

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

その1 高集積植物の探索と除去能力の評価

永島 玲子 北島 信行
久保 田 洋 佐竹 英樹
矢 島 聡

概 要

植物を用いて環境汚染を低減・除去する技術であるファイトレメディエーション(phytoremediation)は、開発が進んでいる低コスト・低環境負荷型の新しい土壌浄化方法である。国内では米、ダイズ、野菜などの食品中のカドミウム濃度を低減する技術のひとつとして、カドミウム汚染された農地のファイトレメディエーションによる修復が期待されている。現在、何種類かの植物を用いて浄化実験が試みられているが、浄化完了まで期間が長く、効果の確証が得られないために実用化にはいたっていない。汚染物質の浄化速度は植物のもつ能力によるため、より効果の高い植物種を選択することがこの技術の課題の一つとなると考えられる。

本稿では、重金属高集積植物の探索を目的とした野生植物のスクリーニングを行い、アブラナ科ハクサンハタザオがカドミウム高集積植物であることを再発見した調査と、ハクサンハタザオの浄化能力を室内栽培で評価した結果について報告する。

Phytoremediation of Cd - contaminated soil using *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*

Part1. Selection of wild plants for hyperaccumulation and estimation of removal amount of Cd from contaminated soils by *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*

Abstract

Phytoremediation is the treatment of environmental problems through the use of plants. It is a new and emerging field for environmental waste treatment technologies. In Japan, restoration of Cd-contaminated paddy soil by phytoremediation is being trialed in order to prevent Cd contamination of food. The crops initially examined in field tests showed limited potential as bioaccumulators of Cd (due to low shoot concentrations of the metal). Finding plants that have sufficient removal potential and produce high amounts of biomass is an important assignment.

In this paper, it is described that *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera* (one of a selection of wild plants trialed) has enough potential for hyperaccumulation, and the amount of Cd the species can remove from contaminated soil is estimated.

キーワード: カドミウム, ハクサンハタザオ, 重金属
高集積性, ファイトレメディエーション

§1. はじめに

土壤汚染対策法が平成 15 年 2 月に施行され、土壤汚染問題が法の管理化におかれることとなった。これまでの土壤汚染対策は、期間の短縮が優先され高額なコストがかかる手法が主であった。しかし、今後顕在化してくるサイトは汚染者が明確でないもの、汚染者が明確であっても土壤浄化の費用負担が十分にできないものも考えられる。このようなサイトの場合は対策に時間がかかっても低コストで低環境負荷の浄化技術が求められると考えられる。植物をもちいた浄化技術であるファイトレメディエーションはこのような技術として位置づけられ、今後浄化工法の一つとしての役割を担うものと考えられる。

ファイトレメディエーションとは植物による汚染物質の除去や分解、安定化などの作用によって環境を修復する技術のことである。重金属汚染に対する浄化方法は、土壤中の重金属を植物の地上部に吸収蓄積させ、その地上部を収穫することで重金属を取り除くファイトエクストラクションが有効である(図-1)。ファイトエクストラクションによる浄化では植物中の重金属濃度と植物の収穫量によって重金属除去量が決まる。したがって、いかに高濃度に吸収させることができるか、あるいは収穫量を増加させることができるかが、この技術の開発のポイントとなる。そのために特定の元素を高濃度に集積することのできる重金属高集積植物(hyper-accumulator)の利用や、化学的手法を併用することで吸収量を上げる方法、遺伝子組替技術によって収穫量の大きい植物に重金属蓄積性を付与する方法など、さまざまな研究が行なわれている。

