

# アカザ (*Chenopodium album* var. *centrorubrum*) を用いた 六価クロムおよび鉛の模擬汚染土壌における重金属の 吸収・蓄積とそれに伴う生育反応への影響

Chromium and lead absorption ability and growth reaction of *Chenopodium album* var. *centrorubrum* in a metal-contaminated soil

横山和憲<sup>1</sup>・涌井史郎<sup>2</sup>・土路生修三<sup>3</sup>・横塚 享<sup>3</sup>・内藤 敏<sup>3</sup>  
浅井俊光<sup>4</sup>・飯島健太郎<sup>1</sup>・森永茂生<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 桐蔭横浜大学医用工学部・<sup>2</sup> 東京都市大学環境情報学科・<sup>3</sup> 株式会社熊谷組・<sup>4</sup> 東京農業大学

(2014年3月20日 受理)

## 1. はじめに

近年の深刻な重金属による土壌汚染の早期な修復が早急に求められている<sup>1)</sup>。土壌の修復の一つの方法として、植物の重金属の吸収・蓄積を利用した汚染土壌の修復技術であるファイトレメディエーションは、安価で環境負荷も少ないなどの点から多くの重金属高集積植物が報告されている。我々は、重金属に汚染された病院や工場跡地などの広い土地面積の再開発において、ファイトレメディエーションの基づく重金属の除去を行うだけでなく、その土地が重金属にどの程度汚染されているかを、植物の生育をもとに予想する「植物センサー」を目指し数種の供試植物による基礎研究を実施し、その結果を学会や桐蔭論叢にも報告している<sup>2,5)</sup>。

本研究では、重金属の中でも、土壌汚染の報告例が多い鉛や研究報告が少ない六価クロムを取り上げた。また、対象とする植物には、畑などに自生するアカザ (*Chenopodium album* var. *centrorubrum*) を選び、この植生

から数十 cm ~ 1m の汚染土壌を想定しての実験を行うことにした。供試した植物の生育(葉数、茎長、色差)の測定と、重金属吸収能(葉、茎、根)との関連を明らかにすることで、植物を用いた土壌汚染の指標化を検討した。

## 2. 実験方法

### (1) 実験フィールド

実験フィールドの概要を Fig. 1 に示す。実験は、縦 288 × 横 130 × 高さ 110cm の枠組を作製し、底に重金属を吸収する吸着層 (10cm) を敷きつめたものをビニールハウス内に設置した。供試植物は直径 10 × 100cm の塩ビ管に模擬汚染土壌を詰め、それぞれにポットから苗を一つずつ移植して各 10 個設置した。

土壌は、市販の赤玉土の小粒、中粒を質量比 1:1 で混合したものをを用いた。六価クロム模擬汚染土壌は、先の土壌に重金属の環境基準の一つである溶出量環境基準の 10 倍および 100 倍になるように、二クロム酸ナトリウム水溶液を添加して作製した。この時の六価

<sup>1</sup>Kazunori YOKOYAMA, Kentaro IJIMA, Shigeo MORINAGA : Department of Biomedical Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, Japan 225-8503

<sup>2</sup>Shiro WAKUI : Tokyo City University,

<sup>3</sup>Shuzo TOROBU, Toru YOKOTSUKA, Satoshi NAITO : KUMAGAI GUMI Co., Ltd

<sup>4</sup>Toshimitsu ASAI : Tokyo University of Agriculture

クロムの土壌含有量は、5mg/kg - 乾燥重量 (Cr-5 区) および 50mg/kg - 乾燥重量 (Cr-50 区) となる。同様に、鉛模擬汚染土壌は、溶出環境基準の 10 倍および 100 倍になるように、硝酸鉛水溶液を添加して作製した。この時の鉛の土壌含有量は、1mg/kg - 乾燥重量 (Pb-1 区) および 10mg/kg - 乾燥重量 (Pb-10 区) となる。また、非汚染土壌区を比較対照 (Cont. 区) とした。

