

# 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—

渡邊浩一郎\* 笹谷和代\*\*

(平成 18 年 12 月 2 日受理)

## Cadmium phytoremediation and uptake of zinc and copper by *Asteraceae* plants —a pot experiment using cadmium enriched soil

Koichiro WATANABE\* Kazuyo SASAYA\*\*

Phytoremediation, using plants to extract heavy metals, such as Cd, from contaminated soils, is an emerging technology. Experiments were conducted in order to investigate the effect of Cd concentration in soil on growth and the absorption of Cd, Zn, and Cu by the shoots. The experiments were conducted on 8 *Asteraceae* species using Cd concentrations of 3.4, 6.5, and 9.5  $\mu\text{g g}^{-1}$  of dry soil.

A higher Cd concentration in the soil resulted in an increase in the Cd concentration in the shoots of the 8 species and an increase in the dry weight and Cd absorption of the shoots of *Pericallis hybrida*, *Crepis rubra*, and *Gazania spp.* The higher Cd absorption of the shoot increased Zn absorption of the shoot in *Pericallis hybrida* and *Crepis rubra*, and Cu absorption of that in *Cosmos bipinnatus*, *Crepis rubra* and *Gazania spp.*

It is suggested that *Pericallis hybrida*, *Crepis rubra*, and *Gazania spp.* are suitable for Cd phytoremediation and that Cd accumulation in the shoots of *Crepis rubra* and *Gazania spp.*, led to the accumulation of Zn and Cu.

キーワード：カドミウム, ファイトレメディエーション, 銅, 亜鉛, キク科花卉植物, cadmium, phytoremediation, zinc, copper, *Asteraceae*

### 1. はじめに

近年、植物がもつ土壌からの物質吸収能を利用した環境修復、浄化（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<sup>1)</sup>。ファイトレメディエーションによる土壌中の汚染物質の除去は、客土法などの従来の汚染土壌修復法に比べて、環境への負荷が少ない、長期的に広範囲を修復することが可能、低コストといった利点を有する。しかし、実用化のためには植物の探索と選択が重要となる。

カドミウム(Cd)は有害重金属として知られ、植物を介した食物連鎖によって人と動物に大きな影響を与える。そのためCd汚染土壌の修復は現在も解決すべき重要な問題として指摘されている。Cdのファイトレメディエーションに適用する植物については、ゲンババナなどのCd超集積植物、*Brassica*属植物や稲、麦、ケナフなどのバイオマス生産量の高い植物の利用が報告されている<sup>2-4)</sup>。

一方、ファイトレメディエーションを実施する場合、

汚染地の景観を少しでも高い植物を利用することも視野に入れる必要があると考えられる。例えば、観賞用花卉植物や緑化植物を利用することにより、ファイトレメディエーションが一般大衆にも受け入れられやすい技術として発展することも期待される。しかし、花卉植物や緑化植物によるCdのファイトレメディエーションに関する報告は見あたらない。

また、Cdによる土壌汚染は銅(Cu)鉱山や亜鉛(Zn)精錬所付近で多く発生している。これらの土壌ではCuやZnの集積による汚染も生じている<sup>5, 6)</sup>。植物のCdとZnおよびCu吸収の間には相乗効果や拮抗作用がみられることも知られている。そこで、Cd濃度が高い土壌でCd吸収だけが多いのではなく、ZnやCu含有量も高くなる植物種が明らかになれば、これらの重金属による複合汚染にも対処できると考えられる。

以上のことから、本研究では、荒地でも成育する植物種が多く存在するキク科に属する花卉植物から8種を供試して、Cd添加濃度を変えた土壌を用いたポッ

\* 理工学部環境科学科

\*\* ㈱テルナイト

ト試験により、植物体の成育、Cd および Zn、Cu 吸収における植物種間差を検討した。

## 2. 実験方法

供試植物として、カレンジュラ (*Calendula officiaalis*; 品種ドワーファイリスイエロー)、アスター (*Callistephus chinensis*; 品種松本スカレット)、シネラリア (*Senecio cruenta*; 品種ジェスターブルー)、モモイロタンポポ (*Crepis rubra*; 品種クレプスピンク)、コスモス (*Cosmos bipinnatus*; 品種オレンジキャンパス)、ガザニア (*Gazania spp.*; ブライトオレンジ)、クリサンセマム (*Leucanthemum paludosum*; 品種ノースポール) およびマリーゴールド (*Tagetes patula*; 品種マーチエロー) のキク科植物 8 種 (榊サカタのタネより市販) を用いた。いずれも、種子を 0.5% 次亜塩素酸ナトリウム溶液で滅菌した後、土耕ポット試験に供した。

