

マツバイを用いたファイトレメディエーションにおける Si 肥料の有効性

久保田有紀¹、榊原正幸¹、佐野 栄²、世良耕一郎³

¹ 愛媛大学理工学研究科
〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5

² 愛媛大学教育学部
〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3

³ 岩手医科大学サイクロトンセンター
〒020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢留が森 348-58

1 はじめに

ヒ素は飲料水として使用されている地下水や河川水中に含まれ、多くの国で深刻な環境問題となっている（例えば、アルゼンチン、ボリビア、チリ、中国、台湾、タイ、モンゴル、インドおよびバングラデシュなど）^{1,2)}。ヒ素は人体に摂取されると、様々な疾病を引き起こす。急性中毒は無機ヒ素化合物（アルシン、亜ヒ酸など）の摂取によって発症し、嘔吐、下痢、心室不整脈などが現れ、昏睡後死亡する。慢性中毒は飲料水・食品等の長期摂取によって発症し、目・鼻・喉等の粘膜炎症、筋肉の弱体化、食欲減退、などの症状が現れる。慢性中毒が進行すると、色素沈着や角化症などの皮膚障害が現れ、さらに癌や抹消神経炎などに発展すると考えられている^{1,3,4)}。

現在、日本国内では、約 30 の鉱山においてヒ素に汚染された鉱山廃水の処理が行われている⁵⁾。また、2000 年度の水道統計によると、基準値を上回るヒ素が全国 33 カ所（22 カ所は地下水）の浄水場で確認されている。このヒ素はいずれも自然由来とされている⁶⁾。このようにヒ素は日本各地で問題となっており（例えば、新潟県・新潟平野や、島根県・宍道低地帯、宮城県・東松島市野蒜地区、兵庫県・猪名川水系など）⁷⁻⁹⁾、その対策が必要とされている。

ファイトレメディエーション（Phytoremediation）は、植物を用いた汚染環境修復技術である¹⁰⁾。本研究で用いたマツバイ（*Eleocharis acicularis*）は水生植物であり、Cu、As、Zn、Pb および Cd の超集積植物であると報告されている¹¹⁻¹³⁾。また、単子葉植物であるマツバイは、重金属だけでなく Si も集積し、重金属と Si の集積濃度の間には正の相関があると報告されている¹²⁾。本研究では、Si 肥料を添加した場合のマツバイの重金属集積能力を検討した。

2 実験方法

2.1 実験サイト

本研究は、北海道札幌市定山溪温泉街を流れる豊平川で行った。札幌市の水道水原はそのほとんどを豊平川に依存しているが、上流部に位置する定山溪の河床から湧出する温泉湧出水や、温泉街からの温泉排水にヒ素が含まれており、豊平川のヒ素汚染が懸念されている^{14, 15)}。

2.2 実験方法

実験場所は定山溪温泉街下流部の河川である (Fig. 1)。今回実験に用いたマツバイは、北海道に自生していたものを使用した。栽培にはプラスチックコンテナ (37 × 53.5 × 30.5 cm) を 2 個用い、その中に栽培ポット (9 × 9 × 8 cm) を 15 個ずつ充填し、河川に沈めて実験を行った。マツバイはそれぞれの栽培ポットに約 15 g ずつ移植した。栽培ポット内の土壌は、各プラスチックコンテナに砂のみのもものと、砂と Si 肥料を重量比で 50 % ずつ混合したものをそれぞれ用意し、栽培ポットに充填した。プラスチックコンテナは、流行の上流側に砂のみの栽培ポットを、下流側に砂と Si 肥料を混合した栽培ポットを充填したものを配置した (Fig. 2)。栽培期間は 2009 年 7 月～10 月の約 3 ヶ月である。



Fig. 1. Cultivation site in Jozankei area.



Fig. 2. Photograph of cultivated *E. acicularis* in plastic containers.

