

報文

フラワーレメディエーション-花卉植物による重金属汚染土壌の修復に関する研究-

堀部貴紀, 山木昭平, 山田邦夫

中部大学応用生物学部

要 旨

近年, 植物を利用した環境修復技術であるファイトレメディエーションの研究が盛んに行われている. 本研究では, 観賞価値の高い花卉植物を利用して環境を美化しながら土壌汚染を除去する手法(フラワーレメディエーション)の確立を目指し, 有害重金属であるカドミウム(Cd)と鉛(Pb)を用いて複数の花卉植物の重金属耐性と重金属蓄積能力を調査した. 約30種の花卉植物を使用しポット試験によりCdおよびPb耐性植物の選抜を行った結果, ベニバナやマリーゴールドなどいくつかの植物は自然界濃度の10倍以上のCd, Pbを含む土壌で一定期間生存可能であることが示された. 次に, Cd試験土壌とPb試験土壌において耐性を示した9種の花卉植物を開花期まで生育させ, 地上部・地下部の重金属濃度を測定し比較した. その結果, コスモス, ベニバナ, ヒャクニチソウ, マリーゴールドは地上部にCdを, キンセンカ, ベニバナ, ヒマワリはPbを地上部に多く蓄積していた. これらの花卉植物はフラワーレメディエーションへの利用に有望である.

本研究により, 花卉植物の重金属蓄積量や重金属の地上部への移行程度には種間で大きく差があること, さらに上記の花卉植物は観賞価値に加えて地上部への重金属蓄積能力が高いことなどが明らかとなり, 花卉植物を利用した土壌浄化技術の実現可能性が示された.

キーワード: カドミウム, 環境美化, 鉛, 土壌浄化

1. 緒言

近年, 重金属や残留農薬などの有害物質による土壌汚染の浄化を目的とした方法の一つとして植物を利用した環境修復技術, すなわちファイトレメディエーション(phytoremediation)の技術に注目が集まっている(南ら, 2015). ファイトレメディエーションとは, 「植物の機能を利用して環境修復および汚染浄化を行うこと, あるいはその技術のこと」である. 具体的には, 植物体内に重金属などの環境汚染物質を吸収そして蓄積させ, 植物体を除去することで環境を浄化する手法が最も広く用いられている. 汚染土壌の処理はこれまで主に掘削除去や化学物質の抽出作業など物理化学的な手法によって行われてきたが, 巨額な費用や処分場の用地確保, 二次汚染の懸念などが問題となっている(王ら, 2002; 社団法人日本機械工業連合会, 2008). 一方, 植物を利用したファイトレメディエーションでは低コストで広範囲の汚染サイ

トへの適用が可能であると同時に, メンテナンスが不要で太陽エネルギーを利用しているため環境負荷が小さいなどの利点があり, 土壌修復技術として期待されている(Lee, 2013; Leitenmaier・Küpper, 2013; Saltら 1998; 王ら, 2004).

しかし日本のように狭くて土地価格の高い国では, 広範囲に土壌が汚染された場合に, 汚染除去のために雑草, コケ, シダ等を用いた従来のファイトレメディエーションによって長期間その土地を付加価値なしで維持することは困難である. そこで美しい花を利用したファイトレメディエーション, すなわち環境美化の付加価値を与えながら土壌汚染を除去する手法「フラワーレメディエーション」を提唱したい. 本研究では, フラワーレメディエーション技術の確立を目指し有害重金属であるカドミウム(Cd)と鉛(Pb)を用いて複数の花卉植物の重金属耐性と重金属蓄積能力を調査した.