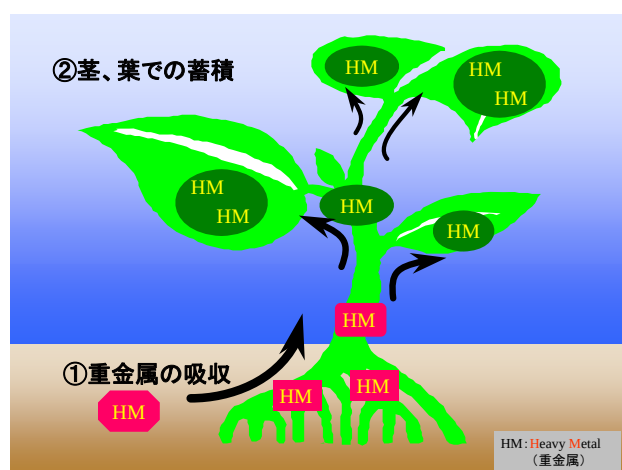


図-1 ファイトエクストラクションの概念図

§2. 重金属高集積植物(hyper-accumulator)について

欧米で行われているファイトレメディエーション研究の中に、重金属高集積植物(hyper-accumulator)についての報告がいくつかある。Baker et al^{1),2)}によると、重金属高集積植物とは乾物重量あたり亜鉛、マンガンは1 %以上、鉛、ニッケルは0.1 %以上、カドミウムは0.01 %以上の重金属を集積する植物と定義されている。

いままでに報告されているファイトレメディエーションへの利用が期待できる重金属高集積植物は数十種類である。さまざまな浄化対象地域の気候や土壌、多種の汚染物質に対応できる実用的な技術として、ファイトレメディエーションが広まっていくためには、より多くの種類の重金属高集積植物が発見されることが望まれている。

§3. 高集積植物の探索調査

3.1 調査概要

ファイトレメディエーションへの利用を目的として重金属に対する高集積植物のスクリーニングを試みた。

調査対象地は土壌中の重金属濃度が高いと考えられる鉱山跡地やその周辺とした。調査は2003年6月から7月にかけて行い、木本類、草本類、シダ類など、幅広い植物種より約100種を採取した。

採取した植物は標本として保存した。植物体の一部は乾燥して粉碎した後に硝酸による湿式灰化を行ない、植物中の重金属濃度(鉛、カドミウム、亜鉛、銅)の分析を行った。土壌は調査区域内で一定区画ごとに採取した。風乾して2mmの篩を通して礫を除いた後、硝酸・塩酸による湿式灰化を行ない土壌中の重金属含有量を分析した。

3.2 調査結果

3.2.1 調査地の植生

調査地は鉱山の採掘にともなって山林が切り拓かれ、廃坑の際に放置された場所と考えられ、先駆的に侵入する草本類や明るい場所を好む低木により構成された植生となっていた。このような場所に生息する植物は条件の悪い土地でも旺盛な生育を示すものが多く、バイオマス生産量を確保することも比較的容易であると考えられる。

3.2.2 調査地の土壌中の重金属含有量

表-1に調査地点ごとの土壌中の重金属含有量を示した。鉛、銅、亜鉛の含有量が高く、これは調査を行った廃鉱山の主な産出物が銅、鉛、亜鉛であったことによると考えられる。カドミウムは土壌中の天然賦存量(0.056～0.801

mg/kg)³⁾と比較して高い値であり、鉱山由来の汚染があったと推測された。土壌中の重金属含有量が高いこの地域に生息する植物は、重金属耐性が高いと推察され、蓄積性もそなえた植物が見いだせる可能性が考えられる。

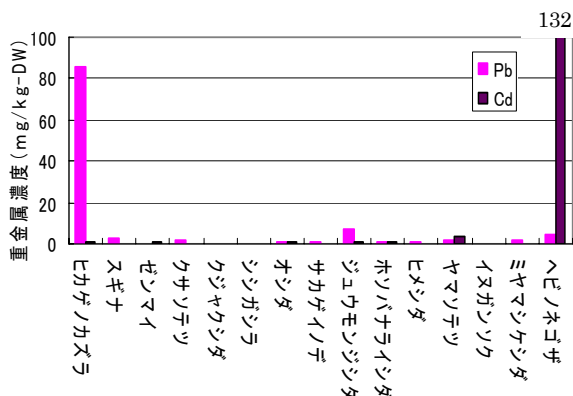
表ー1 土壌中の重金属含有量

	(mg/kg-soil)			
	Pb	Cd	Cu	Zn
調査地A	2247	6.5	1617	1118
調査地B	2224	3.6	2061	1624
調査地C	1000	1.7	3292	574
調査地D	614	8.8	1082	1691

