

P-1. 自然由来の砒素を含む土壌のモエジマシダによる ファイトレメディエーションの温室実験

Greenhouse experiments on phytoremediation by *Pteris vittata* L. of rocks
containing natural arsenic

○渡邊 彩¹・榊原正幸²・佐野 栄³・井上雅裕⁴・堀 利栄²

Aya WATANABE, Masayuki SAKAKIBARA, Sakae SANNO, Masahiro INOUE, Rie S. HORI

¹愛媛大学大学院理工学研究科 〒790-8577 松山市文京町 2-5

Graduate school of Science and engineering, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

²愛媛大学理学部地球科学科 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5

Department of Earth Science, Faculty of Science, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

³愛媛大学教育学部地学 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3

Faculty of Education, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

⁴愛媛大学理学部生物学科 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5

Department of Biology, Faculty of Science, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

はじめに

最近、土木工事の際に発生する掘削土砂から環境基準を超える砒素が溶出する事例が増えている¹⁾。これらは自然由来であり、廃棄物として処分する場合、莫大な土地とコストを必要とする。また、埋設処分を行った後も管理しなければならない事例も少なくない。

最近、自然由来の重金属に汚染された土壌を浄化する方法としてファイトレメディエーションが注目されている²⁾。ファイトレメディエーションとは、植物の持つ特定の機能を利用した環境浄化技術であり、低コスト・エネルギー消費 0・環境調和型という特徴を有している^{3) 4)}。

愛媛大学環境浄化研究グループは、土木工事によって発生した土砂から自然由来の砒素を除去するため、砒素の超集積植物であるモエジマシダ (*Pteris vittata* L.)⁵⁾ (図 1) を用いたファイトレメディエーション技術の利用を提案している。本研究は、既に報告している事例も併せて、その基礎的実験としてモエジマシダを温室栽培し、その総砒素吸収量を測定した結果を報告する。実験対象とした土砂は実際の事例において最も一般的な岩石である「変質安山岩」および「泥岩」である。これらの実験結果に基づいて、自然由来の砒素を含有する掘削土砂のファイトレメディエーションの適用の可能性および課題について考察した。



図1 モエジマシダ

実験方法

1. 変質安山岩を対象としたモエジマシダの温室実験

土壌として使用した変質安山岩は、愛媛県砥部町万年で採取した。変質安山岩をジョークラッシャーで1 cm~3.5 mmに粉碎した。実験では、変質安山岩の粉末およびそれに硫酸鉄鉱の粉末を混合したものを土壌として使用した。地上部が15~20 cmまで育ったモエジマシダをそれらの土壌に1~2株ずつ移植し、実験開始から117日目に地上部全てを刈り取り、葉中の総砒素濃度を分析した。

実験期間中、肥料として1/1,000ハイポネックスを週に1~2回程度、適宜与えた。実験は愛媛大学理学部の温室内で行った。その際、窓は適宜開放し、温度・湿度管理は行わなかった⁶⁾。

2. 泥岩を対象としたモエジマシダの温室実験

実験に使用する土壌は、北海道夕張市シューパロ川周辺の泥岩を使用した。泥岩は、ジョークラッシャーで細かく(1 cm~3.5 mm)粉碎した。体高15cm程度のモエジマシダをこの粉碎した泥岩を入れた自作のポットに植えた。このポットはアクリル板で作成したものを使用した。ポットの高さは50 cm、直径は16.5 cmである。モエジマシダには水を1日に1~2回与え、肥料として1/1,000ハイポネックスを週に2回程度与えた。ポットの下には受け皿を置き、受け皿にたまった水は、再度ポットに戻した。実験は、愛媛大学理学部総合研究棟の屋上にある温室で行った。温室の窓は適宜開放し、温度・湿度管理は行わなかった。実験開始から128日目にモエジマシダの地上部をすべて刈り取りとった。その後、モエジマシダの葉の成長の程度によって葉を3つのグループに区分し、砒素濃度を分析した²⁾。