2. 材料と方法

実験 1. ポット試験による Cd および Pb 耐性植物のスクリーニング

市販で種子の購入が可能でバイオマスの大きい花卉植物を選んで実験に使用した. 2012年度の試験では供試植物としてアブラナ科植物2種〔ストック「*Matthiola incana* (L.) R.Br.」, ハボタン「*Brassica oleracea* L.」〕, イソマツ科植物1種〔スターチス「*Limonium sinuatum* (L.) Mill.」〕, オオバコ科植物1種〔キンギョソウ「*Antirrhinum majus* L.」〕, キキョウ科植物2種〔カンパニュラ「*Campanula medium* L.」, キキョウ「*Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A.DC.」〕, キク科植物7種〔アスター「*Callistephus chinensis* (L.) Nees」, ガイラルディア「*Gaillardia aristata* Pursh」, キンセンカ「*Calendula officinalis* L.」, コスモス「*Cosmos bipinnatus* Cav.」, ヒマワリ「*Helianthus annuus* L.」, ベニジューム「*Venidium fastuosum* (Jacq.) Stapf」, ヤグルマソウ「*Centaurea cyanus* L.」〕, キンポウゲ科植物2種〔セイヨウオダマキ「*Aquilegia vulgaris* L.」, チドリソウ「*Delphinium ajacis* L.」〕, ケシ科植物2種〔ハナビシソウ「*Eschscholzia californica* Cham.」, ヒナゲシ「*Papaver rhoeas* L.」〕, ゴマノハグサ科植物1種〔リナリア「*Linaria purpurea* (L.) Mill.」〕, シソ科植物1種〔ラベンダー「*Lavandula angustifolia* Mill.」〕, ナデシコ科植物3種〔カスミソウ「*Gypsophila elegans* M. Bieb.」, カーネーション「*Dianthus caryophyllus* x *D. plumarius*」, ナデシコ「*Dianthus superbus* L. var. *longicalycinus* (Maxim.) F. N. Williams」〕, マツムシソウ科植物1種〔スカビオサ「*Scabiosa atropurpurea* L.」〕, マメ科植物1種〔ルピナス「*Lupinus luteus* L.」〕を用いた. CdとPbの自然界濃度はそれぞれ, 0.295 mg/kg, 17.2 mg/kgであることが報告されている(浅見ら, 1988). 栽培土壌には矢作砂を用い, Cd試験土壌では3 mg/kg(自然界濃度の約10倍)と30 mg/kg(自然界濃度の約100倍), Pb試験土壌では100 mg/kg(自然界濃度の約6倍)と1000 mg/kg(自然界濃度の約58倍)の濃度になるよう塩化カドミウム(CdCl_2)と塩化鉛(PbCl_2)を添加し, 500 mlカップに500 gずつ充填して試験用のポットとした. 作製した試

験土壌に上記植物の種子を播種してガラス温室内で生育させ, 1ヵ月後の生存率を調べた.

2013年度の試験では供試植物としてアオイ科植物1種〔ホリホック「*Alcea rosea* L.」〕アブラナ科植物1種〔ナノハナ「*Brassica napus* L.」〕, キク科植物3種〔カイザイク「*Ammobium alatum* R.Br.」, ヒャクニチソウ「*Zinnia elegans* Jacq.」, マリーゴールド「*Tagetes erecta* L.」〕, ヒユ科植物1種〔センニチコウ「*Gomphrena globosa* L.」〕, キキョウ科植物1種〔ヤツシロ「*Campanula glomerata* L. subsp. *speciosa* (Spreng.) Domin」〕を用いた. 2012年の試験と同様の手法でCd試験土壌は1.5 mg/kg(自然界濃度の約5倍)と15 mg/kg(自然界濃度の約50倍)に, Pb試験土壌では50 mg/kg(自然界濃度の約3倍)と500 mg/kg(自然界濃度の約29倍)になるように調整し, 上記植物の種子を播種してガラス温室内で生育させ, 20日後の生存率を調べた.

実験 2. 植物体中 Cd および Pb 含量の測定

2012年度, 2013年度の重金属耐性試験でスクリーニングした植物のうち一部を重金属試験土壌において開花期まで生育させ, 地上部と地下部へのカドミウムおよび鉛の蓄積量を調査した. Cd試験土壌での栽培にはキク科植物7種(キンセンカ, コスモス, ヒマワリ, ヒャクニチソウ, ベニバナ, マリーゴールド, ヤグルマソウ), ナデシコ科植物2種(カスミソウ, カーネーション)を, Pb試験土壌での栽培にはアブラナ科植物1種(ハボタン), キク科植物6種(キンセンカ, コスモス, ヒマワリ, ヒャクニチソウ, ベニバナ, マリーゴールド), ナデシコ科植物1種(ナデシコ), マメ科植物1種(ルピナス)を用いた.