3.2.3 植物中の重金属濃度

植物中に重金属が高集積している特徴が見られた鉛とカドミウムについて、植物体乾物重あたりの濃度を植物分類学上の分類に基づいたグループごとに図ー2から図ー6に示した。

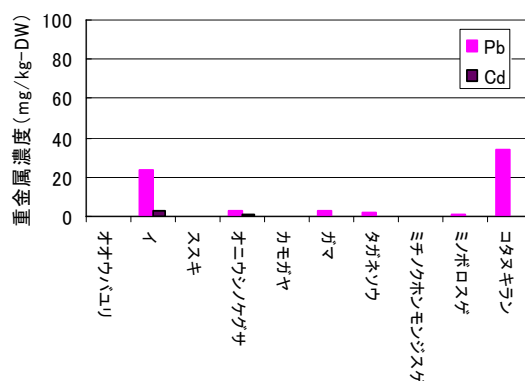
図ー2に示したシダ類は、調査地での出現数が多く重金属に対する耐性が高いと考えられたが、ヘビノネゴザ以外のシダでは植物中の重金属濃度は低く、集積性はなかった。カドミウム高集積植物として以前より知られているオシダ科ヘビノネゴザは、調査地内で大きな群落を形成しており、カドミウム濃度も132 mg/kg-DW と高かった。ヒカゲノカズラは鉛濃度が86 mg/kg-DW と比較的高かったが重金属高集積植物とはいえなかった。



図ー2 植物体中の重金属濃度

下等維管束植物(トクサ,シダ類等)

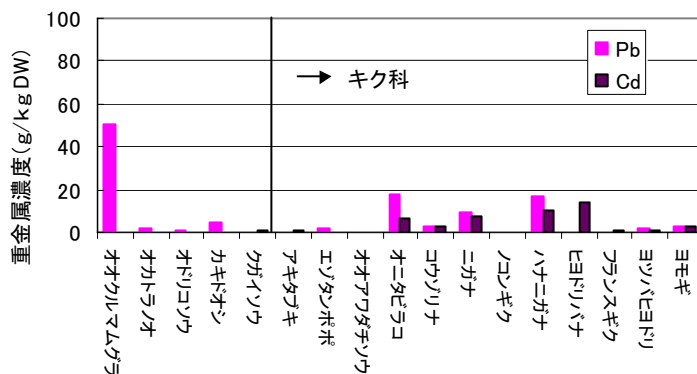
図ー3に示した単子葉植物類では植物中のカドミウム濃度は低かった。鉛濃度はイグサ科イで23 mg/kg-DW, カヤツリグサ科コタヌキランで34 mg/kg-DW であった。重金属高集積植物とは言えないが、イは工芸作物のイグサとしての栽培技術が確立されており、ファイトレメディエーションに利用しやすい植物と考えられる。



図ー3 植物体中の重金属濃度

単子葉類(イネ,ガマ,カヤツリグサ科類等)

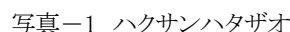
図ー4に示した双子葉合弁花類の中ではキク科草本がカドミウムを比較的多く蓄積していた。カドミウム濃度はオニタビラコ6 mg/kg-DW, ニガナ7 mg/kg-DW, ハナニガナ10 mg/kg-DW, ヒヨドリバナ13 mg/kg-DW であった。鉛濃度はアカネ科のオオクルマムグラで50 mg/kg-DW と高かった。オニタビラコ, ニガナ, ハナニガナは鉛, カドミウムともに吸収しており重金属を集積しやすいと思われる。



図ー4 植物体中の重金属濃度

双子葉合弁花類(アカネ,シソ,キク科類等)