栽培土壌には、Fujimi 製 Delux ガーデニング培養土 (天然熟成発酵土、硬質赤玉土、パーミキュライト、ピートモス、ゼオライト、緩効性肥料 (N6, P36, K6, Mg16) 混合) を用いた。500mL 容ポリエチレン製ビーカーを用い、1ポット当たり約 360g の土壌を入れ、Cd を硫酸カドミウム水溶液で  $6.5 \text{ mg kg}^{-1}$  乾土 (以下 Cd 1 区) および  $9.5 \text{ mg kg}^{-1}$  乾土 (Cd 2 区) となるように添加した。また、Cd を添加しない区を対照区とした。なお、フッ化水素酸-過塩素酸分解法<sup>7)</sup>で求めた土壌の全 Cd、Cu、Zn 濃度を表 1 に、 $0.1 \text{ mol l}^{-1}$  塩酸抽出法<sup>7)</sup>で求めた土壌の可給性 Cd、Cu、Zn 濃度を表 2 にそれぞれ示した。

試験は各区 3 連、発芽約 10 日後に間引きを行い、1ポット当たりの株数は、マリーゴールドで 2 株、カレンジュラ、ガザニア、クリサンセマムで 3 株、アスター、シネラリア、モモイロタンポポで 4 株、コスモスで 5 株であった。播種からサンプリングまでの栽培を、本学 (山梨県上野原市) 構内に設置した自然光型ファイトロン (小糸工業株製コイトロン S-180) 内で、栽培温度は昼  $27^\circ\text{C}$ 、夜  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度は約 70% で行った。

栽培期間は、カレンジュラ、シネラリア、コスモスは 2003 年 11 月 18 日よりそれぞれ 50、59、37 日間、アスター、モモイロタンポポは 2004 年 8 月 6 日よりそれぞれ 40、38 日間、ガザニア、クリサンセマム、マリーゴールドは 2004 年 9 月 3 日よりそれぞれ 30、30、32 日間で、いずれの植物も栄養成長期が終了したとみられる時までであった。

栽培終了後、サンプリングした茎葉部を  $80^\circ\text{C}$  で 48

時間通風乾燥し乾物重を測定した。さらに、硝酸-過塩素酸法<sup>7)</sup>により湿式分解し、Cd、Cu、Zn 濃度を原子吸光光度法で定量分析した。

## 3. 結果

表 1 に、土壌中の全 Cd、Zn および Cu 濃度を示した。土壌への Cd 添加が正確に行われていたこと、また Zn、Cu 濃度に Cd 添加による影響は生じていないことが示された。さらに、土壌の可給性 Cd、Zn および Cu 濃度を表 2 に示した。Cd を添加した区では全 Cd の約 32~40% が可給態 Cd として存在していることが示された。対照区の全 Cd 濃度は  $3.4 \mu\text{g 乾土 g}^{-1}$  であったが、可給性 Cd 濃度は Cd 非汚染土壌のそれと同レベル<sup>5)</sup>であった。

また、Cd 1 区および Cd 2 区では、全 Cd、可給性 Cd とともに汚染土壌のそれに該当するレベル<sup>5)</sup>で 2 段階の濃度が設定されたことが示された。

表 1 フッ化水素酸-過塩素酸分解法による Cd、Zn および Cu 濃度 ( $\mu\text{g 乾土 g}^{-1}$ )

区	Cd	Zn	Cu
対照	0.35	100	34
Cd 1	6.5	100	34
Cd 2	9.5	100	34

Cd 1: Cd を  $6.5 \text{ mg 乾土 kg}^{-1}$  となるように添加した。

Cd 2: Cd を  $9.5 \text{ mg 乾土 kg}^{-1}$  となるように添加した。

表 2  $0.1 \text{ mol l}^{-1}$  塩酸抽出法による Cd、Zn および Cu 濃度 ( $\mu\text{g 乾土 g}^{-1}$ )