栽培土壌には矢作砂を用い, Cd試験土壌では3 mg/kg(自然界濃度の約10倍), Pb試験土壌では100 mg/kg(自然界濃度の約6倍)の濃度になるよう塩化カドミウム(CdCl_2)と硝酸鉛($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)を添加し, 1500 mlカップに1200 gずつ充填して試験用のポットとした. 作製した試験土壌に上記植物の種子を播種してガラス温室内で開花期まで生育させた. このとき本葉が出てからは週に一度液体肥料(N6, P10, K5)

を施与した。開花期に達したら植物体を回収し、地上部と地下部に分けて新鮮重を測定した。回収した植物体(地上部および地下部)は全てまとめて混合し(n=6-10)、サンプルの一部(新鮮重 2 g 相当)をマッフル炉(Muffle Furnace FO 610: Yamato)で 6 時間・500 度で保持し完全に灰化させた。灰化した試料に 17.5%塩酸を 3 ml 加えて攪拌後、電気コンロ上で加熱し蒸発させた。そこに 8.75%塩酸を 5 ml 加えて攪拌後ろ過し、8.75%塩酸で 10 ml にメスアップしたものを分析試料とした。試料中の Cd, Pb 濃度は原子吸光光度計(AAnalyst 400: Perkin Elmer)を用いて定量分析した。

3. 結果と考察

1. Cd および Pb 耐性植物の選抜

第1表に2012年度、2013年度におけるスクリーニングの結果を示した。Cd含有土壌で栽培した植物では、ハボタン、ガイラルディア、コスモス、ヒマワリ、ナノハナ、ベニバナ、マリーゴールド、ヤグルマソウスカビオサがCd濃度15 mg/kg(自然界濃度の約50倍)以上の試験土壌で70%を超える生存率を示した。また、Cd

は合計15種の植物が70%を超える生存率を示した。

一方Pb含有土壌で栽培した植物では、Pb濃度50～100 mg/kg(自然界濃度の約3～6倍)の試験土壌では13種の花弁植物が高い生存率を示したが、500 mg/kg(自然界濃度の約29倍)以上の試験土壌ではベニバナ、マリーゴールドのみが70%以上の高い生存率を示した。

今回の調査で、重金属濃度が自然界濃度の数倍程度の汚染土壌では多くの花卉植物が生育可能であること、そして 30～50 倍以上の汚染土壌でも生存が可能な種もあることが明らかとなった。近年、国内外の農地や工場跡地の重金属汚染の解決が課題となっている(Lee, 2013; 渡邊・笹谷, 2007)。こうした汚染土壌の多くは低濃度汚染ではあるが汚染サイトが広範囲に及んでおり、従来の物理化学的な手法では対処が難しい(王ら, 2004; 南ら, 2015)。このような汚染サイトにはファイトレメディエーションが有効であるが、定植する植物に観賞価値の高い花卉植物を利用することで環境美化をも行い、より受け入れやすい技術として発展していくことも期待できる。