実験は 2010 年 6 月 10 日の植え付けから同年 10 月 20 日まで、適度に水遣りなどを行いアカザの生育を管理した。

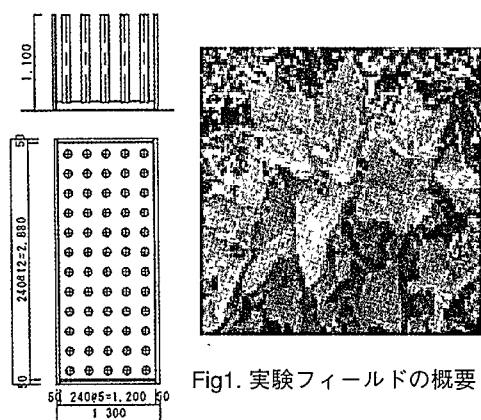


Fig1. 実験フィールドの概要

### (2) 測定方法

葉数・茎長：植え付けから約二週間ごとに植物の生育観察として、葉数・茎長を 8 月までは 10 株、以降は 5 株についてメジャーで測定した。なお、茎長は根元から先端までの最も長い茎を測定した。これらの測定から平均値と偏差を算出した。

色度・色調：各植物の葉表面を、色彩色差計 (コニカミノルタ社-CR-400) での  $L^* a^* b^*$  表色系を用いて行い、一株につき葉表面を無作為に 5 点以上選び、測定した。色彩色差計では、物体にあたった光の反射をセンサーで読み取り数値化し、 $L^* a^* b^*$  表色系では、色度を  $a^*$  と  $b^*$  で示し、色調を明度  $L^*$  と彩度を  $C^* (= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2})$  で表す。

重金属分析：アカザの各部位 (葉、茎、根) におけるクロムや鉛の分析試料は、8 月 26、27 日と 10 月 19、20 日の二回に分けて

採取した。採取試料は表面の土を水でよく洗い流した後、蒸留水でよくすすいだものを凍結乾燥した。乾燥試料は、各部位に分けて粉碎し硝酸や塩酸を用いて湿式酸分解した。各部位の分解溶液中のクロムまたは鉛濃度はフレイムレス原子吸光度計 (セイコー電子社 SAS7500) で標準添加法を用いて測定した。尚、今回の方法では異なった価数のクロムは区別して測定できないため、全クロムとして結果を示した。

## 3. 結果と考察

### (1) 生育 (葉数・茎長)

Fig2 に、アカザの葉数の経時変化を示した。葉数は、Cont. 区および汚染区の全てにおいて、時間の経過に伴い増加する傾向を示した。7 月初旬までは、Cont. 区と汚染区の葉数の差は見られなかったが、それ以降、Cr-50 区では他より低い増加傾向で推移し、9 月中旬からの 2 週間に約 2 倍に増えた。また、Cr-5 区は、Cont. 区および Cr-50 区よりも、一貫して葉数は多かった。葉数の最終値は、Cr-5 区 ( $143 \pm 34$  枚)、Cr-50 区 ( $135 \pm 16$  枚)、Cont. 区 ( $113 \pm 42$  枚) の順に多くなった。

鉛土壌における葉数も、すべて 7 月 9 日までほぼ同じ枚数であった。Cont. 区では 9 月 3 日以降は、ほぼ葉数は変化がみられないのに対し、汚染区では、9 月 3 日以降に大きく増加している。最終的な葉数の平均値は、Cont. 区は  $109 \pm 55$  枚、Pb-1 区は  $231 \pm 71$  枚、Pb-10 区は  $191 \pm 75$  枚となり、汚染区の葉数

