

The Experimental Water Purification by Plant : Purification of the Polluted Water with Heavy Metals

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/29542

植物による水質浄化実験 —重金属汚染水の浄化を目指して—

西田佐織・田崎和江

Saori NISHIDA and Kazue TAZAKI: The Experimental Water Purification by Plant — Purification of the Polluted Water with Heavy Metals —

ABSTRACT : Water pollution with heavy metals is one of the most serious environmental problems . The aim of the studies are to examine the function of plants to absorb heavy metals. Two species of plants were used for the experiments with polluted water . One is *Athyrium yokoscense* of the fern species which is able to absorb heavy metals, the other is *Eichhornia crassipes* called as Water Hyacinth which is generally used for water purification of eutrophic lakes and ponds. The cross section of each plant's petiole and root was examined with optical microscope and scanning electron microscope equipped with energy dispersive X-ray analyzer. It was found that heavy metals of Zn and Pb were accumulated by these plants. The result suggests that it is possible to purify polluted water by using the function of plants absorption for heavy metals.

Key words : *Athyrium yokoscense*, *Eichhornia crassipes*, heavy metals absorption, Pb, water pollution, water purification, Zn.

はじめに

“水”はあらゆる生命の維持に必須なものであり、人間生活にも自然生態系にも充分でかつ安全な水が与えられなければならない。しかし、現在、水質汚濁は環境問題の主要課題の一つとして挙げられている(環境庁国立公害研究所 1990)。例えば、鉱山に起因する重金属による水質汚濁は人命を脅かすほどの事件となったものもある(御勢 1961)。富山県の神通川流域で発生したイタイタイ病は、神通川上流の神岡鉱山から河川へ排出されたカドミウムが原因で引き起こされたものである(木澤 1993; 畑 1995)。一度汚染された自然環境は、元に戻すのは容易ではなく、神岡鉱山周辺は今だに土壤に草木が根づかず荒地となっており、生態系にも多大な影響を及ぼしている(飯村・伊藤 1975)。婦中町を中心とする汚染地域では、田畑の客土工事や、再汚染防止のための住民による鉱山立入調査が現在も継続的に行われている。

植物の重金属吸収機能を利用して、汚染された土壤や水質の浄化の可能性を引き出す研究は、以前から始められている(野上ほか 1985, 1986; 茅野 1995)。ヘビノネゴザの例として、本浄(1990)は、重金属汚染土壤地域に自生するヘビノネゴザと重金属との関係や、吸収された重金属が植物のどの部位に蓄積するのかを報告している。しかし、実験的に負荷を与えるよう

な研究を行い、蓄積されていく経時変化をを直接観察した例は少ない。また、ホテイアオイについても、富栄養化の湖・池中の窒素やリンに対する高い吸収機能を利用した水質浄化実験は、かなり以前から始められており、徳永 (1981) をはじめ、石井ほか (1983, 1987, 1990)、川人ほか (1995)、島多 (1996) などの研究例がある。一方、実験的に負荷を与え重金属が蓄積されていく様子を経時的に直接観察した例は少ない。本研究ではシダ植物であるヘビノネゴザ (*Athyrium yokoscens*) と、水中浮遊植物であるホテイアオイ (*Eichhornia crassipes*) の2つの植物を用い、栽培実験及び観察を行った。そして、実験的に植物による重金属の選択的濃集及び細胞内への蓄積過程を観察し、植物を用いて土壌や水質の浄化の可能性について考察した。

試料及び実験観察方法

2-1. ヘビノネゴザとは

ヘビノネゴザはオシダ科で夏緑性の多年草である。低山地から高地までの林下・林縁や陽の当たる岩上などに広く生じる。金属に強い耐久性があり、鉱山地域に特徴的に豊産し、昔から重金属の鉱脈探索の手がかりに使われている。

2-2. ヘビノネゴザの試料及び実験観察方法

ヘビノネゴザは1996年4月29, 30日の岐阜県神岡鉱山立ち入り調査の際に円山及び鹿間谷において根元の土壌とともに採取したものを実験に使用した。試料は、I; 植物園で使用している腐葉土と廃さいを体積比1:2で混合した土壌、II; ブランクテストとして腐葉土のみの土壌の2つを設置し、それぞれに同じ株から分けたヘビノネゴザを鉢植えにし、野外で栽培した。栽培実験は金沢大学理学部附属植物園にて1996年5月1日から12月30日までの約8カ月間行った。

重金属の負荷には神岡鉱山の廃さいを用いた。廃さいは神岡鉱山の選鉱場から発生し、堆積場へポンプアップされる過程で、粒度の大きさにより分別される (発生源対策専門委員会発生源対策協力科学者グループ 1995)。その比較的粒度の粗い廃さいを本研究に使用した。廃さいについては蛍光X線分析 (XRF) を行い、含有する重金属元素を調べた。その結果、廃さい中には Zn, Mn, Fe, Pb 等の重金属元素を含有していることが確認された。ヘビノネゴザについては、定期的に地表付近の葉柄の断面を切片にし、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡 (SEM)、エネルギー分散X線分析 (EDX) で観察および分析を行った。実験終了後、葉の地上部分と根茎・根の地下部分に分別し、それぞれ XRF 分析を行い、含有元素を調べた。