2.3 分析方法

採取したマツバイは超純水で十分に洗浄した後、恒温器 (80 °C) で約 2 日間乾燥させ、微粉末にした。マツバイの重金属濃度分析および Si 濃度分析は愛媛大学総合科学研究支援センターに設置している高周波誘導結合質量分析装置 (ICP-MS) および岩手医科大学サイクロトンセンターで設置している粒子線励起 X 線分析 (PIXE) を用いた。PIXE 測定の際、マツバイ試料は硝酸灰化法¹⁶⁾で分解した後、内部標準法で定量分析を行った¹⁷⁻¹⁹⁾。分析確度・精度に関する検定は National Research Council Canada (NRCC) の環境試料 NIES CRM No.1 (リョウブ) を用いて行った。

3 結果

Fig. 3 に、実験前と実験後のマツバイ中の As、Mn、Pb、Zn、Cu および Si の濃度を示す。Si 肥料の添加により、As、Mn および Pb の集積濃度は、地上部および根部で大きく増加した。Zn は、地上部のみで集積濃度が増加した。Cu に関しては上記元素と対照的で、地上部および根部で集積濃度が減少した。

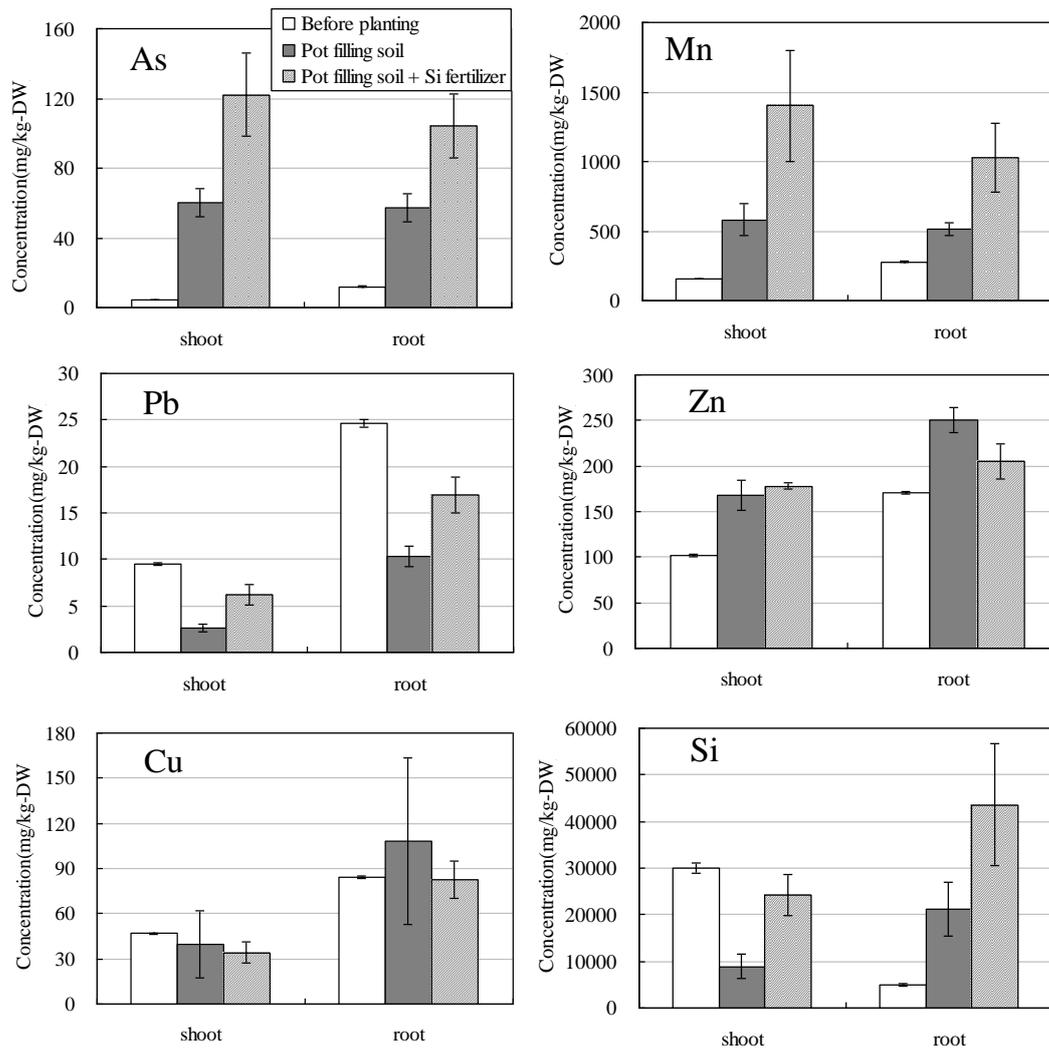


Fig. 3. Concentration of heavy metals and Si in *E.acicularis* after the cultivation experiment.