第 1 表 栽培約 1 カ月後の生存率

2012年度		Cd				Pb		
科	種	0 mg/kg	0.3 mg/kg	3 mg/kg	30 mg/kg	10 mg/kg	100 mg/kg	1000 mg/kg
アブラナ科	ストック	30	60	60	10	80	70	0
アブラナ科	ハボタン	70	90	50	80	90	60	0
イソマツ科	スターチス	80	70	90	60	90	90	0
オオバコ科	キンギョソウ	100	80	70	20	80	60	0
キキョウ科	カンパニュラ	50	60	30	0	60	50	0
キキョウ科	キキョウ	50	30	60	0	60	80	0
キク科	アスター	60	70	10	0	70	80	0
キク科	ガイラルディア	90	90	90	90	90	90	30
キク科	キンセンカ	50	60	80	40	50	80	40
キク科	コスモス	100	90	80	80	70	60	—
キク科	ヒマワリ	100	90	90	90	90	80	—
キク科	ベニジューム	30	20	50	10	30	50	0
キク科	ヤグルマギク	70	40	70	70	—	—	—
キンボウゲ科	セイヨウオダマキ	60	40	60	0	40	20	0
キンボウゲ科	チドリソウ	20	10	30	30	50	30	0
ケシ科	ハナビシソウ	40	20	30	20	70	60	0
ケシ科	ヒナゲシ	50	40	20	0	—	—	—
ゴマノハグサ科	リナリア	90	90	80	0	80	90	0
シソ科	ラベンダー	50	70	70	10	30	50	0
ナデシコ科	カスミソウ	90	100	60	50	90	70	0
ナデシコ科	カーネーション	40	60	60	30	60	90	0
ナデシコ科	ナデシコ	80	60	50	0	—	—	—
マツムシソウ科	スカビオサ	60	90	80	80	60	70	20
マメ科	ルピナス	60	60	60	60	60	60	50
2013年度		Cd		Pb				
科	種	1.5 mg/kg	15 mg/kg	50 mg/kg	500 mg/kg			
アオイ科	ホリホック	75	50	50	58			
アブラナ科	ナノハナ	94	72	67	16			
キク科	ベニバナ	58	100	83	91			
キク科	カイザイク	50	44	22	27			
キク科	ヒャクニチソウ	75	60	60	42			
キク科	マリーゴールド	82	72	81	76			
ヒユ科	センニチコウ	72	17	42	8			
キキョウ科	ヤツシロ	0	6	0	0			

2. Cd および Pb の蓄積量

重金属耐性を示す植物には、重金属を取り込まないことで生体を防御する排除型と、重金属を体内に高い濃度になるまで取り込むことのできる集積型が存在する(南ら, 2015). フラワーレメディエーションでは、植物体地上部に重金属を蓄積させ植物体を刈り取ることで汚染土壌の修復を目指しており、集積型の花弁植物を選別する必要がある. そこで、上記の実験でCdおよびPb耐性を示した植物について植物体地上部に蓄積した重金属量を簡易的に測定し、地上部への重金属の蓄積量の少ないもの(排除型)や、抵抗性を示したが成長速度が極端に遅いものを除き、以降の実験に使用した(未発表).

植物体地上部・地下部におけるCd濃度($\mu\text{g g}$ 新鮮重 $^{-1}$)とCd含量(μg 個体 $^{-1}$)を第1図に示した. Cd濃度はベニバナの地上部(29.7 ppm)が最も高い値を示し、コスモスの地上部(27.8 ppm)、ヒャクニチソウの地下部(23.3 ppm)の順に高くなった. また、1個体当たりのCd含量の上位3種はキンセンカ(地上部30.1 μg , 地下部67.5 μg), マリーゴールド(地上部80.2 μg , 地下部12.5 μg), ヒャクニチソウ(地上部80.7 μg , 地下部9.5 μg)となった. 次に、植物体中のPb濃度($\mu\text{g g}$ 新鮮重 $^{-1}$)と1個体当たりのPb含量(μg 個体 $^{-1}$)を第3図に示した. Pb濃度はマリーゴールドの地下部で非常に高い値(118.5 ppm)を示し、次いでベニバナの地上部(53.3 ppm)、キンセンカの地下部(46.0 ppm)の順に高くなった. また、全体的に地上部よりも地下部のPb濃度が高くなる傾向が見られた. このとき、植物体のPb含量の上位3種は、マリーゴールド(地上部103.5 μg , 地下部797.2 μg), ヒマワリ(地上部179.4 μg , 地下部49.4 μg), キンセンカ(地上部139.2 μg , 地下部90.2 μg)となった. また、地上部と地下部への重金属蓄積量の割合は植物種によって大きく異なった(第1図, 第2図). フラワーレメディエーションにおいては、開花後の植物体地上部を刈り取ることで土壌中の重金属除去を目指すため、地上部に重金属を高濃度に蓄積する植物が望ましい. 従って本研究の結果から、今回解析した花卉植物の中では、Cdの除去には蓄積濃度からコスモス、ベニバナ、ヒャクニ

