

## マツバイによる重金属汚染河川の浄化に関する栽培方法の開発

榊原正幸<sup>1</sup>、彦田真友子<sup>2</sup>、佐野 栄<sup>3</sup>、世良耕一郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>愛媛大学理工学研究科  
〒790-8577 松山市文京町 2-5

<sup>2</sup>松山市立津田中学校 〒791-8031 松山市北斎院町 1106

<sup>3</sup>愛媛大学教育学部 〒790-8577 松山市文京町 3

<sup>4</sup>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

いわゆる重金属による広範囲もしくは半永久的に汚染源が存在する環境汚染に対して、ファイトレメディエーション技術（phytoremediation）が極めて有効である。ファイトレメディエーションは植物の多様な機能による環境修復技術の総称で、①低コスト、②エネルギー消費がほぼ0、③環境への二次的負荷0という長所を有している。重金属汚染の場合、植物が媒体から重金属を吸収・蓄積するファイトエクストラクション（phytoextraction）と呼ばれる機能が用いられる。しかしながら、近年のファイトレメディエーションに関する研究は、植物生理学的研究が多数を占め、実際の実用化のための研究に乏しい。そのため、その実用化には、多くの解決すべき課題が残されている。

さて、水生植物であるカヤツリグサ科ハリイ属のマツバイ（*Eleocharis acicularis*）（Fig. 1）は多種類の有害重金属に対して耐性を有し、多種類の重金属を同時に吸収・蓄積できる重金属超集積植物である<sup>14</sup>。マツバイは、国内では北海道から沖縄まで全国各地の湖沼、ため池、水路や水田などに群生する抽水性かつ繁殖力旺盛な多年草である。これらの点は、マツバイが理想的な国内におけるファイトレメディエーション植物としての性質を有していると言える。しかしながら、その実用化のために、近年の我が国の気象条件や実験環境に適したマツバイの栽培方法の研究開発が必要である。

本研究では、マツバイによるフィールド栽培実験において、汚染された河川水から重金属を効率良く除去する栽培方法ならびにその実用性について検討する。



Fig. 1 Blooming of *Eleocharis acicularis*.

## 2 実験方法

本栽培実験は、国内の A 廃止鉱山付近の残土堆積場を流れる小規模な河川(川幅約 50~1m 程度、水深約 10~20cm、流速 5~10cm/s) に建設された砂防ダム周辺において実施した。ダム池周辺の土壌および底質には、層厚 50 cm~2 m 程度の有害重金属に富む粘土質な堆積物が堆積している。近年、この実験対象としている河川においても、ゲリラ豪雨などによる著しい河川の水位や流速の変動は、ファイトレメディエーション技術の実用化の問題点となっている。

そこで、本実験では、以下の 3 つの栽培実験方法に関して検討した。本研究では、マツバイの以下の 3 つの栽培方法で移植し、一定期間栽培経過を観察した。

- (1) 直植え栽培法：マツバイを重金属汚染された底質に直接移植する方法 (Fig. 2) 、
- (2) ポット栽培法：マツバイを市販の砂を充填したポットに移植し、重金属汚染された底質に設置する方法 (Fig. 3) 、
- (3) フローティング栽培法：マツバイをフローティングバットに移植し、重金属汚染された砂防ダムの池で水耕栽培する方法 (Fig. 4) 。

本実験で使用したマツバイは、愛媛県松山市重信川支流の河川に自生していたマツバイを採取し、栽培実験に使用した。



Fig. 2 “Pot cultivation method” for phytoremediation of heavy metal polluted water by *E. acicularis*.

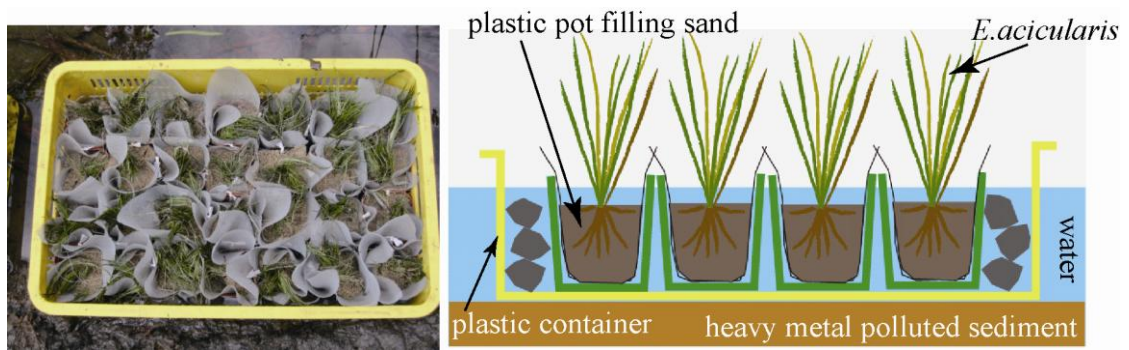


Fig. 3 “Pot cultivation method” for phytoremediation of heavy metal polluted water by *E. acicularis*.

