

ハクサンハタザオを用いたカドミウム含有土壌の浄化方法の開発 その2 カドミウム除去能の評価試験と圃場での実証試験

菅原 玲子 北島 信行 *1
久保田 洋 矢島 聡

概 要

食の安全という観点から問題となっているカドミウムを含有する農用地土壌を浄化する技術として、カドミウム超集積植物ハクサンハタザオによるファイトレメディエーション(植物浄化)の開発を行っている。ハクサンハタザオのカドミウム除去能の評価試験と圃場での実証試験を実施し、実際に農用地を修復する技術として適用性について検討を行った。

ポット栽培での繰り返し栽培試験では、ハクサンハタザオ栽培後の土壌中カドミウム濃度は減少し、土壌中カドミウムの減少量とハクサンハタザオが除去したカドミウム量はほぼ一致していた。圃場での実証試験では、1作で $3,039\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$ のカドミウムが除去され、土壌中の全カドミウム濃度は42%減少した。ハクサンハタザオが土壌からカドミウムを吸収し、土壌中のカドミウム濃度を低減させることが実証された。ハクサンハタザオは秋から春にかけて栽培が適しており、施肥などの栽培管理によって生産量は向上し、カドミウム除去量を増加させることが可能であった。

Phytoremediation of Cd-contaminated soil using *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera* Part II : Estimation of Cd absorption potentials of *Arabidopsis halleri* ssp. *Gemmifera* in pot experiments and field trials

Abstract

The authors have studied phytoremediation of Cd contaminated soil using *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*. This is one of the techniques for cleaning-up the Cd- contaminated farmland and reducing the risk of producing Cd contaminated food crops. The purpose of this study is to investigate the technique's practical applicability.

Plants were cultivated repeatedly in pots filled with contaminated soil. Cd soil concentrations decreased after each cultivation, and absorption by the plant broadly matched the observed Cd reduction in soil. In field trials, the shoots of the plants absorbed 3039g Cd ha^{-1} from soil over one growing season – decreasing soil concentrations by 58%. These results suggest that *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera* is able to steadily reduce Cd soil concentrations.

This plant was planted in autumn and cropped in spring. The biomass of harvested plants was increased by application of fertilizer. We concluded that Cd is removed from soil efficiently, and the amount removed can be increased through changes in the cultivation process (such as the application of fertilizer).

キーワード: ファイトレメディエーション、
ハクサンハタザオ、カドミウム

*1 建設本部 土壌環境部

§1. はじめに

1.1 背景

FAO 及び WHO により設置された国際食品規格などの策定を行うコーデックス委員会において、米を含む穀類や野菜等の農産物のカドミウム基準値が、2001 年から 2006 年にかけて順次、採択された¹⁾。この動きを受けて国内では食品安全委員会で検討が行われ、その後、厚生労働省薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会食品規格部会において、米中のカドミウム含有量の基準値を現行の玄米中 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 未満から玄米及び精米中 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下に改正することになり、2011 年 2 月 28 日より新基準が施行された²⁾。米以外の品目については国内基準値は定められていないが検討が継続して行われている。

わが国では、食品経路のカドミウム摂取リスクを低減するための対策として、「農用地汚染防止法」に基づき、客土等による汚染農用地の復元が実施されてきた。基準値改定後の 2011 年 8 月には「コメ中のカドミウム濃度低減のための実施指針」が策定された³⁾。この指針では、土壌中に含まれるカドミウムを除去し水稻の生産環境のカドミウム濃度を下げる対策として「植物浄化」と「客土」が、土壌からのカドミウム吸収の抑制する対策として「湛水管理を中心とする吸収抑制対策」が示された。

1.2 植物浄化技術(ファイトレメディエーション)の開発

ファイトレメディエーションとは植物を意味する phyto-と修復を意味する remediation を結びつけた言葉で、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。重金属を対象としたファイトレメディエーション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。国内でもこのような特性を持つ植物の探索や実用性の評価に関する研究が盛んに行われている⁴⁾。