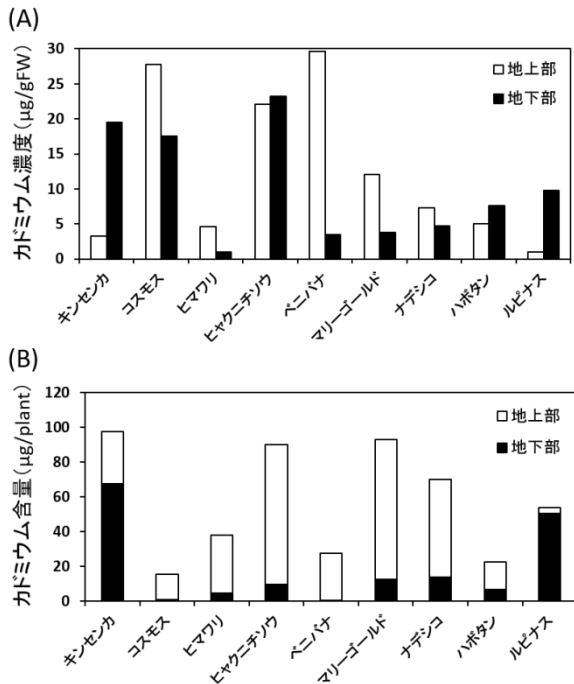
チソウ、マリーゴールドが、Pbの除去にはキンセンカ、ヒマワリ、ベニバナがフラワーレメディエーションへの利用に有望であると思われる.

植物体が吸収した重金属の量は、植物体中の重金属濃度に植物体の大きさ(バイオマス)で決まる. 従って、植物体中の重金属濃度が高くても、バイオマスが小さければ実際に吸収した重金属の量は少なくなる. コスモスのCd含量やベニバナの地上部Pb含量が少なくなったのは、植物体のバイオマスが小さかったためである. ファイトレメディエーションに有効な花卉植物を選別する際には、重金属耐性に加えて植物のバイオマスの大きさが重要になる. しかし、今回の実験では砂と液肥を用いて生育させたため、開花はしたものの生育が抑制されバイオマスが小さくなった. 従って、今後は富栄養土壌に播種し、標準的な大きさまで生育させたもので蓄積量を解析する必要がある.

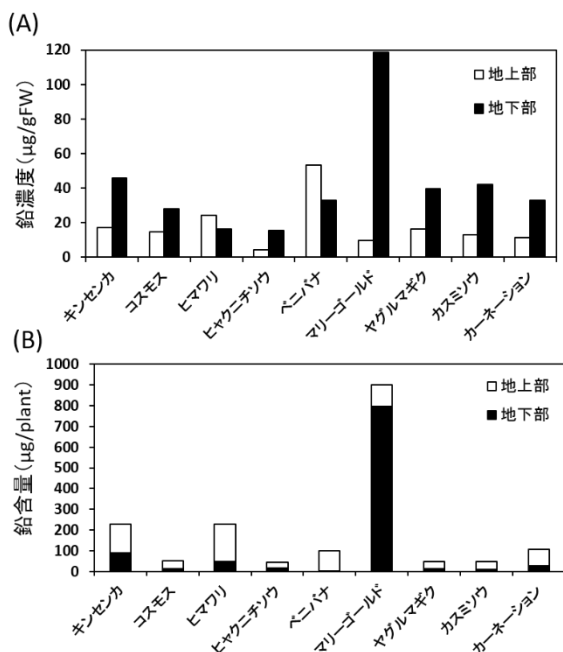
重金属高蓄積植物は通常の新蓄積性植物より100倍以上の蓄積能力がある植物種と定義され、これらの植物体内にはCdは100 $\mu\text{g g}$ 乾物重 $^{-1}$, Pbは1000 $\mu\text{g g}$ 乾物重 $^{-1}$ 以上になる(Lasat, 2002). 今回の実験では乾物重(DW)ではなく新鮮重(FW)あたりの濃度を測定したため直接的な比較はできないが、植物体の大部分が水分で占められていることから、今回測定した花卉植物中の重金属濃度は乾物重あたり濃度では数倍高くなることが予想される. ファイトレメディエーションの研究はこれまでコケやシダ、樹木などが主流であったが、観賞価値の高い花卉植物にも一定量の重金属を地上部に蓄積できるものが存在することが判明し、重金属蓄積量の多い花卉植物の選別を継続することで重金属高蓄積植物の花卉植物が見つかる可能性もある.