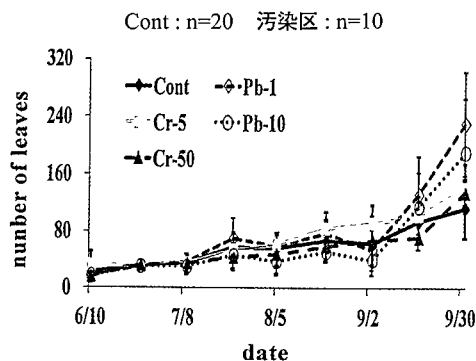


Fig.2 アカザの葉数の経時変化

がCont.区よりも1.8倍以上多く、汚染区内でもPb-10区の方の葉数が少なかった。

Fig.3に、アカザの茎長の経時変化を示した。六価クロム土壌における茎長は、Cr-50区のある期間を除いて、汚染区およびCont.区において、時間の経過に伴い増加する傾向であった。その中でも、Cont.区とCr-5区ではほとんど差がなく推移し、同様な生育傾向を示している。これに対し、Cr-50区は、明らかにCont.区、Cr-5区よりも一貫して低い値であり、8月から9月までの間に生育の低下が見られた以外は、増加傾向を示した。茎長の最終値は、Cr-5区 ( $45 \pm 12\text{cm}$ )  $\geq$  Cont.区 ( $44 \pm 8\text{cm}$ )  $>$  Cr-50区 ( $39 \pm 9\text{cm}$ ) となった。

また、鉛土壌における茎長では、Cont.区で葉数と同様に、9月3日以降の変化がほぼ認められず、生育が停滞したように見える。汚染区では、最終測定日まで徐々に成長しているのが確認された。茎長の最終値は、Pb-1区は  $58 \pm 16\text{cm}$ 、Pb-10区は  $53 \pm 14\text{cm}$ 、Cont.区は  $39 \pm 6\text{cm}$  区となり、汚染区の方が大きくなることが確認された。

以上のように、葉数と茎長の結果は、Cr-50区の茎長を除いて、金属汚染区の土壌における方がより生育していることがわかる。よって、アカザは、今回使用した、六価クロム濃度  $50\text{mg/kg}$ 、鉛濃度  $10\text{mg/kg}$  程度では、生育阻害を受けないばかりか、逆に生育を促進しているように見えた。

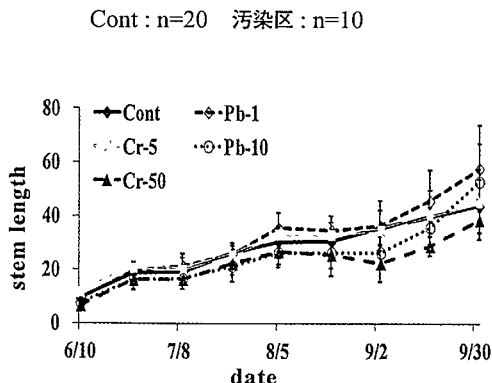


Fig.3 アカザの茎長の経時変化

## (2) 葉の色度・色調

色度： 植え付けの6月10日～10月15日におけるアカザの葉の色度の経時変化をFig.4に示した。6月10日の初期値 (Fig.4中のS) から、6月25日にかけて緑黄色方向 (左上) に非常に大きく変動し、その後、次第に初期値と同じ値に戻っている。この変動の要因として、植え付け時に播いた肥料による影響が、6月25日には出たのではないかと推察された。10月1日から10月15日にかけて、アカザの紅葉によるものと思われる赤方向 (右) への大きい動きが見られたが、明らかにCont.区とCr-5区に比べて、Cr-50区の変化が小さかった。また、Cr-50区は赤方向への動きは小さかったが、黄色方向 (上) への変動は、他と同程度であった。

一般に、植物の生育が末期 (紅葉時) の葉色は、緑葉の主体であるクロロフィルの生産が止まり、その結果、 $\beta$ -カロテンなどのカロテノイドの黄色が強く観察されるようになることが知られている。また、この時期には、