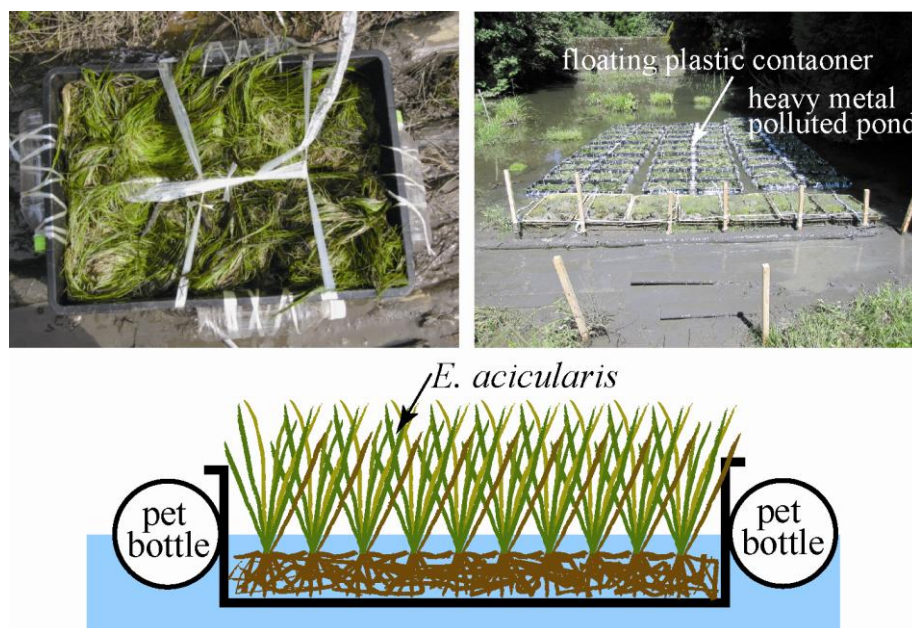


Fig. 4 “Floating cultivation method” for phytoremediation of heavy metal polluted water by *E. acicularis*.

### 3 分析方法

実験時に採取したマツバイは超純水で十分に洗浄した後、エアバス(80°C)で24時間乾燥し、めのう乳鉢で微粉末にし、それを分析試料とした。マツバイの重金属濃度分析は、岩手医科大学サイクロトロンセンターに設置しているPIXE分析システムを用いて行った。マツバイ試料は硝酸灰化法<sup>5)</sup>で分解した後、内部標準法で定量分析を行った<sup>6-8)</sup>。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 (pepperbush)を用いて行った。

### 4 栽培サイトの水・堆積物の重金属濃度

今回、栽培実験を行った地点周辺における河川水の重金属濃度は、平均でZnが719  $\mu\text{g/L}$ 、Cuが32.5  $\mu\text{g/L}$ 、Asが67.8  $\mu\text{g/L}$ 、Cdが6.7  $\mu\text{g/L}$ 、Pbが0.7  $\mu\text{g/L}$ である。一方、土壌の重金属濃度の範囲はAsが230 ~ 1,603 mg/kg、Cuが108~2,044 mg/kg、Znが67~2,100 mg/kgおよびPbが32.1~202 mg/kgである。それらの平均(n=4)は、Asが1,032 mg/kg、Cuが767mg/kg、

Zn が 966 mg/kg、および Pb が 85 mg/kg である<sup>9)</sup>。

## 5 実験結果および考察

### 5.1 マツバイの生育状況

#### a) 直植え栽培法

実験サイトのダム池の底質および周辺の湿地の堆積物は極めて柔らかく流動性が高いため、マツバイの移植が極めて困難であった。本研究では、池に流れ込む河川の底質およびダム池の底質に移植した (Fig. 2)。前者の場合、栽培期間中に発生したゲリラ豪雨等の降雨による水位上昇および流速の増大によって、移植したマツバイの多くが流失した。一方、池の底質のマツバイはバイオマスが順調に増大していた。この実験結果は、栽培したマツバイが、重金属に富む底質環境に適応できることを示しているものの、砂防ダムの湿地や池の底質にマツバイを移植することが技術的に極めて困難であることが明らかになった。