区	Cd	Zn	Cu
対照	0.05	7.1	0.8
Cd 1	2.1	7.1	0.9
Cd 2	3.8	7.2	0.8

Cd 1、Cd 2 は表 1 に準ずる。

次に、植物体の成育を一個体あたりの茎葉部乾物重で表し、図 1 に示した。カレンジュラ、クリサンセマム、マリーゴールドでは土壌中 Cd 濃度が高くなると成育は低下したのに対して、アスター、コスモスでは土壌中 Cd 濃度の影響はほとんどみられなかった。

次に、植物体の成育を一個体あたりの茎葉部乾物重で表し、図1に示した。カレンジュラ、クリサンセマム、マリーゴールドでは土壌中 Cd 濃度が高くなると成育は低下したのに対して、アスター、コスモスでは土壌中 Cd 濃度の影響はほとんどみられなかった。一方、シネラリア、モモイロタンポポ、ガザニアでは土壌中 Cd 濃度が高くなると乾物重も大きくなること示された。これらのことから、植物体の成育に対する土壌中 Cd 濃度の影響は同じキク科植物でも種により異なることが示された。

植物体茎葉部中 Cd 濃度を図2に示した。供試した8種類の植物とも、土壌中 Cd 濃度が高くなるにつれて植物中 Cd 濃度も高くなる傾向が見られた。

植物体茎葉部中 Zn 濃度を図3に示した。アスターで土壌中 Cd 濃度が高くなるにつれて植物体中 Zn 濃度も高くなる傾向が見られた。一方、シネラリアでは土壌に Cd が添加されると Zn 濃度は減少したが、Zn 濃度に添加 Cd 濃度による差はみられなかった。他の6種では土壌中 Cd 濃度の増加による植物体中 Zn 濃度の変化はほとんどみられなかった。

植物体中 Cu 濃度を図4に示した。モモイロタンポポ、コスモスでは土壌中 Cd 濃度が高くなるにつれて植物体中 Cu 濃度も高くなる傾向が見られた。一方、シネラリアでは土壌に Cd が添加されると Cu 濃度は低下した

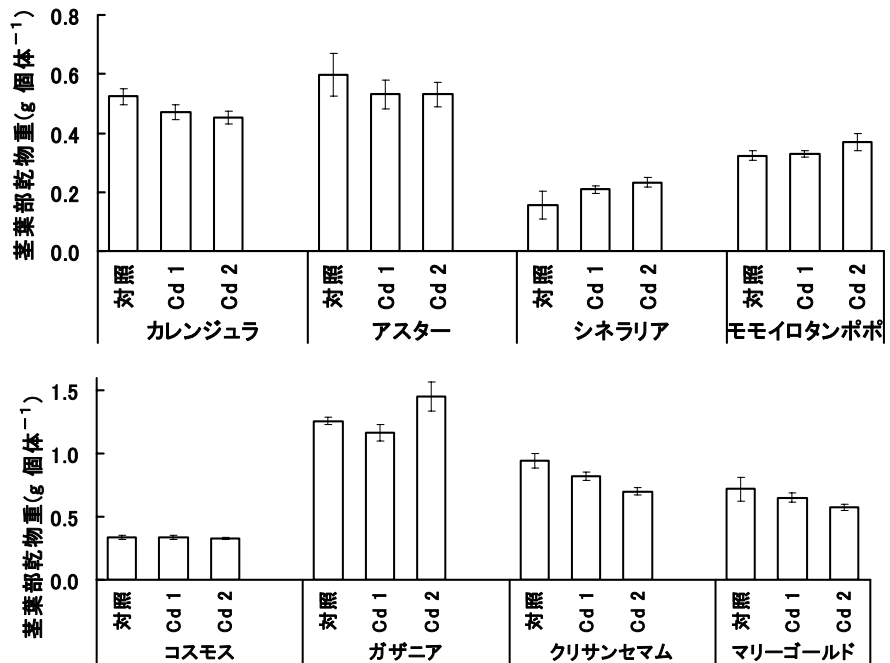


図1 植物体の成育に及ぼす土壌中Cdの影響  
(グラフ棒中の垂線は標準偏差. n=6~15(植物種により異なる))