図ー5に双子葉離弁花類についての結果を示した。アブラナ科のハクサンハタザオでカドミウム濃度252 mg/kg-DW, 鉛濃度68 mg/kg-DW と非常に高濃度の蓄積が確認された。この濃度はカドミウム高集積植物の定義を満たしていた。他にスミレ科ツボスミレでカドミウム23 mg/kg-DW, タデ科ミゾソバで鉛132 mg/kg-DW, カドミウム14 mg/kg-DW であった。



魚種	Pb (mg/kg-DW)	Cd (mg/kg-DW)
ウツクハネウツギ	2	2
ケナシヤナチナリ	2	0
タニウツギ	5	0
ニトロコ	5	0
ムラサキシギ	5	0
リヨウウ	8	5
ミツバウカビ	5	0
タノキ	5	0
ヌルチ	2	0
ハナチウカエデ	2	0
ヤマモミジ	5	2
ケヤマハノキ	10	0
オホハクモジ	2	2
オニダルミ	5	0
ソノバラ	2	0
サルチン	5	0
クス	15	0
コヌミ	2	0
カヌサクラ	2	0
クマイチコ	10	0
モミイチコ	5	0
イヌコリヤナギ	8	8
オノエヤナギ	5	25
キツネヤナギ	5	18
シロヤナギ	5	5
ハコヤナギ	5	0
ミヤササナギ	0	32
イワカサミ	35	0
ノリウツギ	5	0

ハクサンハタザオ (*Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*写真-1)はKubota et al.⁴⁾によって2003年にカドミウム高集積植物として報告されたものである。Kubota et al.の調査地の土壤中カドミウム含有量は83mg/kgであった。今回の調査では、カドミウム含有量が10mg/kg以下の土壌においても、植物中に200mg/kg-DW以上の高い濃度でカドミウムを集積することが確認された。ミゾソバは高集積植物として以前より知られている植物であった。⁵⁾

また比較的高い濃度で重金属を蓄積している植物が多数確認された。これらの植物についても追って蓄積特性について調べていくことで、ファイトレメディエーションに利用できる可能性や、重金属蓄積性に関する遺伝子資源としての活用も期待される。

4.1 目的

国内でカドミウムを対象としたファイトレメディエーションの適用が想定されるのは、カドミウム含有量の比較的高い農用地である。農作物中へカドミウムが移行する可能性があり、問題とされている土壌は、カドミウム含有量が数mg/kg程度である。

ハクサンハタザオを農用地のファイトレメディエーションで利用するための一つの課題は、栽培環境下でカドミウムを集積する能力を再現できるかである。

そこで種子から育苗したハクサンハタザオをもちいて、カドミウムを蓄積濃度と生長量を測定し、ハクサンハタザオの基本的なカドミウム除去能力を明らかにすることを目的とした予備実験をおこなった。

4.2 実験方法

4.2.1 ハクサンハタザオの栽培

種子は自生地より採取したものをもちいた。播種し、発芽した幼苗は1株ずつわけてプラグ成型用トレーに移植し、本葉が8枚ほどになるまで育苗してプラグ苗を作成した。育苗には播種より約1ヶ月半要した。試験栽培は4号プラスチック鉢をもちいて風乾土 400gの土壌にハクサンハタザオのプラグ苗を移植して行った。灌水は適宜行い、10週間目まで栽培した。サンプリングは生長に順じて4回行った。

【栽培環境】（人工光型ファイトトロン内）

照度：10,000 lx

気温：昼間 17℃ 12h

夜間：12℃ 12h

湿度：70%以上



写真-2 栽培の様子

4.2.2 土壌中のカドミウム濃度

2種類のカドミウムを含有している畑土壌を使用した。土壌は風乾して2mmの篩を通した。ハクサンハタザオの栽培前後の土壌について、①全含有量、②交換態、③水溶性（環告46号）を測定した。