4 考察

4.1 Si 肥料によるマツバイの重金属集積能力の影響

図4よりマツバイ全体のAs、MnおよびPbの集積濃度とSi集積濃度には正の相関が見られる。As、MnおよびPb元素の相関係数は、それぞれ0.74、0.68および0.84である。一方で負の相関が見られるのはZn ($r = -0.53$)であり、マツバイ中のCuとSiの集積濃度に明確な相関は見られなかった ($r = -0.17$)。

4.2 マツバイの各重金属における生物濃縮係数 (Bioconcentration factor)

Fig. 5はマツバイ中の各重金属の生物濃縮係数 (BCF) を示したものである。生物濃縮係数は植物による重金属集積の能率性を評価するものである²⁰⁾。本研究では暫定値として「マツバイ中の重金属濃度/河川中の重金属濃度」で算出した。河川中の重金属濃度は、久保田ほか(2010)が報告している、栽培地点における濃度を平均したものを参考にした²¹⁾。Si肥料の添加により生物濃縮係数が大きく増加した元素は、As、Mn、およびPbである。一方で、Si肥料を添加しても重金属集積能力が減少する元素はCuおよびZnであった。

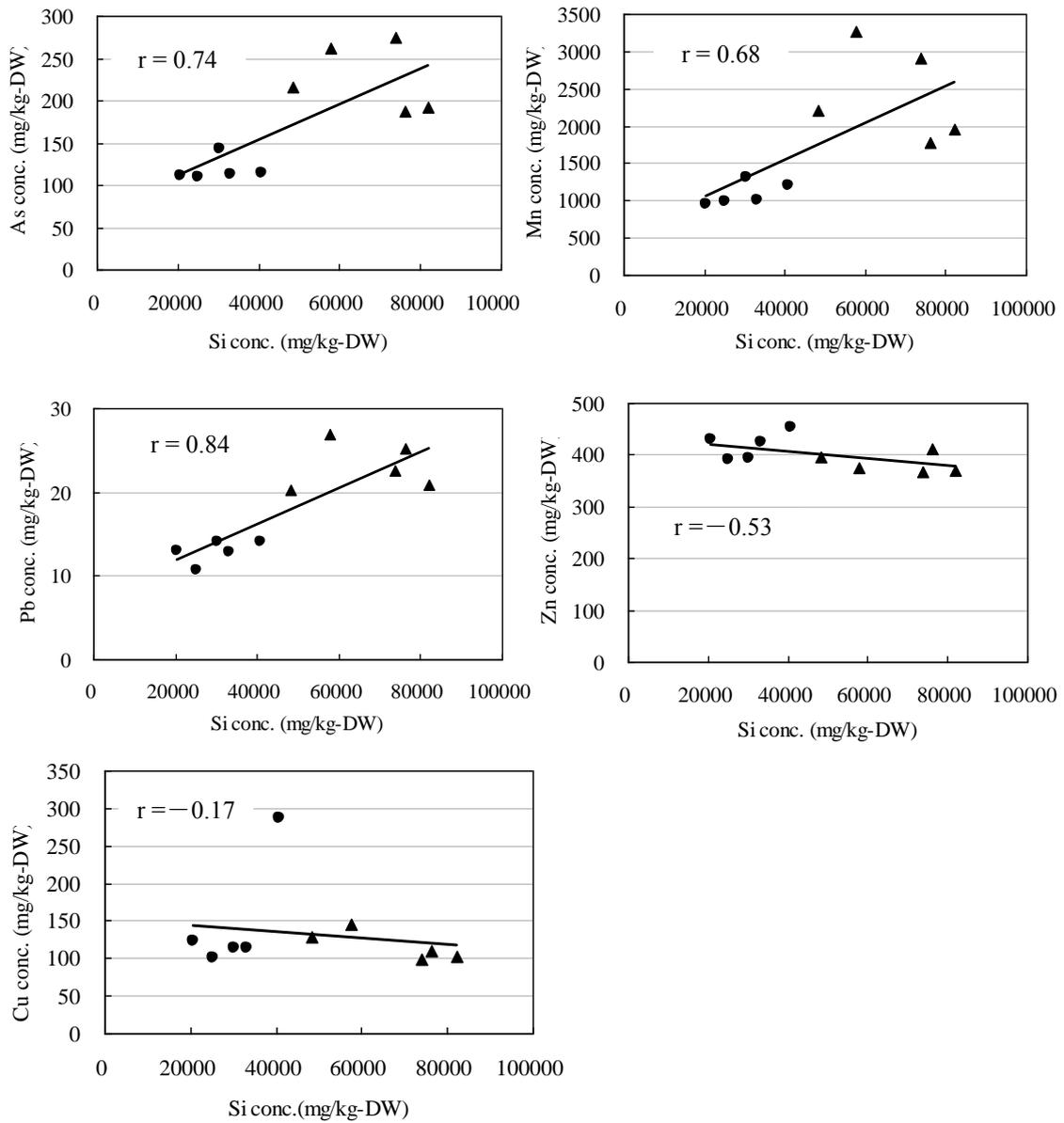