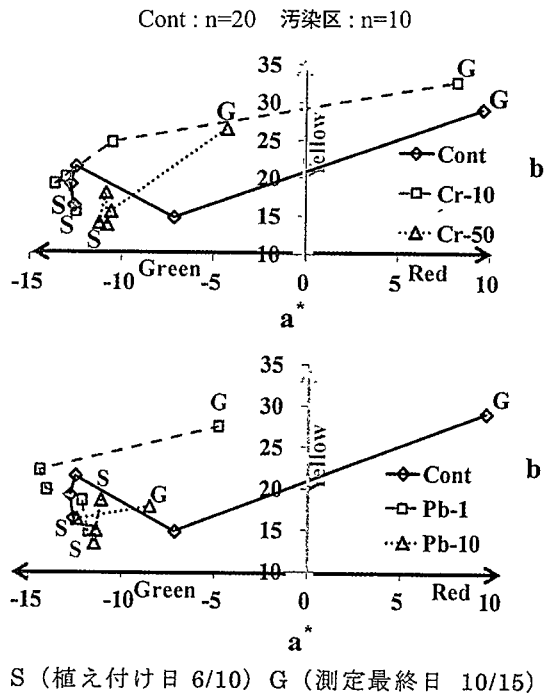


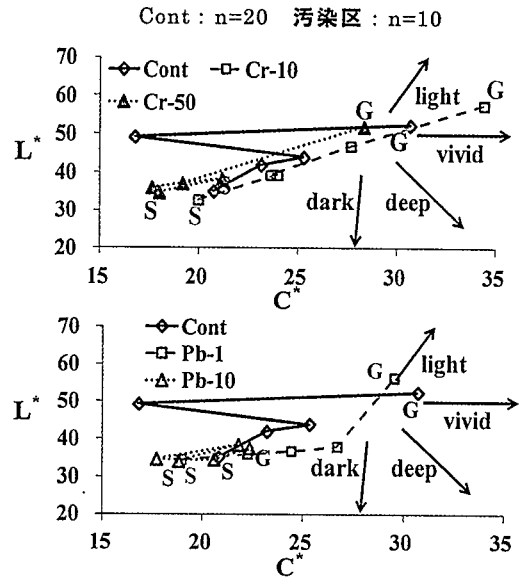
Fig.4. アカザの葉の色度の経時変化

葉と茎の間に細胞壁が出来て、糖成分などが茎に流れでなくなることで、糖から別の色素が生成される場合がある。アカザは配糖体色素であるベタシアニン（ピンク～赤紫）をもつことが、変動の大きさの要因かもしれない。

また、鉛土壌におけるアカザの色度も、初期値（6月10日）から25日にかけて黄緑色（左上）に向かってとても大きく変動し、次の測定では初期値と同じ程度まで戻っている。この変動は、クロムと同様で、直前に播いた肥料による影響がではないかと推察された。その後は、Cont. 区は赤色（右）方向へ、汚染区は緑色（左）方向へ動いているが、その差は非常に小さかった。クロム土壌の場合と同様に9月3日、9月22日までは、三者とも類似の変動をしているが、それ以降、特に、10月1日から10月15日にかけて赤方向（右）への大きい動きが見られた。その中でも、Cont. 区と比べて、Pb-1 区 > Pb-10 区の変動幅であった。しかし、クロム土壌と異なり、Cont. 区が、明らかに紅葉の色度変化を示しているのに対し、汚染区では変動幅が小さく、それまで至っていない。

色調： 植え付けの6月10日～10月～15月におけるアカザの葉の色調の経時変化をFig5に示した。Cont. 区と汚染区ともに、6月25日が最も薄く明るい方向（右上）に変化し、8月20日の測定では、鮮やかな方向（右）へ動いている。色度と同様に、Cont. 区と汚染区の動きはよく似たものとなった。9月～10月基本的に、どの試料も鮮やかな方向（右）へ変化している。特に、Cr-5 区は、時間経過に伴い、ほぼまっすぐに、鮮やかな方向に変動している。また、Cr-50 区、10月1日までの動きが小さいが、10月15日には鮮やかな方向に大きく変動している。さらに、Cont. 区は、一時、濃い方向（右下）へ動いたが、最後は鮮やかな方向へ変動している。

また、鉛土壌においても、6月10日の初期値から、6月25日の値の最も薄く明るい方向（右上）に激動し、徐々に8月20日の最終値に近い位置、または、やや鮮やかな方向（右）



S (植え付け日 6/10) G (測定最終日 10/15)