#### b) ポット栽培法

この栽培法では、マツバイを移植したコンテナを池の底質に定置しているため、マツバイの生育状況が池の水位変化の影響を直接受けていた。すなわち、降雨などによって池の水位が上昇した場合、マツバイが水没し、葉の表面が粘土質な付着物によって覆われていた。この状況が長期間継続し、マツバイは光合成ができず、枯死してしまうものも認められた。また、実験期間中のバイオマスの増加量もあまり大きくない。この実験結果は、栽培したマツバイが、重金属に富む底質環境に適応できることを示しているものの、水位の変化に対応する改善が必要であることを示唆している。

#### c) フローティング栽培法

今回の実験によって、「フローティング栽培法」が、以下の2点で有効であることが明らかになった。一つはマツバイが陸上葉になっているため、葉への沈殿物の付着を回避することができた点である。そのため、生育状況も良好であり、順調にバイオマスを増大することが可能であった。他の一つは、最も大きな課題であったゲリラ豪雨による河川の水位や流速の変化に対して、特に影響が認められなかった点である。これらのことから、「フローティング栽培法」が最も実用的で多様な栽培環境に適用できると考えられる。

### 5.2 マツバイの重金属濃度

上記のポット栽培法およびフローティング栽培法のマツバイに関して、実験開始後 6 か月で分析用試料を採取し、それらの重金属濃度を PIXE 分析法で測定した (Fig. 5)。ただし、直植え栽培法は豪雨時に流失したため、マツバイの重金属濃度は測定できなかった。測定の結果、マツバイの重金属濃度は、ポット栽培法の方がフローティング栽培法より高濃度であった。これはポット栽培法のマツバイが水量が増大した際に重金属濃度の高い堆積物を被っており、その堆積物から重金属を吸収しているためであると考えられる。一方、フローティング栽培法のマツバイは、ダム池の水のみから重金属を吸収・蓄積していると推定される。バイオマスの増大率および河川水の浄化の観点から考えると、この河川水の浄化に関しては、フローティング栽培法が最も効果的であると考えられる。

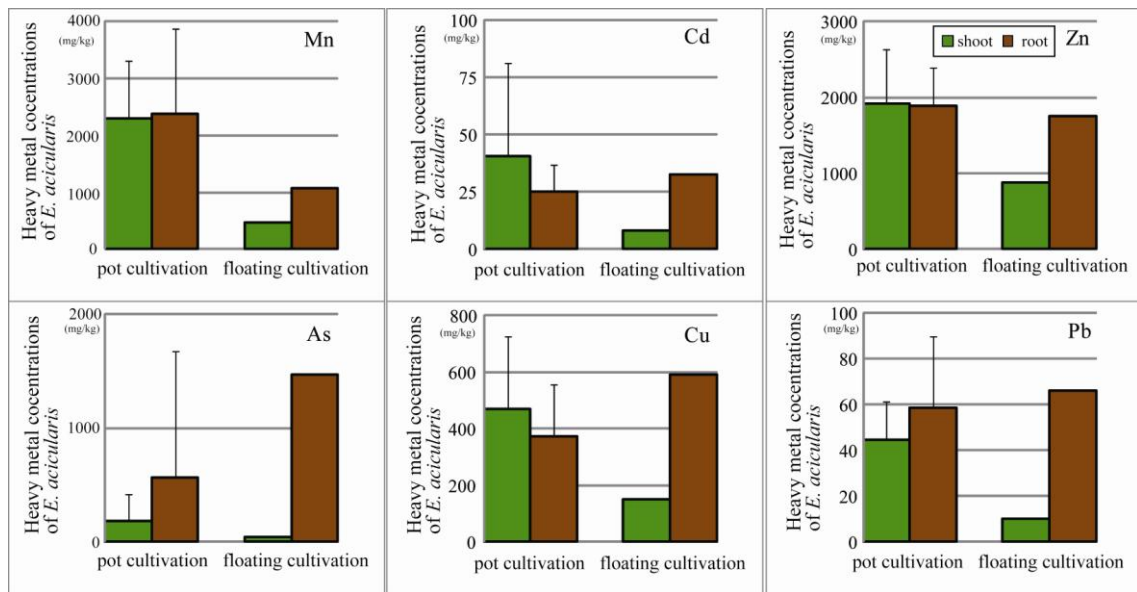


Fig. 6 Heavy metal concentrations of *E. acicularis* by the pot cultivation and floating cultivation experiments after six months.