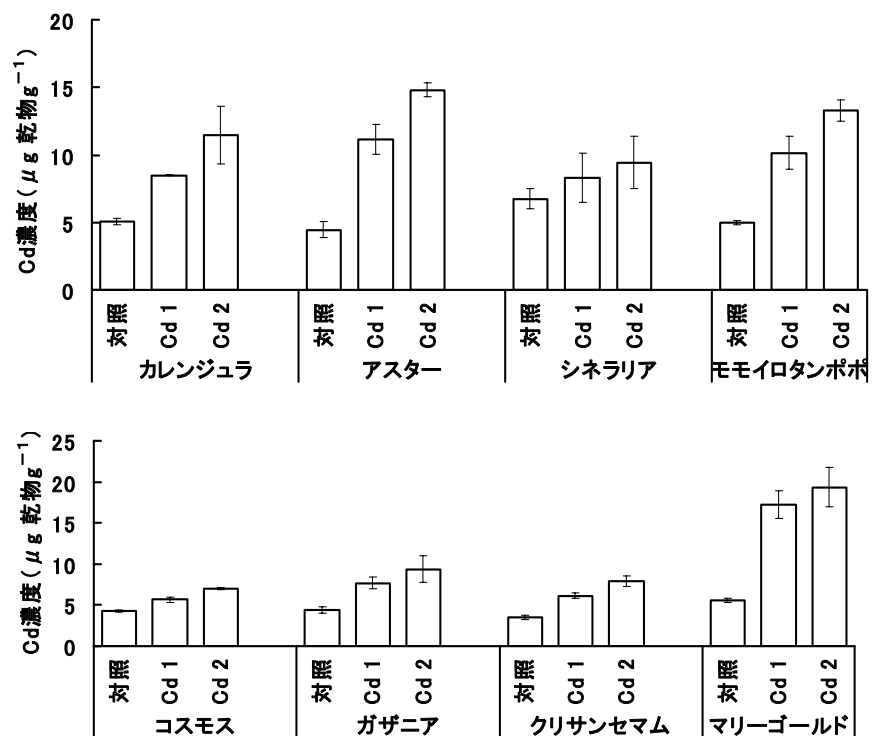


図2 植物体茎葉部Cd濃度に及ぼす土壌中Cdの影響  
(グラフ棒中の垂線は標準偏差. n=3(試料をポット毎にまとめて分解、分析))

が、Cu 濃度にも添加 Cd 濃度による差はみられなかった。他の5種では、土壌中 Cd 濃度の増加による植物体中 Cu 濃度の変化はほとんどみられなかった。

また、植物体茎葉部中 Cd 含有量を図5に示した。供試した8種類の植物では、いずれも土壌中 Cd 濃度が高

くなるにつれて植物中 Cd 含有量は増加する傾向がみられ、ガザニアでもっとも多く Cd を蓄積することが示された。一方、土壤中 Cd 濃度が高くなっても成育の低下がみられなかったシネラリア、モモイロタンポポ、コスモスの Cd 含有量は、土壤中 Cd 濃度が高くなったときに成育が低下したカレンジュラ、クリサンセマム、マリーゴールドよりも低かった。

図6に、植物体茎葉部中 Zn 含有量を示した。土壤中 Cd 濃度が高くなると成育が低下する傾向がみられたカレンジュラ、クリサンセマム、マリーゴールドでは、Zn 含有量も低下することが示された。これらの3種の植物では茎葉部における Cd 含有量の増加にともなって Zn の吸収移行も抑制されたのではないかと思われる。一方、アスター、コスモス、シネラリアの Zn 含有量に土壤中 Cd 濃度の影響はほとんどみられなかったが、モモイロタンポポ、ガザニアでは茎葉部 Cd 含有量の増加にともなって Zn 含有量も増加することが示された。

図7に、植物体茎葉部中 Cu 含有量を示した。土壤中 Cd 濃度が高くなると成育が低下したカレンジュラ、クリサンセマム、マリーゴールドでは土壤中 Cd 濃度が高くなると茎葉部 Cu 含有量も低下した。一方、シネラリア、アスターには土壤中 Cd 濃度の影響はほとんどみら