Fig5. アカザの葉の色調の経時変化

へ動いている。やはり、この変動の要因には、直前に播いた肥料による影響が関わっていると推察された。色度と同様に、Cont. 区と汚染区の変動には大きさは観察されなかった。9月～10月は、基本的に、どの試料も鮮やかな方向（右）へ変化している。特に、Pb-1 区は、時間経過に伴い、明るい（右上）方向に進み、10月1日から15日に非常に大きく、鮮やかな方向（右）に変動している。また、Cont. 区は、初期値より徐々に明るい（右上）または鮮やか（右）の方向へ動き、10月1日では一端右下に移動してから、最終的には、ほぼPb-1 区と類似した値で終わっている。これに対し、Pb-10 区は、初期値から、行ったり来たり値を取りながら、やや右上がりに終点し、他の区と異なり、変動が小さかった。

### (3) 各部位の乾燥重量

Fig. 6 に、重金属分析対象試料における各部位の乾燥重量を示した。

8月試料では、Cont. 区と汚染区の乾燥重量に明確な差はみられなかったが、汚染区では個体による差が大きく、Cr-50 区では、個体

間で約6倍の差が観察された。10月試料では、ややCr-5区で他よりも乾燥重量が多い傾向が見られた。10月の乾燥重量は、8月に比べて葉部で明らかに減少傾向を示した。これは、9月の葉数・茎長の最終測定日以降に落葉し、採取日の重量に影響したものと考えられる。また、葉部以外では、Cont.区とCr-5区の根が、Cr-50区では茎部が10月で乾燥重量がやや減少している。このことは、葉数・茎長の結果を合わせると、Cr-50区において、成長が阻害されているためと予測される。

一方、鉛土壌の乾燥重量は、8月試料では、各部位ともCont.区とPb-1区がPb-10区よりも多くなっている。これに対し、10月試料では、Pb-1区の乾燥重量が特に多く、他の区各部位と比較しても非常に大きな差が観察された。また、Pb-10区もCont.区に較べて、同程度であった茎部を除き、他の部位では2倍以上であった。Cont.区を除き、鉛汚染区においては、明らかに増加することが確認された。この結果は、茎長、葉数の結果と一致し、Cont.区は、9月以降生育が停滞したことが考えられる。

#### (4) 各部位の重金属濃度

Fig. 7に、各部位における単位kg当たりの重金属濃度を示した。

クロム濃度： 8月試料のCr-5区では、葉部0.0～0.9mg/kg、茎部0.7～1.0mg/kg、根部7.6～14.3 mg/kgの濃度範囲であるのに対し、Cr-50区では、葉部4.2～10.1mg/kg、茎部1.2～18.8 mg/kg、根部36.4～71.9mg/kgの濃度範囲であった。また、10月試料ではCr-5区で、葉部0.0～5.1mg/kg、茎部0.0～2.6mg/kg、根部0.0～3.0mg/kgの濃度範囲であるのに対し、Cr-50区では、葉部14.3～36.6mg/kg、茎部4.3～10.7 mg/kg、根部44.5～127.7mg/kgの濃度範囲と、8月と10月で明らかにCr-50区がCr-5区より、高い値を示した。さらに、8月から10月にかけて、Cr-5区ではその増加は一部でしか確認されなかったのに対し、Cr-50区では葉部と根部で濃度増加がみられ、8月から10月にかけての根部から葉部へ移行が示唆された。

鉛濃度： 8月試料のPb-1区では、葉部0.0 mg/kg以下、茎部0.5～3.6mg/kg、根部34.9～46.4mg/kg、Pb-10区では、葉部0.0mg/kg以下、茎部0.5～4.2mg/kg、根部18.5～64.6mg/kgの濃度範囲であり、根部からの吸