Fig. 4. Correlation between concentrations Si and heavy metals in *E. acicularis*.

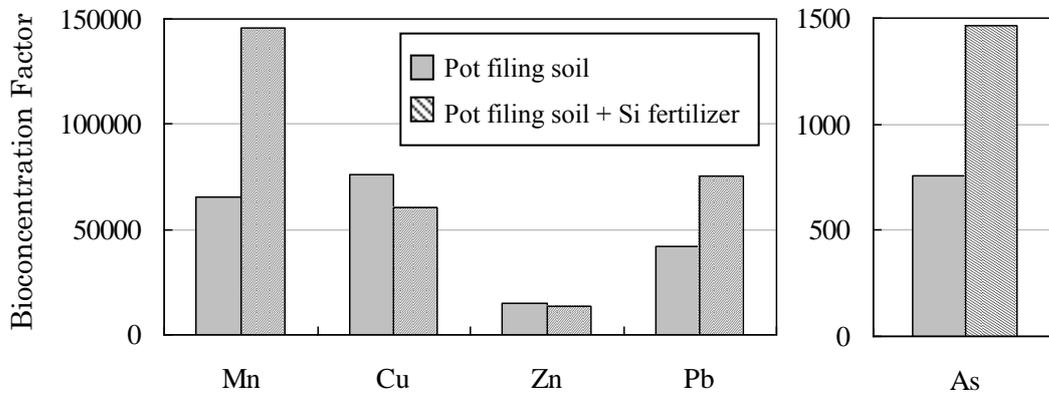


Fig. 5. Bioconcentration factor (BCF) values of Mn, Cu, Zn, Pb, and As in *E. acicularis*.

5 まとめ

本研究の結果より、Si 肥料の添加によって、As、Mn および Pb の集積濃度が増加すること、また Zn には影響を与えないことが確認できた。一方で、Cu の集積濃度は Si 肥料の添加によって抑制されることが示唆される。

謝辞

本研究を行うにあたり、財団法人 河川環境管理財団の河川整備基金助成事業費（研究代表者：榊原正幸）および科学研究費補助金（基盤研究 B、研究課題番号：19340153、研究代表者：榊原正幸）を使用した。また、現地の栽培実験にあたっては、札幌土木現業所事業課、札幌市役所建設局水道河川部河川管理課、および植生環境調査の濱田 崇氏に御協力いただいた。記して謝意を表す。