れなかったが、コスモス、モモイロタンポポ、ガザニアでは土壤中 Cd 濃度が高くなると茎葉部 Cu 含有量も増加する傾向がみられた。

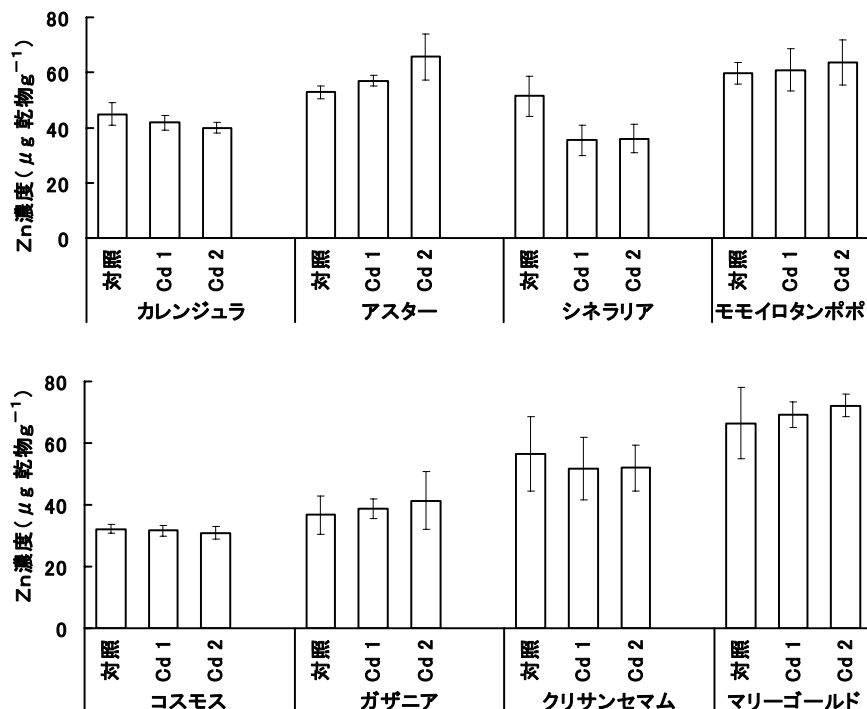


図3 植物体茎葉部Zn濃度に及ぼす土壤中Cdの影響

(グラフ棒中の垂線は標準偏差. n=3(試料をポット毎にまとめて分解、分析))

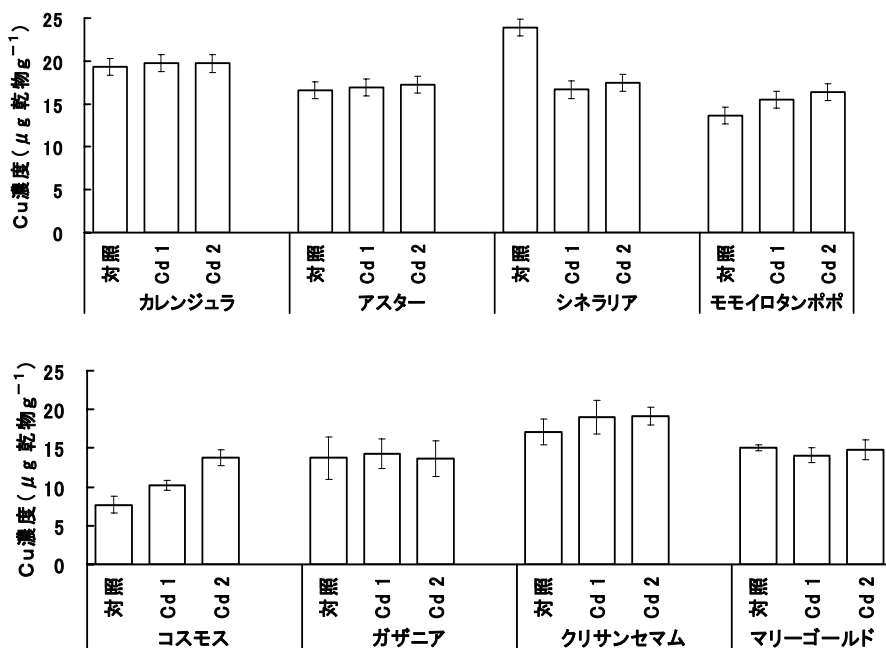


図4 植物体茎葉部Cu濃度に及ぼす土壤中Cdの影響

(グラフ棒中の垂線は標準偏差. n=3(試料をポット毎にまとめて分解、分析))