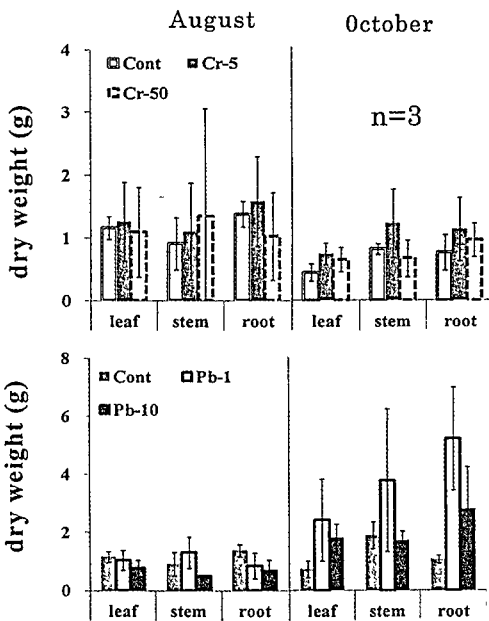


Fig.6 アカザの各部位の乾燥重量

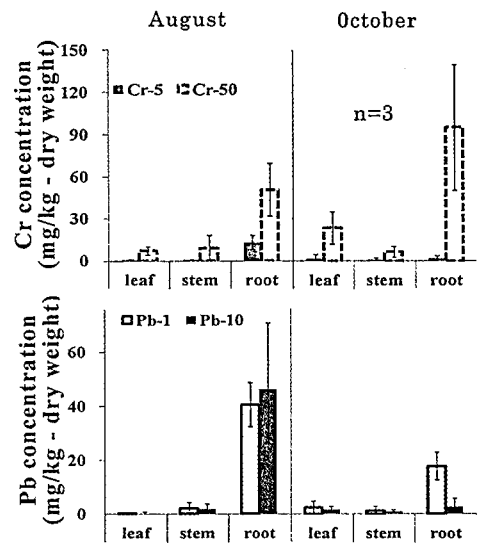


Fig.7 アカザの各部位の金属濃度

収が確認できたが、葉部からはほぼ測定されず茎部もごく少量であった。

10月試料ではPb-1区で、葉部0.2～4.8mg/kg、茎部0.0～3.1mg/kg、根部11.8～20.8mg/kg、Pb-10区では、葉部0.5～2.9mg/kg、茎部0.0～1.6mg/kg、根部で0.0～6.3mg/kgの各濃度範囲で得られた。また、葉部では8月試料より濃度が高く観察されたが、茎部と根部では少なくなっていた。さらに、どの部位もPb-1区のほうがPb-10区よりも濃度が高い結果となった。8月と10月の濃度比較では、10月に濃度が非常に減少しているのは、葉数・茎長や乾燥重量からもわかるように、汚染区でのアカザの生育が大きいため、鉛吸収が一定でも、濃度としては減少することになる。先にも述べたように、クロム土壌においてはそのような現象は認められなかったことから、鉛土壌の特徴と考えられる。

#### (5) 各部位の重金属蓄積量

Fig. 8に各部位における金属蓄積量を示した。

**クロム蓄積量：** 各部位ごとのクロム蓄積量は、クロム濃度の傾向とはほぼ同様であった。つまり、根部への蓄積が多く、Cr-50区では、それが顕著で、全体の6割以上を占めている。8月試料の各部位を加えた総クロム量は、Cr-5区で25.2～119.8 $\mu$ g、Cr-50区で89.0～186.9 $\mu$ gであり、10月試料では、Cr-5区で3.0～20.2 $\mu$ g、Cr-50区で48.6～198.6 $\mu$ gの範囲で得られた。アカザの葉数・茎長と乾燥重量からも、落葉等でクロム量は相当少なくなっていると予想されたが、濃度・蓄積量とも8月試料よりも10月試料が高い値を示していることから、10月の採取時期を調節することで、より多くのクロム蓄積が期待される。

**鉛蓄積量：** 8月試料の各部位を加えた総鉛量はPb-1区で13.0～31.2 $\mu$ g、Pb-10区で6.3～65.6 $\mu$ gであった。根部からは吸収・蓄積が確認できたが、葉部からはほぼ測定されず茎部もごく少量であった。10月試料の各部位を加えた総鉛量は、Pb-1区で76.2～219.5 $\mu$ g、