2-3. ホテイアオイとは

ホテイアオイはミズアオイ科の多年草である。葉柄の中央部が膨れて多胞質になり、それが水に浮く役目をする。多くの水生植物の中でも特に旺盛な繁殖力を持ち、高い吸収機能を有する。

2-4. ホテイアオイの試料及び実験観察方法

ホテイアオイは1996年6月、1株に浮きが4つ付く程に成長しているものを購入し、2カ月間金沢大学理学部附属植物園の屋外の水槽で倍の株数になるまで栽培した。その後、8月14日に栽培実験を開始し、12月20日にまで観察を行った。試料は、I；5ℓの水道水に廃さいを400ℓ加えた試料、II；5ℓの水道水に鉱石を1.1kg加えた試料、III；ブランクテストとして5ℓの水道水のみを試料の3つを設置した。それぞれに浮きが6つ付く程の大きさに成長したホテイアオイを2株ずつ入れ、日光が良く当たり、雨風の当たらない屋内に設置した。また、ホテイアオイは低温では生育できないため、10月14日からは、暖房の効く室内へ設置場所を移動した。

重金属の負荷にはへビノネゴザに用いた同じ廃さいと、天然の鉱石の2種類を実験に用いた。この鉱石は、神岡鉱山の採掘現場で採取し、X線粉末回折分析(XRD)の結果、主な含有鉱物はFluoriteであり、XRF分析により、鉱石中にはZn, Mn, Fe, Pb等の重金属元素を含有していることが確認された。ホテイアオイについては、定期的に根の断面を切片にし、光学顕微鏡、SEM、EDXで観察および分析を行った。廃さいと鉱石から溶出した重金属を調べるために、実験終了後、それぞれの水槽の水をろ過し、蒸発乾固したものをXRF分析した。

両実験の観察には、光学顕微鏡はNikon製X2HPD型を用い、SEMは日本電子製低真空走査型電子顕微鏡JSM-5200LVを使用した。また、エネルギー分散分析には、SEMに取り付けられたフィリップス製EDAX PV9800STD型を用い、加速電圧は15-25kVで使用した。蛍光X線分析には理学電機製Rigaku system3270型蛍光X線分析装置を使用し、電圧50kV、電流20mAで測定した。X線粉末回折分析は理学電機製RINT1200型X線回折装置を使用し、CuK α 線を用いて、電圧40kV、電流30mAで測定を行った。

実 験 結 果

3-1. へビノネゴザの観察結果

腐葉土に廃さいを混合した試料(I)もブランク試料(II)も栽培実験中において、背丈、葉の色、葉柄の太さ等、外見的にはほとんど差は見られない。しかし、下記に述べるように、維管束周辺部分の付着物には大きな差が認められた。

3-1-1. 光学顕微鏡観察

実験開始直後の観察では、I、IIの試料とも維管束の周辺には光を透過しない物質は確認できない。実験開始から約2カ月後(7月12日)の観察時に、廃さいを与えた試料(I)には維管束周辺の柔組織部分に黒色不透明物質が認められた(Fig. 1-1, 矢印)。さらに、3カ月後、4カ月後と時間が経つにつれて黒色物質は維管束に沿って拡大していくことが確認された。約4カ月後(9月3日)の切片観察では、黒色物質が維管束周辺に沿って、約3分の1に広がっている。そして、約5カ月後(9月30日)の切片は、維管束の半分を覆うほどに黒色物質が拡大している(Fig. 1-2, 矢印)。また、この黒色物質は維管束周辺のみならず、他の細

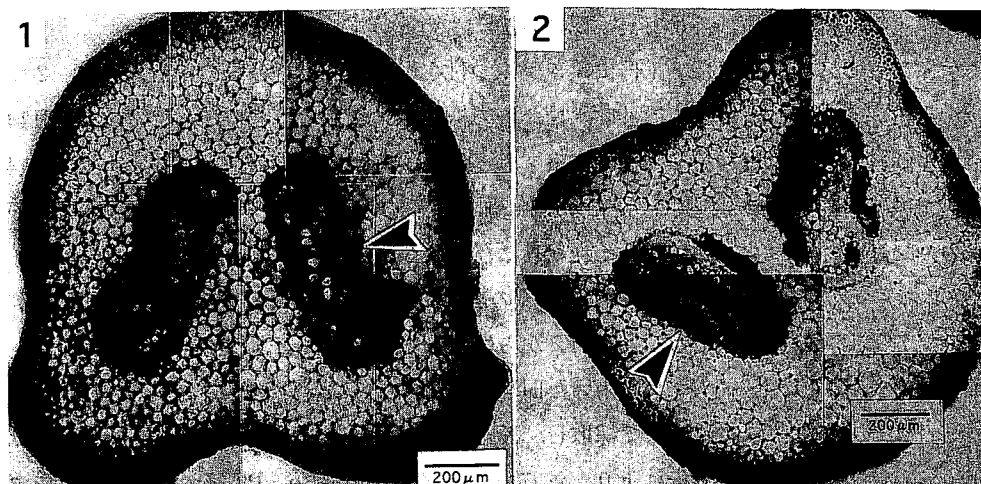


Fig. 1. Optical micrographs of cross section of *Athyrium yokoscense* petiole after a one-week experiment (Fig.1-1) and after a five-month experiment (Fig.1-2). Arrows indicate black matter.