#### 4. 考察

ファイトレメディエーションでは、植物体の茎葉部に土壌からの除去を目的とする物質が集積されることが必要である。そこで、本研究では供試した8種のキク科植物の茎葉部に着目して、植物体の成育、Cd, Zn, Cuの濃度および1個体あたりの含有量を調べた。しかし、8種の植物の栽培において、栽培時期や日数を同じに行うことができなかったため、それぞれの土壌中Cd濃度において、これらのデータを直接に比較することはできない。また、栽培株数も異なるので、土壌からのCdの除去量を1ポットあたりのCd減少量で評価することが困難なため、土壌中Cd濃度の増加にともなう植物体茎葉部1個体あたりのCd吸収量の増加で評価することとした。

また、Cdのファイトレメディエーションに最適な栽培期間についての報告は見あたらない。本研究では、生殖成長期以降の老化にともなう生じる葉の脱落を避けるために、それぞれの栄養成長期の終了時までを栽培期間とした。しかし、茎葉部へ取り込まれたCdが根へ再転流されている可能性もあり、茎葉部へのCd集積を最大とする成育ステージを明らかにする必要がある。

一方、従来、植物によるCd吸収・蓄積、耐性に関する比較研究が行われており<sup>2)</sup>、Cdは生物に対して有害な金属元素として知られている。しかし、本実験に供試した8種のキク科植物のうち、シネラリア、モモイロタンポポ、ガザニアでは土壌中Cd濃度が高い方で茎葉部乾物重が増加し、茎葉部Cd濃度も増加していた。植物体中

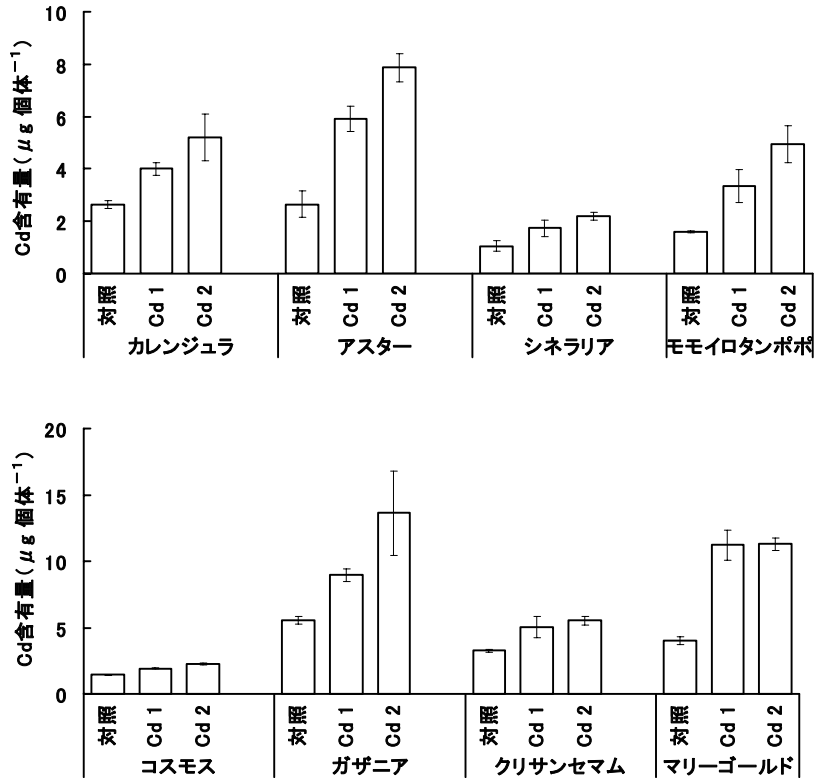


図5 植物体茎葉部Cd含有量に及ぼす土壌中Cdの影響  
(グラフ棒中の垂線は標準偏差. n=3(試料をポット毎にまとめて分解、分析))