また、溶出試験の結果から、泥岩に草木灰を加えると砒素の溶出量が増加することが明

らかになった。そこで、泥岩を粉砕したものおよびそれに草木灰を混合したものを土壌として実験を行った。ポットは通常のものを使用した（高さ 20cm 程度）。地上部が 6~10 cm のモエジマシダをそれぞれの土壌に 1 株ずつ植え、実験開始から 60 日目に地上部をすべて刈り取った。

3. モエジマシダおよび土壌中の砒素濃度の分析方法

モエジマシダの葉の総砒素濃度は、愛媛大学沿岸環境センターに設置している SHIMADZU 製 AA-680 を使用し、水素化物発生原子吸光法 (HG-AAS)、(株)日立サイエンスシステムズ的那珂カスタマーセンターのサイエンスラボラトリにおいて、偏光ゼーマン原子吸光光度計⁶⁾、愛媛大学総合研究支援センターに設置している誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS; ELAN6000) および京大原子炉実験所における放射化分析によって行った²⁾。

岩石・土壌の化学分析は、愛媛大学理学部に設置している蛍光 X 線分析装置 (Phillips PW2400) を用いて行った^{2) 6)}。

実験結果

1. 土壌中の砒素濃度

実験前の土壌の砒素濃度は、硫砒鉄鉱を混合していない変質安山岩土壌の場合、16 および 19 mg/kg-DW、硫砒鉄鉱を混合した変質安山岩土壌の場合、120 および 167 mg/kg-DW であった⁶⁾。50cm のポットの泥岩土壌の砒素濃度は 12.3 mg/kg-DW²⁾、草木灰を混合した泥岩土壌および混合していない泥岩土壌のそれは、5.6 および 7 mg/kg-DW であった。実験終了後の土壌の砒素濃度は、すべての土壌で減少した^{2) 6)}。

2. モエジマシダの生育状況

硫砒鉄鉱を混合していない土壌および混合した土壌のモエジマシダは 6 月~10 月、50cm ポットで泥岩土壌に植えたモエジマシダは 5 月~9 月の約 4 ヶ月間栽培した。これらの土壌に植えたモエジマシダの地上部は健康的で、実験期間中に地上部が 20~30cm 程度成長した。草木灰を混合した泥岩土壌および混合していない泥岩土壌のモエジマシダは 4 月~6 月の約 2 ヶ月間栽培した。これらの土壌に植えたモエジマシダの成長速度は著しく遅く、2 ヶ月間でわずか 5~6cm 程度であった。

3. モエジマシダの葉の総砒素濃度

モエジマシダは土壌の砒素濃度に関係なく、砒素を効率的に吸収・蓄積した。実験終了後のモエジマシダの葉の砒素濃度は、硫砒鉄鉱を混合していない変質安山岩土壌の場合、34 および 46 mg/kg-DW、硫砒鉄鉱を混合した変質安山岩土壌の場合、2,208 および 1,278 mg/kg-DW であった⁶⁾。

50 cm のポットで泥岩土壌中に栽培したモエジマシダの葉の砒素濃度は、6.8~3,000 mg/kg-DW であった²⁾。草木灰を混合した泥岩土壌および混ぜていない泥岩土壌の場

合，それぞれ 2.0～77.1 mg/kg-DW，10.6～860 mg/kg-DWであった。

考察

今回の温室実験で，モエジマシダは，変質安山岩や泥岩などの岩石を粉砕して作成した土壌においても十分生育できることが明らかになった。これは，気候条件さえ問題なければ，土木工事などによって発生した掘削土砂で作成した土壌においても，モエジマシダの栽培が可能であることを示唆している。