胞へは進入していない。一方、ブランクテストのIIの試料は実験開始から終了まで約8ヶ月間、Iの試料で観察されたような黒色物質は認められず、EDX や XRF 分析でも顕著な重金属元素のピークは検出されなかった。

3-1-2. SEM 観察

実験開始約5ヶ月後(9月30日)の切片をSEMにより観察すると、細胞と細胞の間隙が黒色物質により埋められていることが分かる(Fig.2)。また、その黒色部分をEDXで点分析(矢印)すると、重金属元素のPb及びSが顕著に検出される。

3-1-3. XRF 分析

実験終了後(12月28日)、葉の地上部分と根茎・根の地下部分に分別したものをXRF分析したところ、重金属元素はPb, Zn, Fe, Cu等が検出され、地上部分よりも地下部分に比較的多量の重金属が含有されていることが明らかとなった。そのZnの割合は、葉:根・根茎 \approx 1:1.6であり、Feについては、葉:根・根茎 \approx 1:120である。すなわち、ZnとFeはともに根・根茎に多量に存在する。

3-2. ホテイアオイの観察結果

水槽に廃さいを加えた試料(I)、鉱石を加えた試料(II)、ブランク試料(III)の3つの試料とも栽培実験中において、背丈、葉の色、根の張り方など、外見的にはほとんど差は見られない。しかし、下記に述べるように、道管部分の付着物に大きな差が認められた。

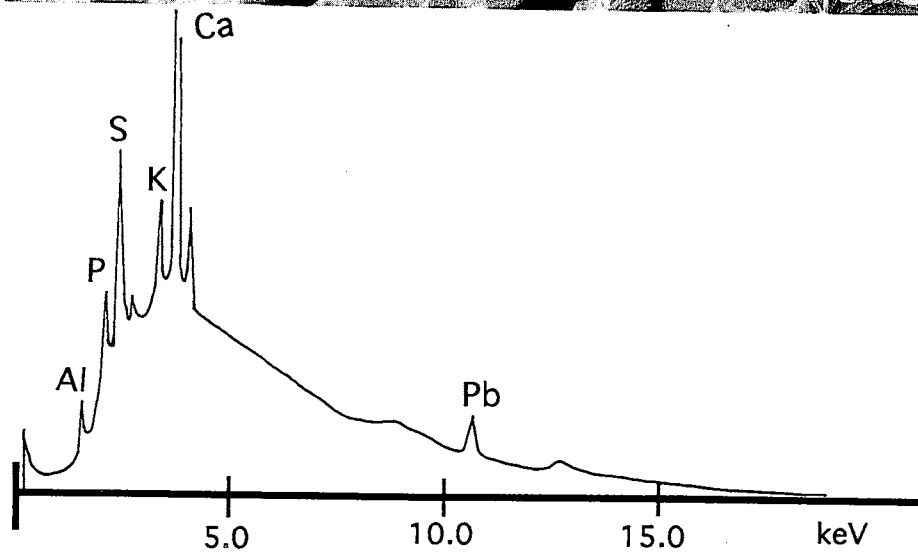
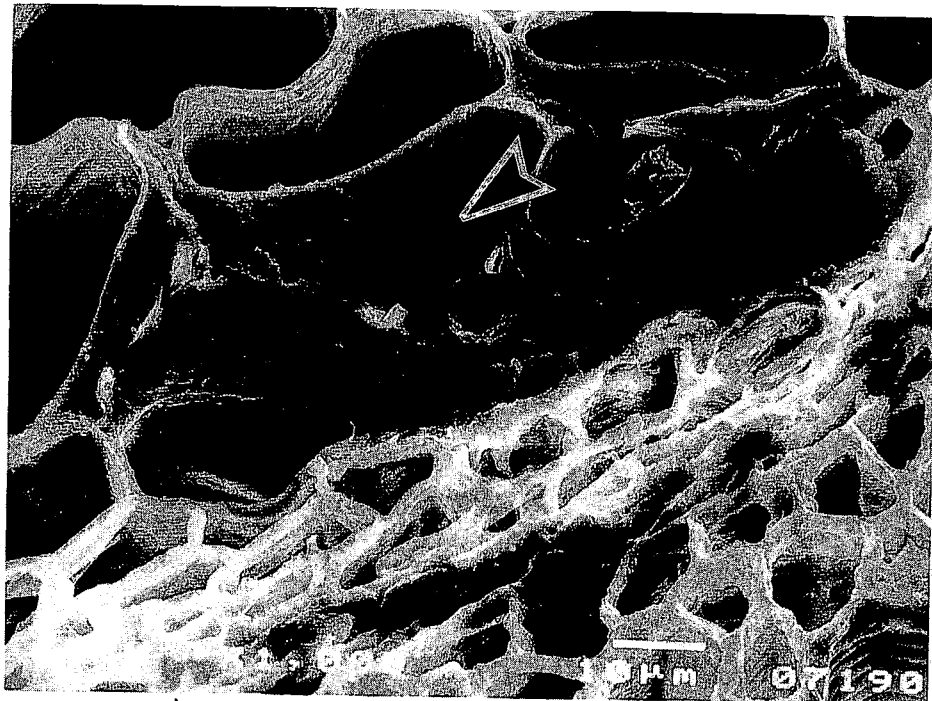