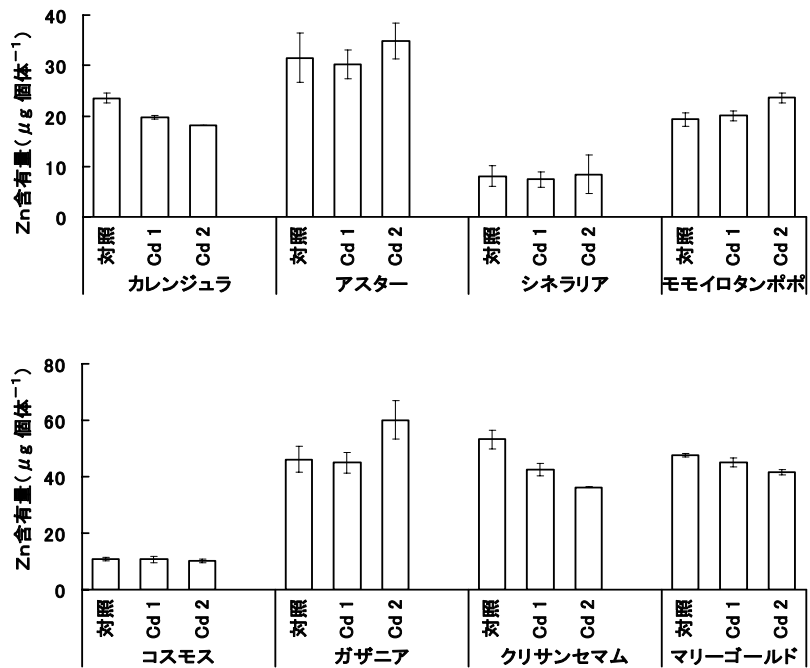


図6 植物体茎葉部Zn含有量に及ぼす土壌中Cdの影響  
(グラフ棒中の垂線は標準偏差. n=3(試料をポット毎にまとめて分解、分析))

Cd濃度が増加したときに植物成育の促進が見られることや、植物体の成育促進に対するCdの機能に関する報告は見あたらず、今後解明すべき点である。

重金属は、他の栄養元素の吸収と分布に影響を及ぼ

すといわれている。水耕栽培下の水稻では、培養液中 Cd 濃度を高めた場合に茎葉部 Zn 含有量も増加することが報告されている<sup>7)</sup>。また、水耕栽培下の9品種のアブラナ科植物では培養液中 Cd 濃度を高くしても、茎葉部 Zn 含有量および Cu 含有量にはほとんど変化が見られないことが報告されている<sup>8)</sup>。

本実験結果は土耕ポット試験により得られたものであるが、モモイロタンポポ、ガザニアの Zn 含有量の変化については水稻の Zn 含有量の変化<sup>7)</sup>と同様

の傾向が、また、アスター、コスモス、シネラリアの Zn 含有量についてはアブラナ科植物の Zn 含有量<sup>8)</sup>と同様の傾向がそれぞれみられた。また、Cu については、シネラリア、アスターでアブラナ科植物<sup>8)</sup>と同様の傾向であったが、コスモス、モモイロタンポポ、ガザニアでは Cd と Cu の吸収に相乗効果がみられた。これらの5種類の植物においては Cd 吸収にともなう Cu, Zn の吸収の拮抗作用は生じていないと考えられる。したがって、土壤中 Cd 濃度の増加にともなうモモイロタンポポ、ガザニアの成育の増加は、Zn および Cu 吸収の増加も一因となったのではないと思われる。

一方、土壤中 Cd 濃度の増加にともない成育の低下がみられたカレンジュラ、クリサンセマム、マリーゴールドでは、土壤中 Cd 濃度の増加にともない Zn 及び Cu 吸収量は減少していたことから Cd と Zn 及び Cu の吸収間に拮抗作用が生じていたものと考えられる。したがって、これらの3種の植物でみられた成育低下は、Cd 吸収量の増加による影響だけではなく Zn および Cu 欠乏の可能性も考えられる。これらのことから、同じキク科植物でも土壤中 Cd 濃度の増加にともなう Cd と Zn および Cu 吸収の間に生じる相乗および拮抗作用は植物種により異なるものと考えられたが、今後さらに詳細な検討が必要である。