筆者らは、カドミウムと亜鉛を植物体内に高濃度に吸収蓄積するハクサンハタザオをファイトレメディエーションに使用する植物として選定し、その吸収能を確認した⁵⁾。ハクサンハタザオ (*Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*) はアブラナ科シロイヌナズナ属の越年生一年草植物である。このハクサンハタザオを用いて、農用地を対象とした植物浄化技術の開発を進めている。本稿ではポット栽培による繰り返し栽培試験と圃場での実証試験で、土壌中カドミウム濃度の減少量やハクサンハタザオによるカドミウム除去量、ハクサンハタザオの栽培条件の検証を行い、実際に農用地を修復する技術としての適用性について検討を行ったので報告する。

§2. ポット栽培での繰り返し栽培試験

2.1 試験方法

同じ土壌でハクサンハタザオの栽培を繰り返し行い、ハクサンハタザオによる土壌中カドミウム濃度の低減を検討するための試験を実施した。

1) 条件

試験は 2 つの転換畑由来の土壌(Soil- i・Soil- ii)を用いて、各処理区 3 連で実施した。植物栽培用のポット(直径 140×高さ 110 mm)に土壌を 1 kgDW 充填し、ハクサンハタザオの苗を移植した。人工光型ファイトロン(12~17 °C、照明時間 10 時間、10000 lx)で栽培した。栽培期間中、灌水は土壌表面からの給水で行った。水分条件は最大容水量の 50~80 %で維持管理し、系外への流出水は極力抑えた。施肥は 1 週間に 1 回、1000 倍希釈した Hyponex を 100ml 与えた。

2 ヶ月間栽培を行った後、植物体の地上部を収穫した。土壌はポットから取り出し、風乾させ 2 mm で篩った後、サンプリング(30 g/回)を行い、残りの土壌は同じポットに再度充填した。土壌に含まれる植物の根はそのまま残し、試験期間中取り除かなかった。土壌を再充填したポットに新しいハクサンハタザオの苗を移植し再び栽培試験を行った。この栽培試験を 5 回繰り返した(図 1)。

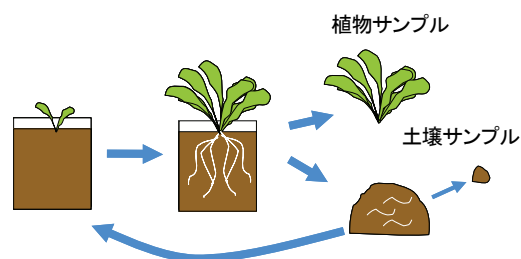


図 1 繰り返し栽培試験

2) 分析

サンプリングした植物体は 80 °C で 2 日間乾燥させた後、乾燥重量を測定した。植物体 0.5 gDW に濃硝酸 5 ml 加えた後、過酸化水素(30 %)を分解助剤として加え 120 °C 24 時間で分解し、ICP-AES (PerkinElmer、Optima5300) でカドミウム濃度の分析を行った。

土壌中の全カドミウム濃度の分析は、土壌 1 g に濃硝酸 5 ml を加え 95 °C に加温し、茶色のフュームが出なくなるまで硝酸を 2~3 回添加した。その後、試料を冷却し過酸化水素(30 %)を加え、過酸化水素による発泡が収まってきたところで、10 ml 濃塩酸を添加し 95 °C、15 分間加温した。これをろ過し検液とした。農地のカドミウム汚染指標に用いられる $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸抽出カドミウムは、土壌 2 g に対し、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 塩酸 10 ml 加えて 1 時間振とうした後、ろ過し

たものを検液とした。それぞれの検液に対して ICP-AES を用いてカドミウム濃度の分析を行った。

2.2 試験結果

1) 試験土壌のカドミウム濃度

栽培試験開始前の土壌中カドミウム濃度を表1に示した。国内の自然環境中での農用地の 0.1 mol・L⁻¹ 塩酸抽出カドミウム濃度は 0.228mg・kg⁻¹であり⁷⁾、両土壌とも農用地としては比較的カドミウム濃度が高い土壌であった。