Fig. 2. Scanning electron micrograph of cross section of *Athyrium yokoscense* petiole and the EDX analysis showing presence of Pb and S after a five-month experiment. Arrow indicates adherent matter.

3-2-1. 光学顕微鏡観察

廃さいを加えた試料(I)の実験開始3日後(8月17日)の観察では、維管束部分は光を透過しない物質は存在せず(Fig. 3-1)、道管部分を拡大してみても管内には付着物は確認されない(Fig. 3-2)。実験開始約2週間後(8月27日)には、いくつかの道管の側面に黒色物質が付着していることが確認できる(Fig. 3-3, 矢印)。その後も約1週間ごとに切片の観察を続けたとこ

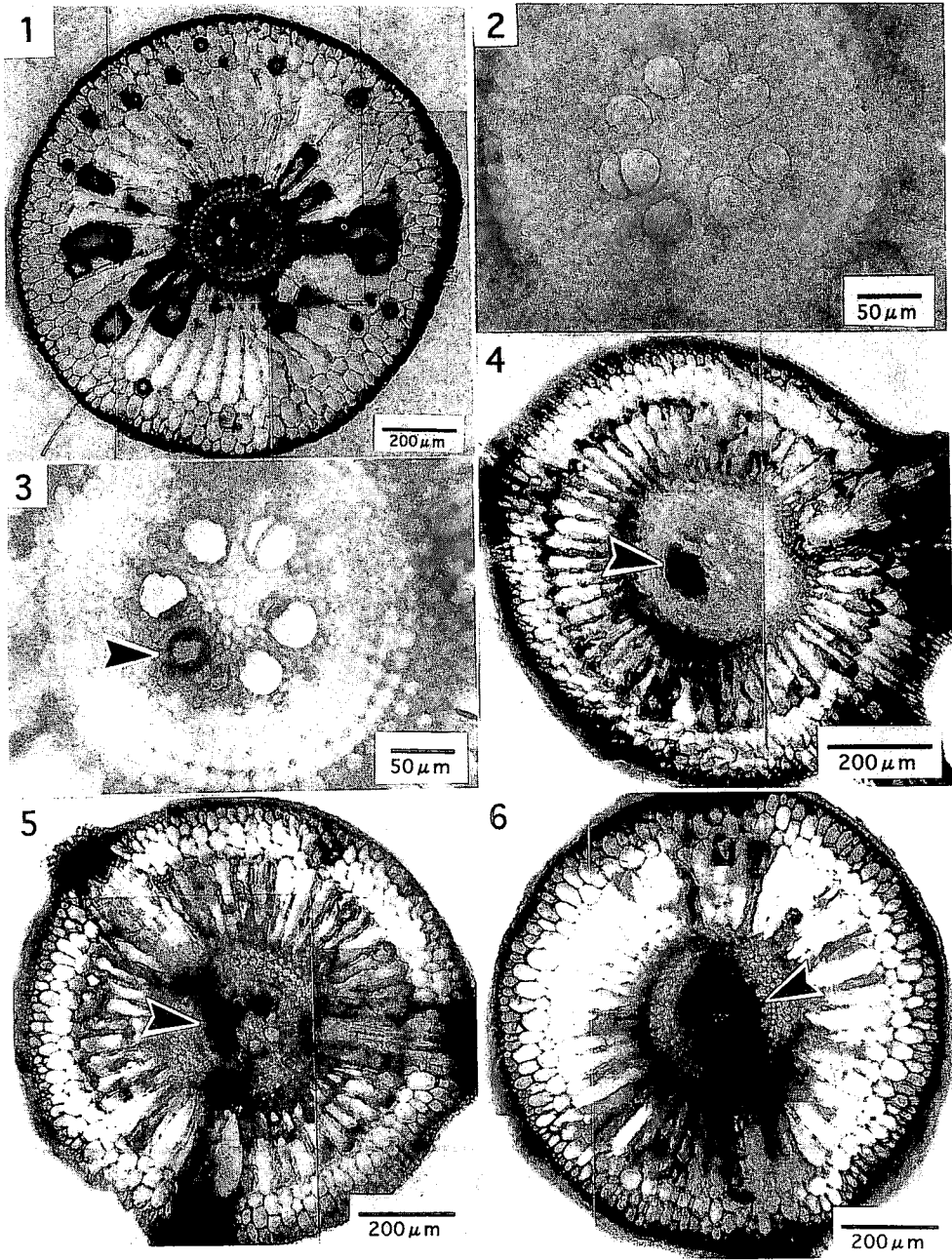


Fig. 3. Optical micrographs of cross section of *Eichhornia crassipes* root after a three-day experiment (Fig. 3-1, 2), after two-week experiment (Fig. 3-3), after fore-week experiment (Fig. 3-4), after five-week experiment (Fig. 3-5) and after six-week experiment (Fig. 3-6). Arrows indicate black matter inside of vessel.

ろ、実験開始約4週間後(9月13日)には、いくつかの道管が付着物で黒く埋められているのが確認され(Fig. 3-4, 矢印)、実験開始約5週間後(9月22日)にはそれぞれの道管の付着物が拡大し、それによって道管は黒く詰まり光を全く透過しなくなっている(Fig. 3-5, 矢印)。実験開始約6週間後(9月30日)の切片では、道管全部が全く光を透過せず、黒色物質が全体に詰まったように見える(Fig. 3-6, 矢印)。