本研究により、花卉植物の重金属耐性と重金属の蓄積量は種間で大きく差があることや、重金属の地上部への移行しやすさにも差があることが明らかになった. さらにキンセンカ、コスモス、ヒマワリ、ヒャクニチソウ、ベニバナ、マリーゴールドなどは観賞価値に加えて地上部への重金属蓄積能力が高いことが明らかとなり、花卉植物を利用した土壌浄化技術の実現可

能性が示された。今後は重金属蓄積能の高い花卉植物の選抜に加え、重金属蓄積のメカニズムの解明や重金属を高濃度に蓄積する花卉植物の育種などにも取り組んでいく必要がある。



第 1 図 植物体の地上部・地下部における カドミウム濃度 (A) および含量 (B)。



第 2 図 植物体の地上部・地下部における 鉛濃度 (A) および含量 (B)。

4. 謝辞

本研究にご協力頂いた中部大学応用生物学部の今井暁久氏、今田侑里奈氏、浦部和也氏、生越千晶氏、恩田愛氏、亀垣千晴氏、酒井絵理香氏、三田薫氏、杉原秀教氏、高山雅人氏及び栽培管理にご協力頂いた榊原孝平氏に厚く御礼申し上げます。

引用文献

浅見輝男・久保田正亜・南沢 究 (1988): 土壌中のカドミウム, アンチモン, ビスマスなど重金属元素の自然界値, 日本土壌肥料学雑誌, 59:197-199.

王効拳・李法雲・岡崎正規・杉崎三男(2002): ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復, 埼玉県環境科学国際センター報 3: 114-123.

王効拳・李法雲・杉崎三男(2004): 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): 13-21.

Lasat, M. M. 2002. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. Journal of Environmental Quality 31: 109-120.

Lee, Jae, Heung. 2013. An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control. Biotechnology and Bioprocess Engineering 18: 431-439.

Leitenmaier, B. and Küpper, H. 2013. Compartmentation and complexation of metals in hyperaccumulator plants. Frontiers in Plant Science 20(4): 374.

Salt, D. E., Smith, R. D., Raskin, I. 1998. Phytoremediation. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology 49:

643-668.

社団法人日本機械工業連合会(2008):平成 19 年度
土壌汚染対策に関する動向調査報告書，日機
連 19 環境安全 2:1-36.

南基泰・上野薫・山木昭平. 2015. 環境生物学序論
改訂版. PP.225-230. 風媒社. 愛知.

渡邊浩一郎・笹谷和代(2007):キク科花卉植物による
カドミウムのファイトレメディエーションと銅および
亜鉛の吸収-カドミウム添加土壌を用いたポット
試験-, 帝京科学大学紀要 3:21-27.

Title: Flower-remediation: heavy metal

phytoremediation by ornamental flowers

Author(s) : Takanori Horibe, Shohei Yamaki, Kunio
Yamada

Address(es) : Graduate School of Bioscience and
Biotechnology, Chubu University, 1200
Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

Keywords : Cadmium, environment beautification,
lead, soil remediation

Summary

Flower-remediation: heavy metal phytoremediation by ornamental flowers

Takanori Horibe¹⁾, Shohei Yamaki¹⁾, Kunio Yamada¹⁾

1) College of Bioscience and Biotechnology, Chubu University.

We tried to establish the method of removing soil heavy metal pollution using ornamental flowers, and investigated the heavy metal tolerance and the heavy metal accumulation ability of ornamental flowers using cadmium (Cd) and lead (Pb). We used approximately 30 kinds of ornamental flowers to investigate heavy metal tolerance, and found that some of them could live on soil which contains heavy metal more than 50 times of natural concentration. Then, 9 kinds of ornamental flowers were grown on the soil containing Cd and Pb, and heavy metal concentrations of them were investigated. Results showed that some ornamental flowers including marigold, calendula, and sunflower has high ability to accumulate Cd and Pb in above-ground part in addition to their high ornamental value. In this study, it is suggested that some ornamental flowers are suitable for the Cd and Pb phytoremediation.