表1 栽培前の土壌中カドミウム濃度

	Soil- i	Soil- ii
	(mg・kg ⁻¹)	(mg・kg ⁻¹)
全Cd	4.3	5.0
0.1mol・L ⁻¹ 塩酸抽出Cd	3.0	3.6

2) 植物体の乾燥重量・カドミウム濃度・カドミウム集積量

表2に栽培1回から5回目までの植物体の乾燥重量、地上部カドミウム濃度およびカドミウム集積量を示した。

表2 栽培回数ごとの植物体の乾燥重量・カドミウム濃度・カドミウム集積量

栽培回数	Soil- i			Soil- ii		
	乾燥重量	地上部Cd濃度	Cd集積量	乾燥重量	地上部Cd濃度	Cd集積量
	g	mgkg ⁻¹ DW	mg	g	mgkg ⁻¹ DW	mg
1回目	3.0 (0.49)	320 (54)	0.97 (0.30)	3.6 (0.44)	390 (97)	1.4 (0.30)
2回目	3.5 (1.6)	230 (50)	0.74 (0.33)	1.8 (0.15)	310 (51)	0.56 (0.08)
3回目	1.7 (0.13)	300 (10)	0.49 (0.06)	1.9 (0.30)	310 (31)	0.57 (0.12)
4回目	2.5 (2.2)	110 (3.5)	0.26 (0.23)	3.6 (0.17)	210 (10)	0.75 (0.01)
5回目	2.5 (0.91)	120 (29)	0.27 (0.03)	1.8 (0.80)	150 (97)	0.19 (0.02)