鉍石を加えた試料(I)は、廃さいを加えた試料(II)より2週間ほど遅れて、実験開始約4週間後(9月13日)に、一部の道管内に黒色物質が確認され始める。黒色物質はIの試料より比較的ゆっくりと道管内に蓄積していく。実験開始約6週間後(9月30日)でも、黒色物質は道管全体を埋めるようにはならず、いくつかの道管に付着した程度である。

ブランク試料(I)は実験開始約6週間後(9月30日)の切片観察においても、道管内に黒色物質は認められず、実験開始直後と差が見られない。

3-2-2. SEM 観察

廃さいを加えた試料(I)の実験開始約2週間後(8月27日)の道管部分の切片のを観察すると、道管の側面に薄い付着物質が認められ(Fig. 4)、その付着物をEDXで点分析(矢印)したところ、顕著にZn及びSが検出された。実験開始後約6週間(9月30日)の切片では、付着物は以前より厚くなっており、道管を半分以上覆っており、管がふさがれたように見える(Fig. 5)。さらに、黒色物質が厚く付着した部分をEDXで点分析(矢印)したところ、薄い付着部分よりも顕著なZn, Pb, Sが検出される。

鉍石を加えた試料(I)の実験開始約6週間後(9月30日)の切片は、Iの試料の実験開始約2週間後(8月20日)に観察された様に道管の側面に薄く付着している物質が認められ、その付着物のEDXによる点分析でも、の試料と同様にZn, Sが検出された。

ブランク試料(I)は、実験開始約6週間後(9月30日)の切片においても道管内にはほとんど付着物は確認できない。また、道管側面のEDXによる点分析でも重金属は検出されない。

3-2-3. XRF 分析

実験終了後、それぞれの水槽の水をろ過し、蒸発乾固した後、XRFで含有元素を調べた。負荷を加えた試料中には、重金属元素Zn, Fe, Pbが検出されるが、ブランク試料においては重金属元素は検出されない。

考 察

植物の生長に必須な無機元素は多い順に並べると、H, C, O, N, K, Ca, Mg, P, S, Cl, B, Fe, Mn, Zn, Cu, Moの16種であるが、Cl以降の必要量は極微量である。植物が生長する過程で、水に溶出している有毒な重金属元素、特に、Cd, Pb, Cu, Hg, Zn, Ni等が道管を通して吸い上げられる(本浄 1990)。しかし、植物の種類によって異なる重金属の無毒化機