モエジマシダの栽培に関して，気候条件(気温および積雪)は極めて重要な条件である。モエジマシダは多年草であるが，亜熱帯・熱帯地域に生育している植物なので，冬期間に積雪する地域では越冬できないと言われている。また，北海道のような寒冷地における栽培も不可能であると考えられてきた。今回の温室栽培実験で，モエジマシダの生育が順調な期間は，実験地の松山の場合，5月～11月の期間であることが明らかになった。一方，12月～4月の期間中は，モエジマシダの成長はほぼ停止していた。特に，松山の9月後半～11月の最高・最低気温は北海道南部の夏のそれと類似している。以上のことから，年間の気温変化を比較すると，西南日本南部はもとより，夏の期間限定であれば，北海道南部においてもモエジマシダによるファイトレメディエーションが可能であると予想される。

泥岩土壌の場合，高さ 50 cm のポットで栽培したモエジマシダと比較すると，高さ 20 cm ポットにおけるモエジマシダの成長速度は遅く，生育状態は悪かった。これは，土壌の通気性が悪いため，根の成長が困難だったためと考えられる。泥岩は粘土鉱物を多く含んでいるため，水を与えると泥岩中の粘土鉱物が流れてポットの下部にたまることが予想される。ポットの場合，粘土鉱物が沈積する範囲と根茎の範囲が重なったため，土壌の通気性が悪くなり，根が成長しにくかったと考えられる。泥岩土壌の場合，土壌の深さは，モエジマシダの生育に影響を与えられられる。泥岩のような粘土鉱物を多く含む土壌でファイトレメディエーションを行う場合，土壌改良材を加えて根圏周辺の通気性を高めることが必要であると考えられる。

今回，温室実験で栽培したモエジマシダは，土壌の種類および濃度に関係なく，砒素を吸収・蓄積していた。変質安山岩起源の土壌では，硫砒鉄鉱の粉末を混合した場合でも，モエジマシダは砒素を吸収・蓄積している(図2)。モエジマシダは，イオン化した砒素しか吸収することができない。しかし，硫砒鉄鉱中の砒素のように安定に存在しているものでも，バクテリアなどの働きにより硫砒鉄鉱の分解・イオン化が進み，モエジマシダが砒素を吸収したと考えられる⁶⁾。泥岩土壌で栽培したモエジマシダの葉の砒素濃度は，大きく分けると，0～500 mg/kg-DWと 800～3,000 mg/kg-DWの2つのグループにわかれた。条件が揃えば，高濃度の砒素の蓄積が可能である。一方，泥岩に草木灰を加えた場合，砒素の溶出量が増加するため，モエジマシダによる多量の砒素吸収が期待されたが，葉中の砒素濃度の著しい変化は認められなかった(図3)。