()内は、各データの標準偏差

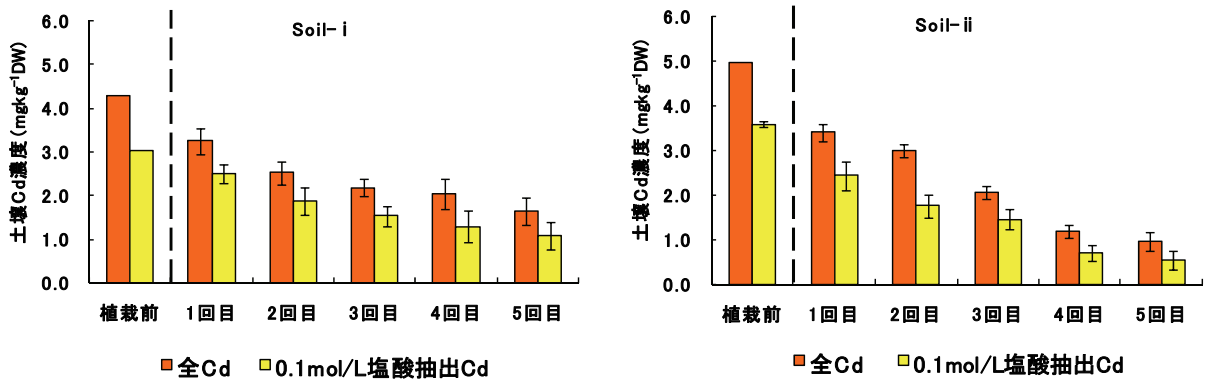


図2 繰り返し栽培による土壌中カドミウム濃度の推移

*エラーバーは標準偏差

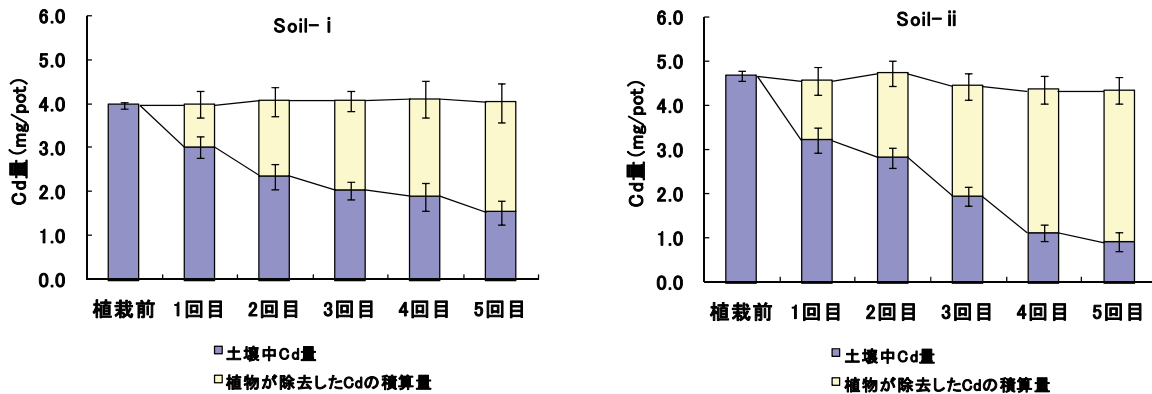


図3 繰り返し栽培におけるカドミウム収支

*エラーバーは標準偏差

4) 繰り返し栽培におけるカドミウム収支

図 3 にカドミウムの収支を示した。栽培終了ごとに土壌中に残存しているカドミウム量とそれまでに植物体により除去されたカドミウム量の総和をそれぞれの棒グラフで示している。この結果より 5 回の栽培試験を通じて、カドミウム総量は大きく変化しておらず、植物以外の要因による系外への流出がほとんど無いことが示された。このことから土壌中のカドミウムはハクサンハタザオのカドミウム集積により除去されたことが確認された。

5) 植物体カドミウム濃度と土壌中カドミウム濃度

図 4 に各栽培前の土壌中の全カドミウム濃度と栽培した植物体のカドミウム濃度の関係を示した。土壌中のカドミウム濃度が高い時ほど植物体カドミウム濃度が高くなる正の関係性が認められた。浄化対象の土壌カドミウム濃度に応じてハクサンハタザオによるカドミウム除去量に変化すると推察された。

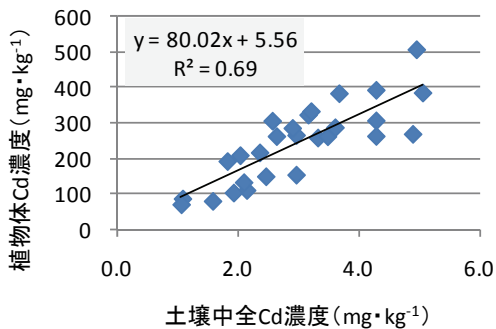


図 4 植物体カドミウム濃度と土壌中カドミウム濃度

施肥は化成肥料(N・P・K 16:10:14)を用いた。基肥窒素量を 3.2kgN・10a⁻¹とし、追肥区では 11 月と 3 月に基肥と同量の追肥を行った。基肥のみの栽培区は無追肥区とした。



写真 1 プラグ苗の移植



写真 2 越冬前の生育状況(追肥区)

§3. 圃場での実証試験

3.1 試験方法

一定規模の圃場の栽培試験を行い、ハクサンハタザオのカドミウム除去能の検証を行った。また、野草であるハクサンハタザオの栽培体系確立を目的として、追肥の有無が生育量とカドミウム除去量に与える影響も合わせて調査した。

1) 栽培条件

ハクサンハタザオの自生地におけるライフサイクル調査に基づき検討を行い作成した栽培歴に基づいて圃場での栽培をおこなった。

牧草地として利用されていた褐色低地土(pH5.3)の圃場 400 m²で栽培試験を実施した。土壌を耕耘した後、10 月にハクサンハタザオのプラグ苗を移植した(写真 1)。冬期に積雪があったがハクサンハタザオは越年草であるため、ロゼット状の形態で冬越した(写真 2)。3 月頃から花芽が抽だいし、翌年 4 月下旬から 5 月上旬にかけて白い花が開花した(写真 3)。満開期に地際から地上部を刈り取りとった。



写真 3 刈り取り前の生育状況

2) 分析方法

植物体は各畝の中心に 1 m²の枠を設置し、その中の植物をすべて刈り取り、乾燥重量を測定して生産量を求めた(各処理区 n=12)。また刈り取った試料について繰り返し栽培試験と同様の方法で植物体中のカドミウム濃度を測定した。

土壌は栽培前後に作土層として 0~15cm の深さまでの土壌を均一に採取し試料とした。また栽培後に追肥区と対照区(栽培なし)で、表層から 10cm ごとに深さ 40cm までの深度別の土壌試料を採取した。

土壌中のカドミウム濃度は、繰り返し栽培試験と同様の方法で分析を行い、全カドミウム濃度と 0.1mol・L⁻¹ 塩酸抽出カドミウム濃度を測定した。

3.2 試験結果

1) 植物体のカドミウム濃度、カドミウム除去量

表 3 に植物体の乾燥重量とカドミウム濃度、カドミウム除去量を示した。植物体の乾燥重量は無追肥区では 0.14kg・m² だったのに対して、追肥区で 0.33kg・m² となり、追肥によって生産量が倍増した。このときの植物中カドミウム濃度は追肥区で無追肥区より低かったが、植物が除去したカドミウム量は追肥区で 3,039g・ha⁻¹、無追肥区で 1,940g・ha⁻¹ と算出され、追肥区でカドミウム除去量が多かった。