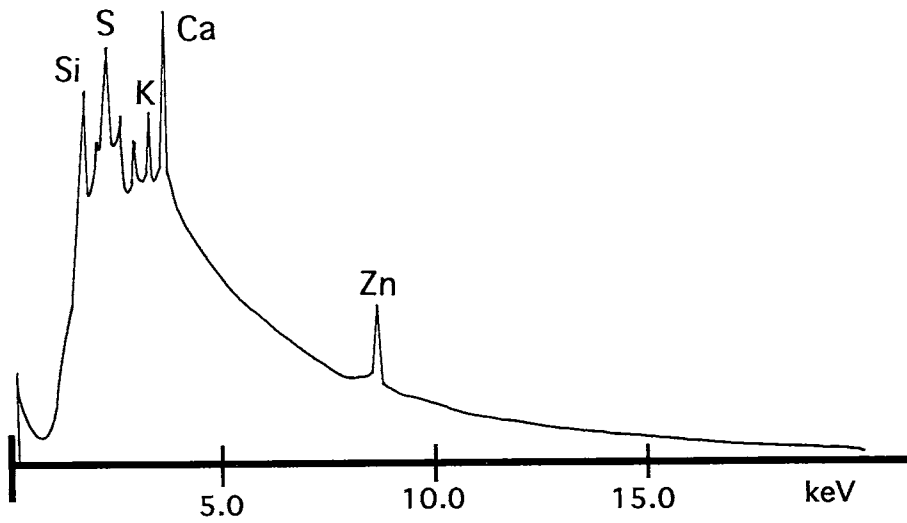
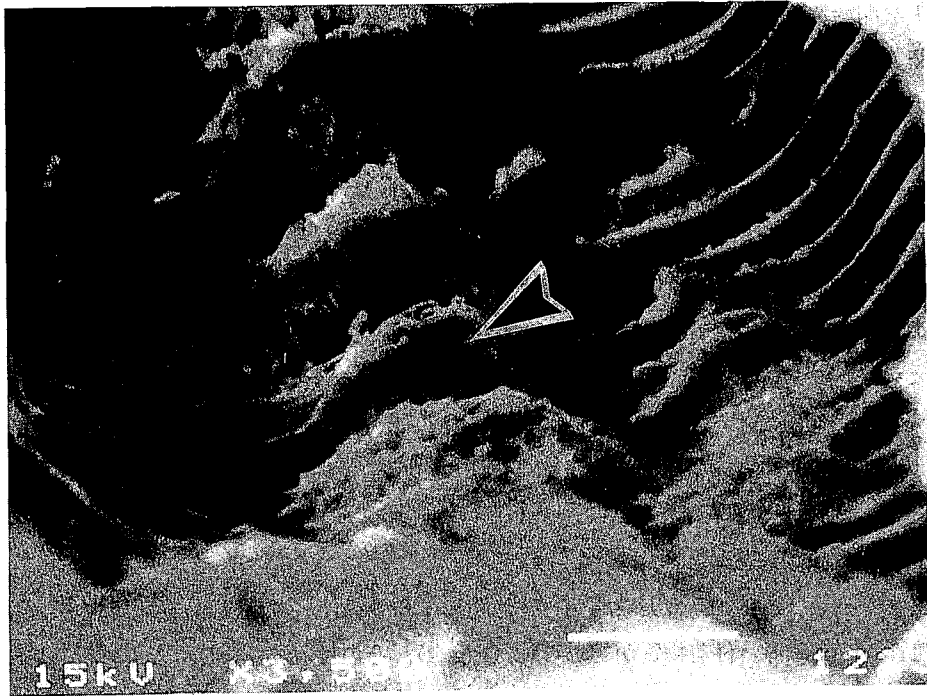


Fig. 4. Scanning electron micrograph of cross section of the vessel of *Eichhornia crassipes* root and the EDX analysis showing presence of S and Zn after two-week experiment . Arrow indicates adherent matter inside of vessel.

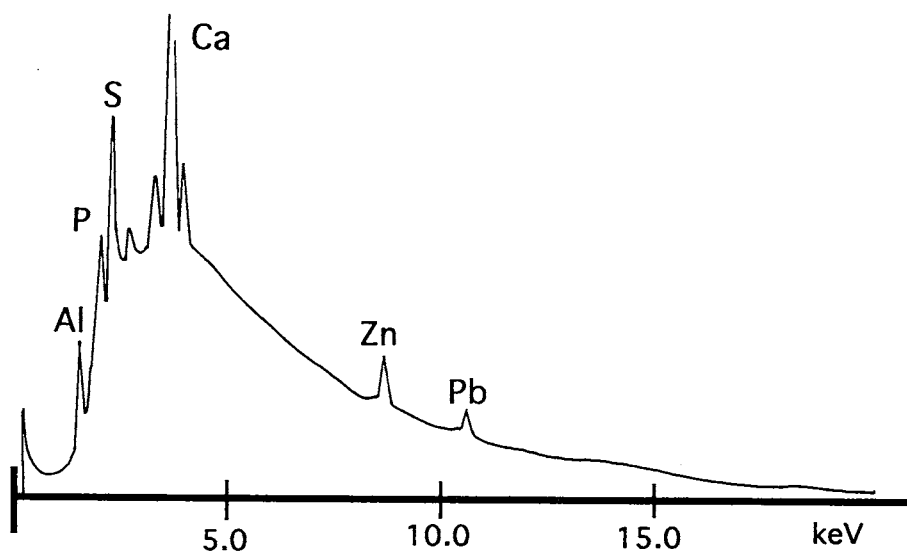
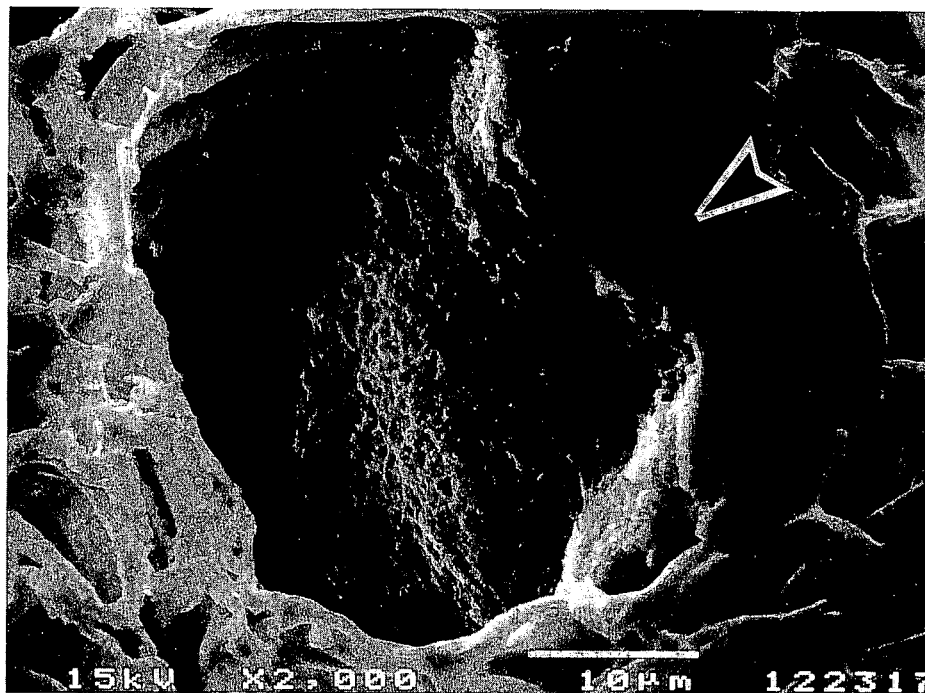