① 全含有量：硝酸と過酸化水素で加熱分解

② 交換態：乾土に1:8の割合で1M 塩化マグネシウム(pH7)を加え2時間振とう

③ 水溶性：乾土に1:1割合で水を加え6時間振とう

検液中のカドミウム濃度は電気炉加熱式原子吸光度計（バリアン AA220Z）で測定した。

カドミウム濃度の変化より、土壌中から除去されたカドミウムの量を算出した。

4.2.3 植物中のカドミウム濃度

ハクサンハタザオの地上部のみを刈り取って、新鮮重、乾物重を測定した。植物体は乾燥して硝酸分解を行い、その検液中のカドミウム濃度を電気炉加熱式原子吸光度計（バリアン AA220Z）で測定した。

4.3 実験結果

4.3.1 栽培前の土壌中カドミウム濃度

栽培前の2種類の土壌中のカドミウム含有量を、表-2に示した。両土壌とも全含有量は環境基準値 150mg/kg と比べると低い値であったが、水溶性カドミウムは環境基準値 0.01mg/kgを超過していた。交換態カドミウムは全含有量に対して7割を占めていた。

4.3.2 栽培後の土壌中カドミウム濃度の変化

栽培前後の土壌中カドミウム濃度を表-2、およびに図-7に示した。全含有量はA土壌では15%減少、B土壌では25%減少し、土壌中からカドミウムが除去されていたことが示された。

水溶性Cd濃度はA土壌で51%、B土壌で76%減少しており、B土壌では環境基準値以下まで低下していた。

交換態カドミウムは植物によって吸収されやすく、この画分を除去することが、浄化目標値の指標になると考えていた。しかし、B土壌で40%減少したのに対し、A土壌ではその減少がはっきりと見られなかった。1M 塩化マグネシウムによる抽出では、植物によって吸収しやすい画分を評価できていない可能性があることが推察された。今後、抽出液や他の土壌をもちいて試験を行い、さらに検討を進めたい。

表-2 栽培前後のカドミウム形態別濃度

	Cd形態別濃度(mg/kg)			
	A 土 壌		B 土 壌	
	栽培前	栽培後	栽培前	栽培後
全含有	5.99	5.18±0.21	2.33	1.75±0.01
交換態	4.41	4.26±0.15	1.57	0.92±0.03
水溶性	0.031	0.015±0.001	0.025	0.006±0.001

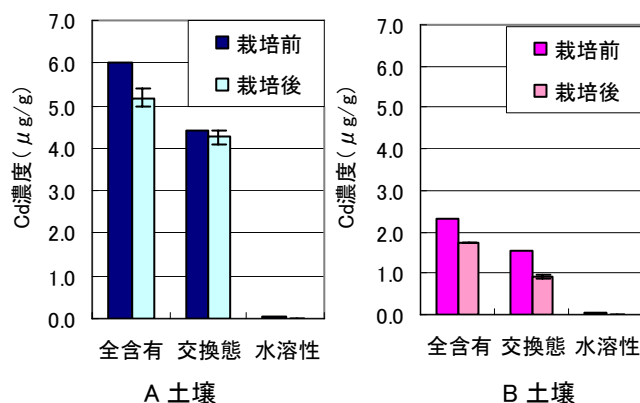


図-7 土壌中カドミウム濃度の変化

4.3.3 ハクサンハタザオの生長量

図-8 に乾物重量の変化を示した。両土壌においてハクサンハタザオの生長は良好であった。10 週間目には植付時の 10 倍の乾物重量となった。B 土壌の方が若干、生育が良かったが、これはカドミウム濃度低かったことの影響よりも、土壌の物理性や保持養分が植物の生育に好ましい条件だったためと思われる。