参考文献

1. M. Karim, "Arsenic in groundwater and health problems in Bangladesh", *Water Research*, Vol. 34, No.1, 304-310 (2000)
2. M. Berg, H. C. Tran, T. C. Nguyen, H. V. Pham, R. Schertenleib and W. Giger, "Aresnic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: A human health threat", *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, Vol. 35, No.13, 2621-2626 (2000).
3. A. H. Smith, E. S. Lingas, M. Rahman, "Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency", *World Health Organization*, Vol. 78, No.9, 1093-1103 (2000).
4. 安藤正典、「インド・バングラディッシュにおける地下水ヒ素汚染と健康影響」、国立保健医療科学院研究情報センター、Vol. 49, No. 3, 266-274 (2000).
5. 富岡祐一、広吉直樹、恒川昌美、「ヒ素含有鉱物に由来する環境汚染と修復に関する研究の動向ー特に鉱滓堆積場におけるヒ素の溶出と固定についてー」、環境資源工学、Vol. 52, 145-150 (2005).
6. 島田允堯、「ヒ素汚染された地下水の起源と問題点」、資源地質、Vol.53, No.2, 161-172 (2003).
7. 久保田喜裕、横田大樹、石山 豊、「新潟平野、宍道低地帯における温泉水中のヒ素濃度 - 地下水ヒ素汚染問題におけるヒ素の供給源の検討 その 2 -」、地球科学、Vol. 55, 11-22 (2001).
8. 清野 茂、安部公江、栗野 健、大庭和彦、嵯峨京時、「宮城県東松島市（旧鳴瀬市）野蒜地区における砒素汚染地下水の解析事例」、宮城県保険環境センター年報、Vol. 24, 101-104 (2006).
9. 芦田賢一、山本 淳、古武家善成、「猪名川水系におけるヒ素およびその他の重金属の空間的時期的分布とその要因」、水環境学会誌、Vol. 24, No.7, 466-472 (2001).
10. I. Raskin, R. D. Smith, D. E. Salt, "Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from environment", *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 8, 221-226 (1997).
11. M. Sakakibara, A. Harada, S. Sano, R. S. Hori, "hytoremediation of Heavy Metals Contaminated by *Eleocharis acicularis* (in Japanese) in: Proc. 12th Symp", *On Soil and Groundwater Contam. and Remedi (Ed: N. Takeda)*, Kyoto, Japan, 545-548 (2006).
12. N. T. H. Ha, M. Sakakibara, S. Sano, R. S. Hori, K. Sera, "The potential of *Eleocharis acicularis* for phytoremediation: Case study at an Abandoned mine site", *Clean-Soil, Air, Water*, Vol. 37, No.3, 203-208 (2009).
13. M. Sakakibara, Y. Ohmori, N. T. H. Ha, S. Sano, K. Sera, "Phytoremediation of heavy metal-contaminated water and sediment by *Eleocharis acicularis*", *Clean-Soil, Air, Water*, Vol. 39, No. 8, 735-741 (2011).
14. 辰巳健一、中埜渡丈嘉、成田隆広、眞柄秦基、橋 治国、「豊平川における砒素化合物の動態」、水環境学会誌、Vol.25, No.5, 289-296 (2002a).
15. 辰巳健一、中埜渡丈嘉、三浦勝巳、成田隆広、神 和夫、眞柄秦基、橋 治国、「豊平川におけるヒ素の降雨時流出特性」、環境工学研究論文集、第 39 巻、257-266 (2002b).

16. S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, Y. Saitou and K. Sera, "Present Status of NMCC and Sample Preparation Method of Bio-Samples.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 3- 4, 319-328 (1993)
17. K. Sera, S. Futatsugawa, K. Matsuda and Y. Miura, "Standard-free method of quantitative analysis for bio-samples", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.6, No.3, 4, 467-481 (1996)
18. K. Sera, S. Futatsugawa and K. Matsuda, "Quantitative analysis of untreated bio-samples", *Nucl. Instr. and Meth. B* 150, 226-233 (1999)
19. J. Itoh, S. Futatsugawa, Y. Saitoh, F. Ojima and K. Sera, "Application of a Powdered-internal-standard Method to Plant and Seaweed Samples.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.15-1,2, 27-39 (2005)
20. R. R. Brooks, 1998. "Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals", *CAB International, Wallingford*, 380 (1998).
21. 久保田有紀, 榑原正幸, 佐野栄, 「北海道札幌市の定山溪温泉街における温泉水および周辺の豊平川のヒ素濃度」, 愛媛大学理学部紀要, 第 16 卷, 7-13 (2010).

Effect of Si fertilizer on phytoremediation by *Eleocharis acicularis*

Y. Kubota¹, S. Sakakibara¹, S. Sano² and K. Sera³

¹Graduate School of Science and Engineering, Ehime University
2-5 Bunkyocho, Matsuyama 790-8577, Japan

²Faculty of Education, Ehime University
3 Bunkyocho, Matsuyama 790-8577, Japan

³Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
Tomegamori, Takizawa 020-0173, Japan

Abstract

Phytoremediation is an environmental remediation technique that takes advantage of plant physiology and metabolism. *Eleocharis acicularis* is of great significance in the phytoremediation of water and sediments contaminated by heavy metals. In this study, a field cultivation experiment is performed to examine the applicability of Si-fertilizer to the accumulation of heavy metals using *E. acicularis*. Results of the field cultivation experiments, Si-fertilizer promotes the Mn, Pb, and As accumulation of *E. acicularis*. And also, the bioconcentration factor for Mn, Pb, and As are promoted using Si-fertilizer. The present result indicates that Si-fertilizer is efficient tool to the Mn, Pb, and As accumulation of *E. acicularis*.

Keywords : PIXE, ICP-MS, Heavy metals, Phytoremediation, Si fertilizer, *Eleocharis acicularis*