Fig. 5. Scanning electron micrograph of cross section of the vessel of *Eichhornia crassipes* root and the EDX analysis showing presence of S, Zn and Pb after six-week experiment. Arrow indicates adherent matter inside of vessel.

能があり(那須ほか 1986), その機能が発達していると, 重金属が過度に存在する環境下でも生長が可能である。例えば, 本研究で用いたヘビノネゴザをはじめ, ススキ, ササ, イタドリ等は特定の金属に強い耐性があり, 鉱山地域にも分布する(神岡鉱業株式会社 1996)。酒井ほか(1991)によると, ヘビノネゴザの葉柄に見られる鉛は道管より師管部の細胞壁で確認される。そして, 根から入り込んだ鉛イオンが道管を通過して上昇するが, 光合成後, 師管から各器官の細胞へは行きわたらず, 師管部の細胞壁で阻止されたり, もしくは, 鉛イオンが道管から師管へにじみ出す転移細胞が存在し, その細胞壁に鉛が蓄積されると推定されている。

一方, 本研究ではヘビノネゴザを用いた実験の切片観察の結果から, 葉柄の維管束周辺部の黒色物質は, 細胞と細胞の間隙に蓄積していることが明らかになった。これは, 道管を通過して吸い上げられた水中の Zn, Pb 等の重金属イオンが, 維管束内を通りぬけ, 維管束鞘細胞を出て柔組織へ達したところでイオンが不溶化し, 蓄積され, その後, 化合物として沈着したと考えられる。すなわち, 重金属イオンが他の細胞へ拡散しないように維管束のすぐわきで無毒化作用が起きていることを示唆している。また, 本浄(1986)の報告によれば, 根茎と根の鉛集積量が増加すると, 硫黄含有量も増加する傾向にあり, 植物組織中において, $PbSO_4$ として存在することが示唆されている。本研究結果からも, 維管束周辺部の黒色物質の EDX による点分析より, Pb と S は伴って検出された。実験終了後の XRF 分析からは, 地上部分より地下部分に多量の重金属元素が濃集していることが示されたが, 本浄ほか(1986)は, 地上部分は冬になると枯れるが地下部分は一年中活動しているためと説明している。さらに, 本研究結果は, 水に含まれている重金属が地上部分に吸い上げられる前に, 地下部分の根茎や根の細胞に重金属が少しずつ沈着していくこと, また, 地上部分の成長を妨げないため, 何らかの防御機能が働いているためなどが考えられる。

ホテイアオイを用いた実験の切片観察から, 道管内の側面に黒色物質が付着しており, この付着物は, 道管全てに均一に黒色物質を付着していくのではなく, 1つ1つの道管には関係なく, 不規則に付着していくことが確認された。最終的にはこの付着物は細胞の外に濃集していくと思われる。また, 黒色物質が付着した道管周辺を見ると, 付着物は細胞内へ入り込むようには拡大せず, 細胞の間隙をぬうように広がっていることが確認できる。これもヘビノネゴザ同様, 道管から細胞内へ有毒物質を進入させない植物の防御機能の一つでありと思われる。そして, 道管内に付着した黒色物質中の Zn や Pb が顕著になるにつれ S も検出されることから, $ZnSO_4$ または $PbSO_4$ の化合物として蓄積されると考えられる。この実験観察により, ホテイアオイはブランク試料と比較しても重金属による成長疎外の影響は少なく, 重金属にも強い耐性があることが示された。つまり, 富栄養化改善の目的だけでなく, 重金属の吸収浄化への利用の可能性が示唆された。