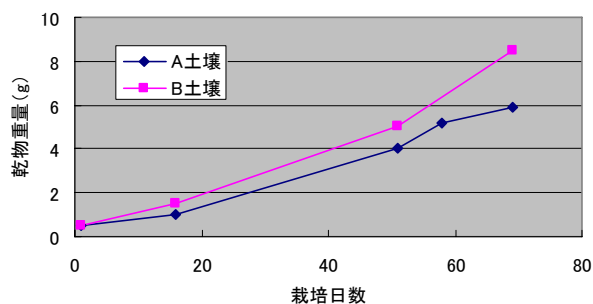


図-8 1 株あたりの乾物重量

4.3.4 植物体中のカドミウム濃度

図-9 に地上部のカドミウム濃度の変化を示した。両土壌とも栽培後期には 40mg/kg 前後となった。1 株あたり植物中カドミウム蓄積量は 250～350 μ g となった。土壌のカドミウム含有量の減少量と、植物に蓄積されたカドミウムの量はおおよそ一致していた。今回の予備試験より、ハクサンハタザオはカドミウム含有量の比較的高い畑土壌から、カドミウムを吸収蓄積することが明らかとなった。

B 土壌では植付 2 週間で 135mg/kg と高い値を示した。短期間で高い濃度となったが、栽培期間が進むにつれて濃度が下がったことから、植物の生長量がカドミウムの吸収速度を上回り、重量あたりの濃度が減少したと考えられた。栽培終了時には根が鉢全体に回るほど発達していたことから、供試土壌を多くすれば、カドミウムの吸収が続き、濃度が低下しなかった可能性が考えられた。

今後、条件を変えたポット栽培や水耕栽培による試験を重ねて、ハクサンハタザオのカドミウム除去能力を明らかにしていき、圃場での実証試験に展開していきたい。

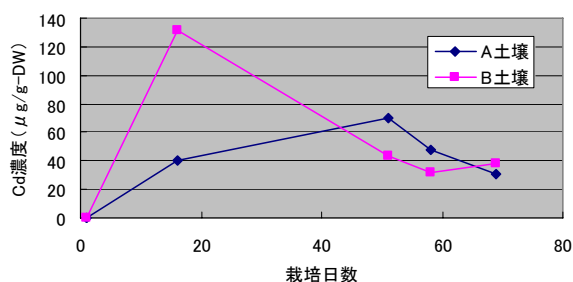


図-9 植物体地上部中の Cd 濃度

§5. まとめ

- (1) 野生植物のスクリーニング調査を実施した結果、アブラナ科ハクサンハタザオが、カドミウムの高集積植物であることが明らかとなった。
- (2) ハクサンハタザオは管理条件下において種子より栽培が可能であった。
- (3) 除去能力評価試験を実施した結果、カドミウム含有量が 2.3, 6.0mg/kg の土壌での 10 週間の栽培で、植物地上部に 40mg/kg-DW のカドミウム蓄積が認められ、土壌中カドミウム含有量を低減することができた。

謝 辞 本研究は、(独)農業工学研究所からの委託研究課題である「植物を利用したため池底泥土の浄化に関する基礎的技術開発」の一部として行なったものである。ご協力いただいた谷上席研究官へ、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Sidoli, C.M.D., and Reeves, R.D. (1994) : The possibility of in situ heavy metals decontamination of polluter soils using crops of metal accumulating plants, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 11, pp.41-49.
- 2) Baker, A.J.M. and Brooks, R.R. (1989): Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements a review of their distribution, ecology and phytochemistry, Biorecovery, Vol.1, pp.81-126.
- 3) Asami, T. (1988) : Soil pollution by metals from mining and smelting activities, In chemistry and Biology of Solid Waste, pp.143-169.
- 4) Hiroshi Kubota and Chisato Takenaka (2003): Arabis gemmifera is a hyperaccumulator of Cd and Zn., Phytoremediation, Vol.5, No.3, pp.197-201.
- 5) 長谷川 功: 植物による重金属汚染土壌の浄化, 農林水産技術研究ジャーナル, 25 (4), 5-12. (2002)

ひとこと

ハクサンハタザオは白くかわいらしい花の咲く植物です。土壌を浄化するという優れた能力をもったこの植物を広く世の中にデビューさせたいと思っています。



永島 玲子