表 3 植物体の乾燥重量・カドミウム濃度・カドミウム除去量

	乾燥重量	Cd濃度	Cd除去量
	kg・m ⁻²	mg・kg ⁻¹	g・ha ⁻¹
追肥区	0.33	908	3,039
無追肥区	0.14	1,407	1,940

2) 栽培前後の土壌中カドミウム濃度

図 5 に追肥区作土層の栽培前後の土壌中カドミウム濃度を示した。棒グラフ全体が全カドミウム濃度を示し、そのうち 0.1mol・L⁻¹ 塩酸抽出カドミウム濃度と全カドミウム濃度との差分を色分けして示している。栽培前後で全カドミウム濃度は 4.5mg・kg⁻¹ から 2.6mg・kg⁻¹ に減少し、0.1mol・L⁻¹ 塩酸抽出カドミウム濃度は 3.4mg・kg⁻¹ から 1.7mg・kg⁻¹ と 50%

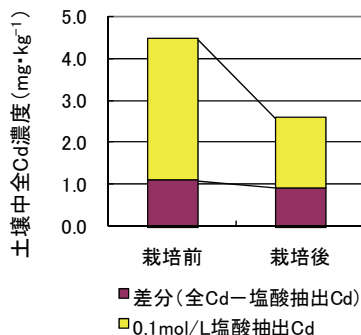


図 5 栽培前後の土壌中カドミウム濃度の変化

減少した。差分として算出されたカドミウム濃度の変化はほとんどなく、主に 0.1mol・L⁻¹ 塩酸抽出カドミウム濃度が減少していた。

2) 深度別の土壌中カドミウム濃度

深度別に採取した試料の全カドミウム濃度を図 6 に示した。表層から 20cm の深さまでの全カドミウム濃度は対照区では 4mg・kg⁻¹ 以上あったのに対し、ハクサンハタザオを栽培した追肥区では 2mg・kg⁻¹ 以下であった。土壌断面の観察結果から、ハクサンハタザオの根は深さ 30cm 付近まで達しており、特に表層から深さ 20cm 程度までが根の密度が高く、追肥区のカドミウム濃度の減少はハクサンハタザオによるカドミウムの吸収が大きく寄与していたと考えられた。ハクサンハタザオのカドミウム除去能が圃場でも実証された。

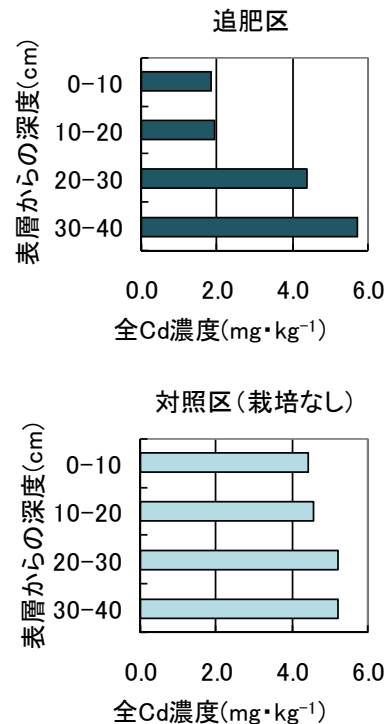


図 6 深度別の土壌中カドミウム濃度

§4. 考察

4.1 ハクサンハタザオによる土壌中カドミウム濃度の低減

繰り返し栽培試験において、栽培ごとのカドミウム収支はほぼ一定であった(図 3)。また圃場試験において、植物により除去されたカドミウム量が 3,039g・ha⁻¹ だったのに対して、作土層 15cm (かさ比重 0.9) からのカドミウム減少量を試算すると 2,540g・ha⁻¹ と算出され、深さ 15cm 以下の土壌からのカドミウム吸収や降水による系外への流出等があることを加味すると、おおむね同程度のカドミウムがハクサンハタザオによって除去されたとみなすことができた。ハクサン