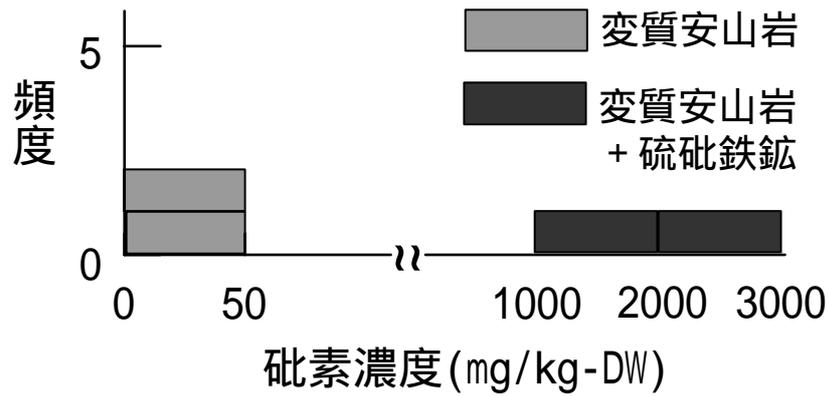


図2. 変質安山岩土壌で栽培したモエジマシダの砒素濃度のヒストグラム

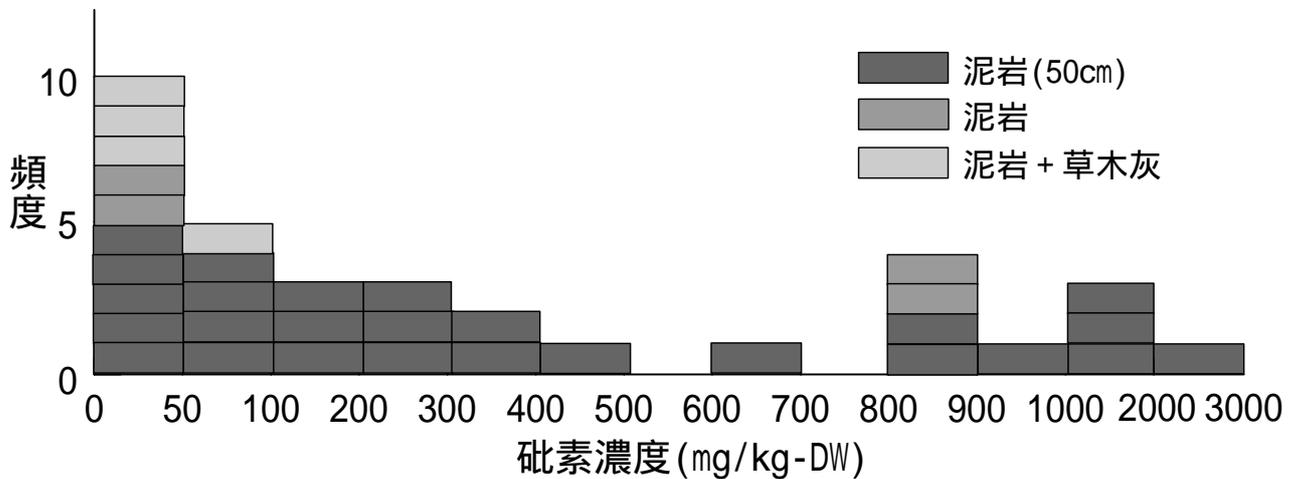


図3. 泥岩土壌で栽培したモエジマシダの葉の砒素濃度のヒストグラム

結論

モエジマシダは、自然由来の砒素を含む変質安山岩の土壌および泥岩の土壌において十分生育できることが明らかになった。また、それらから砒素を十分に吸収・蓄積する能力があることも確認できた。したがって、モエジマシダによる自然由来の砒素を含む掘削土砂のファイトレメディエーションは現実的に適用可能であると言える。しかしながら、浄化を行う土砂、たとえば泥岩、によっては土壌の通気性を良くするなどの土壌改良を行う必要がある。

文献

- 1) 鈴木哲也・竹花大介・榊原正幸・板谷利久, 2004, 重金属を含有する掘削土砂の処理判定と対策. 地盤工学会誌, 52, 13-15.
- 2) 渡邊 彩・榊原正幸・佐野 栄・近藤敏仁・井上雅裕・堀 利栄・鈴木哲也・竹花

- 大介, 2005, 砒素を溶出する泥岩のモエジマシダによるファイトレメディエーションに関するポット実験. 愛媛大学理学部紀要, **11**, 13-18.
- 3) 吉原利一・後藤文之・増田太郎, 2000, 植物による環境修復(1) - 現状と遺伝子工学の適用に関する調査 - . 電力中央研究所報告 調査報告: U00022, 1-36 .
- 4) 榊原正幸・高木 梢・井上雅裕・久保田領志・堀 利栄・佐野 栄, 2003, 環境岩石学によるファイトレメディエーション技術の実用化への展開 - 砒素に富む安山岩地域の開発を例として - . 第 13 回環境地質シンポジウム論文集, 205-210.
- 5) Ma, L. Q., Komer, K. M.M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y. and Kenelley, E.D., 2001, A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, **409**, 579.
- 6) 榊原正幸・高木 梢・井上雅裕・久保田領志・堀 利栄・佐野 栄, 2004, 硫砒鉄鉱を含む変質安山岩のモエジマシダによるファイトレメディエーションに関する基礎的実験. 第 14 回環境地質シンポジウム論文集, 11-20.