### 5.3 マツバイによるファイトレメディエーションにおける栽培法

今回、実施したマツバイの栽培方法の実験によって、マツバイによるファイトレメディエーションに関しては、「フローティング栽培法」が最も実用的で多様な栽培環境に適用できることが明らかになった。その結果、マツバイによるファイトレメディエーションは実用化にまで展開することが可能になった。現在、著者らの研究グループは、対象地域の自治体の協力を得て、フローティング栽培法によって実験地域の河川水中の重金属濃度の10%低減するためのフィールド試験を実施している。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、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)、愛媛大学産学連携促進事業経費(研究種目:産業シーズ育成、研究代表者:榊原正幸)および科学技術振興機構、研究成果最適展開支援事業(A-STEP)フィージビリティスタディステージ探索タイプ(課題番号:AS221Z00271E、研究代表者:榊原正幸)の事業費を使用した。

本研究を実施するにあたって、愛媛大学総合研究支援センターに教職員の方々には、様々なご協力をいただいた。また、日本アイソトープ協会 NMCC のスタッフの方々および岩手医大サイクロトロンセンターのスタッフの方々には、共同利用の際にお世話になった。以上の方々には記して謝意を表す。

### 参考文献

1. 榊原正幸、原田亜紀、佐野 栄、堀 利栄、井上雅裕、“マツバイを用いたファイトレメディエーションによる重金属に汚染された水環境の浄化”、第12回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、545-548 (2006)
2. Ha, N. T. H., M. Sakakibara, D. Takehana, S. Sano and K. Sera, “Accumulation of heavy metals by *Eleocharis acicularis* in an abandoned mining site of Hokkaido, Japan.”, The 14th Symposium on Soil and Groundwater Contamination and Remediation, 550-553 (2008)

3. Ha, N. T. H., M. Sakakibara, S. Sano, R. S. Hori and K. Sera, "The potential of *Eleocharis acicularis* for phytoremediation: case study at an abandoned mine site.", *CLEAN – Soil, Air, Water*, Vol. 37, 203-208 (2009)
4. M. Sakakibara, A. Harada, S. Sano and R. S. Hori, "Heavy Metal Tolerance and Accumulation in *Eleocharis acicularis*, a Heavy Metal Hyperaccumulating Aquatic Plant Species.", *Geo-pollution Science, Medical Geology and Urban Geology*, Vol. 5, 1-8 (2009)
5. 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)
6. 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)
7. K. Sera, S. Futatsugawa and K. Matsuda, "Quantitative analysis of untreated bio-samples", *Nucl. Instr. and Meth. B* 150, 226-233 (1999)
8. 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)
9. 榊原正幸、大森優子、佐野 栄、世良耕一郎、濱田 崇、堀 利栄、“マツバイによる廃止鉱山残土堆積場の重金属汚染された水・底質環境の浄化”、第 14 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集、130-133 (2008)

## Cultivation method of *Eleocharis acicularis* on phytoremediation

M. Sakakibara<sup>1</sup>, M. Hikoda<sup>2</sup>, S. Sano<sup>3</sup> and K. Sera<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science & Engineering, Ehime University  
2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

<sup>2</sup>Tsuda Junior Highschool  
1106 Kitasaya, Matsuyama 791-8031, Japan

<sup>3</sup>Faculty of Education, Ehime University  
3 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

<sup>4</sup>Cyclotron Research Center, Iwate Medical University  
Tomegamori, Takizawa 020-0173, Japan

### Abstract

Regarded as a highly promising technology, phytoremediation uses plants that absorb contaminants, such as toxic heavy metals, to remediate polluted soils, and has the benefits of low cost and low environmental impact. *Eleocharis acicularis* is well known as heavy metal hyperaccumulating aquatic plant and expected as the strong candidate for application to phytoremediation of polluted water. The objectives of this study were to examine cultivation method of *E. acicularis* on phytoextraction of heavy metal polluted water. In order to establish a cultivation method of *E. acicularis*, three methods have been experimented; (1) direct , (2) pot cultivation , and (3) floating cultivation.

Based on the cultivation experiments the floating cultivation method is most suitable for phytoremediation of heavy metal polluted water by *Eleocharis acicularis*.

**Keywords** : macrophytes, *Eleocharis acicularis*, phytoextraction, heavy metal, contaminated water, mine site, floating cultivation method