(125日間)で、ライムギの種子を264粒播種し、**2.5**と同様に試験を行い、**図4**の部位別にヒ素の集積濃度を求めた(**表10**)。

ライムギにおける穂および茎のヒ素の集積濃度は0.72～0.80mg/kgであった。葉の集積濃度は、地表面から10cmまで、10cm～30cmの部分のい

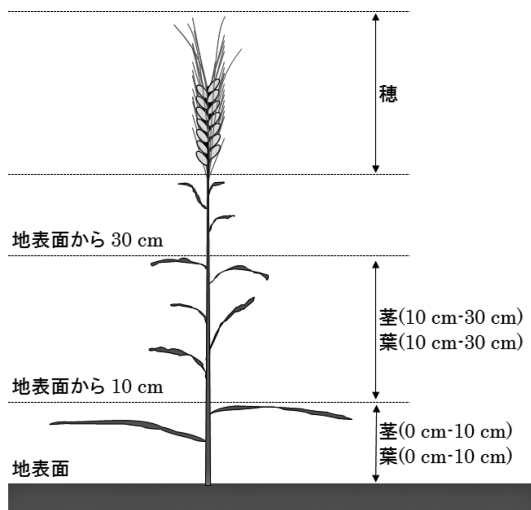


図4 ライムギの分割部位

いずれも1.5~1.6mg/kgと、穂および茎の約2倍であった。この結果から、ライムギでは、穂や茎に比べ葉に多くヒ素を集積させることがわかった。また、高さでは目立った差が見られなかった。

3. 今後の実施予定

ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復技術を応用するため、有害物質の集積濃度向上条件を検討し、実フィールドに応用するための知見を集積していきたい。

4. まとめ

- (1) 混合土Bに鉛を1,000mg/kgを添加した、模擬汚染土壌を用いた場合には、キキョウ以外の7種類において生育は順調であった。また、ヒ素の濃度が1,000mg/kgの模擬汚染土壌では、8種類とも生育が困難であることがわかった。
- (2) カラシナ、ソバ、ヒマワリおよびライムギの4植物では、乾燥植物当たりの鉛の集積濃度は10mg/kg、ヒ素では1mg/kgを超える結果が得られ、なかでもライムギのヒ素集積濃度が高かった。
- (3) ヒマワリによる鉛の部位別集積濃度を測定し、葉・茎ともに地上に近い部位に集積されるとの知見を得た。
- (4) ライムギによるヒ素の部位別集積濃度を測定し、穂や茎に比べて葉に多く集積されるとの知見を得た。

表10 ライムギの部位別生育試験結果およびヒ素の集積濃度

部位	刈取重量 (g)	乾燥重量 (g)	ヒ素の集積濃度* (mg/kg)
穂	37.4	19.6	0.72
茎(10cm-30cm)	46.5	17.6	0.80
茎(0cm-10cm)	36.3	12.8	0.76
葉(10cm-30cm)	14.6	7.4	1.5
葉(0cm-10cm)	28.7	21.7	1.6

注：* 乾燥植物当たりの集積濃度

—引用文献—

- 1) 環境省水・大気環境局：平成20年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果、2010
- 2) 王効挙、李法雲、杉崎三男：ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復の現状と展望、全国環境研会誌、**29**(2)、85-94、2004
- 3) 北島信行：実用化フェーズに入ったモエジマシダによるファイトレメディエーション、第147回生存圏シンポジウム要旨集、39-45、2010
- 4) 長谷川功：植物による環境浄化—ファイトレメディエーション技術開発の現状と今後の課題—農業および園芸、**82**(10)、1053-1061、2007
- 5) 近藤敏仁、北島信行、永島玲子：ファイトレメディエーションによる重金属汚染土壌の浄化、用水と廃水、**47**(10)、88-97、2005
- 6) Jeanna R. Henry: An Overview of the Phytoremediation of Lead and Mercury, National Network of Environmental Management Studies, 2000
- 7) 松古浩樹、本田宗央、武藤淳司、田村英生、小島淳一、佐藤 健：現地実証試験における植物による鉛汚染土壌の浄化と拡散防止効果、土木学会論文集G、**63**(1)、51-57、2007
- 8) Ellen L. Kruger, Todd A. Anderson, Joel R. Coats: Phytoremediation of Soil and Water Contaminants (Acs Symposium Series), 283-298, An American Chemical Society Publication (1997)
- 9) Ali Boularbah, Christophe Schwartz, Gabriel Bitton, Wafae Abouddrar, Ahmed Ouhammou, Jean Louis Morel: Heavy metal contamination from mining sites in Morocco: 2. Assessment of metal accumulation and toxicity in plants, Chemosphere, **63**(5)、811-817、2006
- 10) 永島玲子、北島信行、久保田洋、佐竹英樹、矢島 聡：ハクサンハタザオを用いたカドミウム汚染土壌の浄化方法の開発、フジタ技術研究報告、**41**、69-74、2005
- 11) 永島玲子、近藤敏仁、田本修一、伊東佳彦、榎原正幸、牧野純子：寒冷地(北海道)における植物を用いた重金属処理に関する調査研究、同上誌、703-706、2006
- 12) 榎原正幸、原田亜紀、佐野 栄、堀 利栄、井上雅裕：マツバイを用いたファイトレメディエーションによる重金属に汚染された水環境の浄化、第12回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会要旨集、545-548、2006
- 13) 植物に対する害に関する栽培試験の方法(昭和59年4月18日付け59農蚕第1943号農林水産省農蚕園芸局長通知)
- 14) 財団法人日本土壌協会：土壌機能モニタリング調査のための土壌、水質及び植物体分析法、2001