以上のことから、供試した8種のキク科花卉植物のうち、シネラリア、モモイロタンポポ、ガザニアで Cd

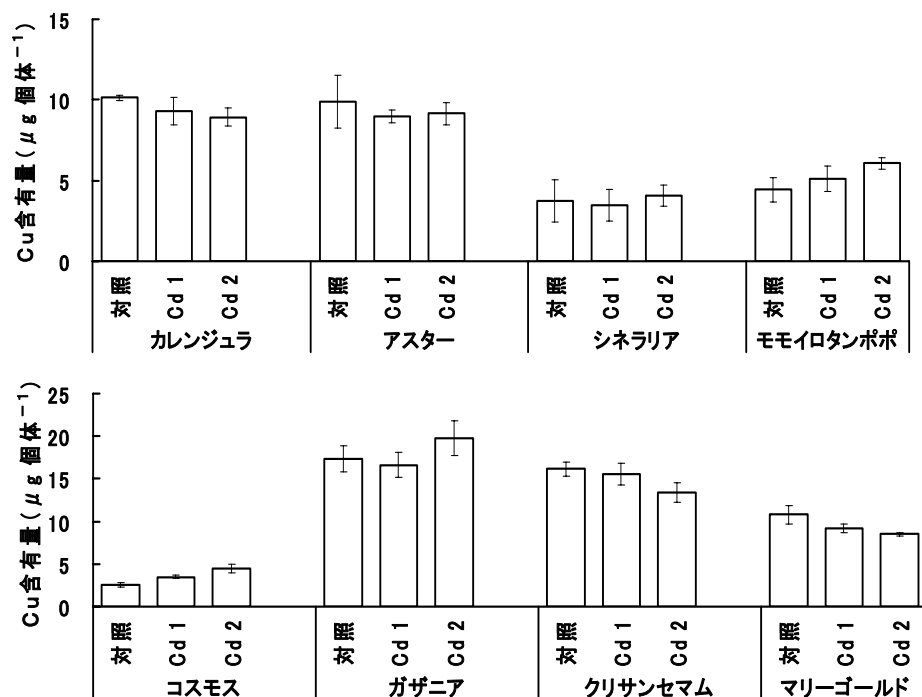


図7 植物体茎葉部Cu含有量に及ぼす土壤中Cdの影響  
(グラフ棒中の垂線は標準偏差. n=3(試料をポット毎にまとめて分解、分析))

ファイトレメディエーションに適する可能性が示唆された。また、モモイロタンポポ、ガザニアでは茎葉部へのCdの集積とともに Zn, Cu の集積も促進されることがわかった。

今後は、景観の向上や観賞用として花卉植物の利用を考えるうえで、これらの植物の Cd 吸収に対する最適な栽培期間も詳細に調べる必要がある。

## 5. 謝辞

本研究は文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業(平成12年度～平成18年度)による助成を受けて行った。

## 引用文献

1. 日本土壤肥料学会: 植物と微生物による環境修復, 博友社, 東京, 2000.
2. 織田(渡辺)久男, 荒尾智人: 作物におけるカドミウムの吸収・移行と生理作用, 土肥誌, 77(4):439-449, 2006.
3. S. D. Ebbs, M. M. Lasat, D. J. Brady, J. Cornish, R. Gordon and L. V. Kochian: Heavy metals in the environment. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil, *J. Environ.*

*Qual.*, 26, 1424-1430, 1997.

4. 栗原宏幸, 渡辺美生, 早川孝彦: 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, *土肥誌*, 76(1):27-34, 2005.
5. 浅見輝男: データで示すー日本土壌の有害金属汚染, アグネ技術センター, 東京, 2001.
6. 平田 熙, 渡邊浩一郎: 群馬県安中精錬所周辺農地におけるカドミウム・亜鉛汚染の現況, *耕*, No.110, 2006.
7. (財)日本土壌協会分析法: 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, (財)日本土壌協会分析法, 東京, 2001.
8. 本間美文, 平田 熙: イネの生育およびカドミウム吸収移行に及ぼす亜鉛共存の影響, *土肥誌*, 47(5):314-320, 1976.
9. 王 莉, 東 照雄, 藤村達人: 水耕栽培下でのアブラナ科 (*Brassica*) 植物によるカドミウムと無機養分の吸収特性, *土肥誌*, 75(3):329-338, 2004.