また, 廃さいを加えた試料(I)と, 鉱石を加えた試料(II)の黒色物質の付着経過を比較すると, Iの試料の方がIIの試料よりも付着し始めるのが速く, 付着物が道管を埋める速さも速い。この場合, 重金属イオンがIIの試料よりIの試料の水槽中に多量に溶出するため差が生じたと

思われる。このことから人工物質である廃さいは天然鉱物より容易に重金属イオンを水中に溶脱しやすいことが示唆される。

本研究によりヘビノネゴザとホテイアオイは共に水に溶出した重金属イオンを植物体内に吸収し、化合物として蓄積することが示された。蓄積する重金属の種類（例えば Pb や Zn 等）や植物の部位（例えば細胞内、あるいは細胞間、道管内）は多様であり、この植物の無毒化機能を、鉱山廃水や土壌中の重金属の除去の手段として利用できる可能性が高い。しかし、実用化するにあたっては、植物の繁殖場所、時期、堆積環境等を考慮に入れ、重金属が蓄積した植物を処分する方法をも、検討する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、金沢大学理学部附属植物園の木下栄一郎博士、松崎一典氏、また富山県婦中町清流会館の高木良信氏をはじめとする皆様、愛媛大学理学部の田崎耕市教授、金沢大学理学部和田敬四郎教授、そして田崎和江研究室の方々には格段のご配慮をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

引用文献

- 御勢久右衛門, 1961, 岐阜県神岡, 石川県尾小屋, 宮城県細倉鉱山の廃水の河川生物に及ぼす影響. 日本生態学会誌, 11(3): 111-117
- 発生源対策専門委員会発生源対策協力科学者グループ, 1995, 神岡鉱山立入調査の手びき, 神通川流域カドミウム被害団体連絡協議会, 1995(8): 1-58.
- 畑 明郎, 1995, イタイタイ病裁判後の神岡鉱山における公害防止対策一特に亜鉛電解工場の地下水汚染対策について一, 環境衛生工学研究, 9(4): 12-19.
- 本浄高治, 1990, 指標植物中の重金属のキャラクタリゼーション, ふんせき, 9(4): 79-81.
- ・中西 孝, 1986, 金沢状の鉛瓦と蛇の寝御座—その秘めたる謎をめぐって—, 化学, 41(3): 19-22.
- 飯村康二・伊藤秀文, 1975, 土壌—植物系におけるカドミウムの行動について, 農業土木学会誌, 43(10): 671-673.
- 石井 猛・上岡雅幸, 1987, ホテイアオイの水質浄化と有効利用への研究, 水処理技術, 28(3): 9-24.
- ・山下栄次・猶原 順, 1990, ホテイアオイによる水質浄化についての研究, 大学廃棄物の処理, 7: 84-89.
- ・横田二郎・池田浩幸・鈴木伸治・難波敬二・山先計則・小野聡美・竹内千鶴, 1983, ホテイアオイの水質浄化能とその有効利用, 環境科学総合研究所年報, 3: 139-149.
- 神岡鉱業株式会社, 1996, 神岡鉱業の鉱害防止対策, 1996(7): 1-135, 環境庁国立公害研究所, 1990, 水界生態系に及ぼす有害汚染物質の影響評価に関する研究, 国立公害研究所特別研究報告, SR(4): 1-63.
- 川人尚美・茅野充男・中久喜康秀, 1995, 水質浄化に用いる水生植物の形質転換法の研究(その1)—細胞融合法による耐寒性形質の導入—, 竹中技術研究報告, 51(11): 51-63.
- 茅野充男, 1995, 生物による重金属の吸収と除去機能, 研究ジャーナル, 18(3): 11-17.
- 木澤 進, 1993, カドミウム汚染とイタイタイ病—被害地域住民のたたかい—, 日本の科学者, 28(7): 32-38.
- 本橋敬之助・笠原 豊, 1991, ホテイアオイの植栽と水質—手賀沼を例にして—, 水処理技術, 32(5): 39-44.
- 那須 裕・釘本 完, 1986, アオウキクサによる重金属吸収—環境科学へのウキクサ応用の一例—, 遺伝, 40(8): 41-47.
- 野上祐作・平田まき子・堀 和子・石井 猛, 1986, ホテイアオイの生育に伴う栽培液の形態別窒素の挙動, 岡山理科大学紀要, 21(A): 17-23.

- ・堀 和子・平田まき子・石井 猛, 1985, ホテイアオイの窒素除去能に対するカドミウムの影響, 岡山理科大学紀要, 20(A): 63-76.
- 酒井雄一郎・福岡辰彦・本淨高治, 1991, 対重金属性シダ植物“ヘビノネゴザ”における鉛の組織内分布と形態, 日本化学会誌, 1991(5): 416-421.
- 島多義彦, 1996, 腐植土壌による調整池等の自浄作用回復と水質浄化, 農業土木学会誌, 64(4): 325-331.