ハタザオが土壌からカドミウムを吸収し、土壌中のカドミウム濃度を低減させることが実証された。

4.2 圃場でのカドミウム除去能

国内で実施された他の農用地カドミウム汚染土壌の浄化試験として、Ibaraki *et al.*⁷⁾ のカドミウム高吸収イネの品種である IR8 を全カドミウム濃度 $2.52\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (灰色低地土) で栽培した実証試験で、 $657\text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ のカドミウムを除去した報告や、栗原ら⁸⁾ のケナフを全カドミウム濃度 $2.5\sim 2.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (灰色低地土) で栽培した実証試験で $191\sim 347\text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ のカドミウムを除去した報告などがある。今回の圃場試験では土壌の全カドミウム濃度がこれらの試験に比べて高いため単純に比較はできないが、追肥区で $3,039\text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ 、無追肥区で $1,940\text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ のカドミウムを除去しており、他の浄化用植物と同様に、実際の農用地の修復に適用可能なカドミウム除去能を有することが確認された。

また、繰り返し栽培試験の結果では、土壌中のカドミウム濃度が低下するにつれて植物中のカドミウム濃度も低下する傾向にあったが、繰り返し栽培によってカドミウム濃度が低くなった土壌からもカドミウムの除去が可能であることが確認された。このことから目標とする土壌カドミウム濃度までカドミウムを除去するために、ハクサンハタザを連作して栽培することや他の浄化植物と組み合わせる用いることが可能だと考えられた。

4.3 ハクサンハタザオの栽培体系

圃場試験を実施し、ハクサンハタザオは自生地でのライフサイクルと同じく、秋から春にかけての栽培が適切であることが確認された。他の浄化用植物であるイネやケナフなどが春からの栽培であるのに対して、秋から春にかけての栽培体系はハクサンハタザオの特徴の一つと見なせる。また施肥量の管理によってハクサンハタザオの生産量は大きく改善し、カドミウム除去量を向上させることが明らかとなった(表 3)。ハクサンハタザオは野草であるが、栽培作物と同じく施肥管理や雑草防除の計画を立て栽培管理を行うことで生産量を増加させることができ、カドミウム除去量の向上を図ることが可能であるといえる。農用地のカドミウム浄化工法としては、さらなる効率化が必須であり、栽培の省力化や病虫害・除草対策などの検討を進めているところである。

謝辞：本研究は農林水産省委託研究「農林水産バイオリサイクル研究 (H14～H18) の一部として実施したものであり、関係された方々のご協力に深謝いたします。

引用文献

- 1) Codex : Report of the 29th Session of Codex Alimentarius Commission, Codex Alimentarius Commission, p. 90. (2006)
- 2) 厚生労働省：食品中のカドミウムの規格基準の一部改正について， <http://www.mhlw.go.jp/shingi/2010/05/dl/s0518-10o.pdf> (2010.11.5)
- 3) 農林水産省:コメ中のカドミウム濃度低減のための実施指針, http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_cd/pdf/cd_shishin_rice.pdf (2011)
- 4) 茨木ら:農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線 4. 植物による汚染のうちの修復, 日本土壤肥料学雑誌, 78,627-632. (2007)
- 5) 永島ら: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, フジタ技術研究報告, 41, 69-74. (2005)
- 6) 日本土壤協会:土壌汚染環境基準設定調査,211 (1984)
- 7) Ibaraki,T.*et al.* : Practical phytoextraction in cadmium-polluted paddy fields using a high cadmium accumulating rice plant cultured by eraly drainage of irrigation water, Soil Science and Plant Nutrition, 55, 421-427. (2009)
- 8) 栗原ら:カドミウム含有水田転換畑におけるケナフ (*Hibiscus cannabinus*)を用いたファイトレメディエーションの試み,日本土壤肥料学雑誌, 76, 27-34. (2005)

参考文献

- 久保田ら:ハクサンハタザオによるカドミウムのファイトレメディエーション,日本土壤肥料学雑誌, 81,118-124. (2010)
- 菅原ら:Cd 高集積植物ハクサンハタザオを利用したファイトレメディエーション(5)圃場栽培試験での土壌中 Cd の低減,日本土壤肥料学会講演要旨集,54,283 (2008)



菅原 玲子

ひとこと

ハクサンハタザオの特徴を生かした植物浄化法を確立し、農用地の修復に役立てる技術となるように開発を進めていきたいと思っております。