Pb-10区で20.5～29.8 $\mu$ gの範囲で得られた。蓄積の大半を根部が占めており葉部、茎部へは蓄積が殆ど見られない。Pb-1区のほうがPb-10区より蓄積量が多くなり、根部ではPb-10区よりも6倍以上多く測定された。8月から10月にかけて、Pb-1区のみ、各部位において蓄積量が増加している。Pb-1区では、10月への生育が急なため、吸収濃度は減少するが、蓄積量が大いことがわかった。しかし、Pb-10区は、10月にかけて葉数・茎長、乾燥重量ともに多くなっているが、蓄積量はやや減少している。これは、Pb-10区では、ある時期から吸収が抑えられた可能性が示唆される。

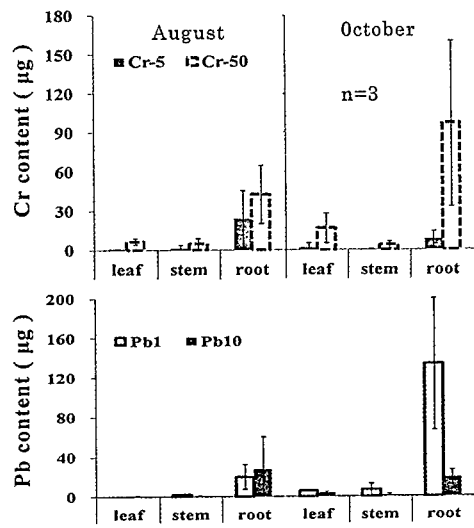


Fig.8 アカザの各部位の金属蓄積量

#### 4. まとめ

1. アカザの葉数・茎長の生育傾向はCont.区とCr-5区において類似し、Cr-50区では、やや生育の阻害が観察された。
2. 六価クロム土壌におけるアカザの色度では、9月から10月にかけて紅葉のものと思われる赤方向への大きな動きを含め、各区での変動が異なっていた。

3. クロムの吸収・蓄積量は、生育に伴う増加が確認され、六価クロム濃度が高い土壌では、生育と吸収における阻害を受ける可能性が高い。
  4. 鉛土壌におけるアカザの葉数・莖長および乾燥重量の測定から、汚染区で Cont. 区よりも生育が促進される傾向が観察された。その傾向は特に、Pb-1 区で明確であった。
  5. 鉛土壌におけるアカザの色度では、10 月以降、赤方向への大きい変化が Cont. 区では確認されたが汚染区ではその変化が小さく、この測定が、鉛濃度 1～10 mg/kg の土壌指標に適用できる可能性が考えられる。
  6. 鉛吸収・蓄積量から、Pb-10 区程度の鉛濃度で、根からの吸収が阻害される可能性が高いことがわかった。
  7. アカザにおける色差（色度・色調）の測定は、目測では観察できない生育阻害の有無が確認できる可能性がある。
- 5) 横山和憲・栗山紘太・本多志行・涌井史郎・土路生修三・横塚享・内藤敏・浅井俊光・飯島健太郎・森永茂生，ヨモギ (*Artemisia indica var.maximowiczii*) を用いた六価クロムおよび鉛の模擬汚染土壌における重金属の吸収・蓄積とそれに伴う生育反応への影響，桐蔭論叢，第 28 号，p243-248 (2013)

#### 【参考文献】

- 1) 平成 23 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の概要，環境省水・大気環境局
- 2) 土路生修三・横塚享・村上順也・菅野裕一・横山和憲・森永茂生，重金属含有土壌の植物体への吸収能と生育反応に関する実験，第 17 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会要旨集 (2011)
- 3) 横山和憲・菅野裕一・涌井史郎・土路生修三・内藤敏・横塚享・飯島健太郎・森永茂生，六価クロム汚染土壌における植物の重金属吸収能と生育の基礎研究，日本化学会第 92 春季年会要旨集 (2012)
- 4) 横山和憲・栗山紘太・菅野裕一・涌井史郎・土路生修三・内藤敏・横塚享・浅井俊光・飯島健太郎・森永茂生，六価クロム汚染土壌における数種のグランドカバープランツの吸収能と生育に関する基礎研究，日本芝草学会 2012 年度春季大会要旨集