

# 重金属汚染された廃止鉱山残土堆積場における自生木本類の 重金属集積

堀 孝太朗<sup>1,2</sup>、榊原正幸<sup>1</sup>、世良耕一郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>愛媛大学大学院理工学研究科  
790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5

<sup>2</sup>JFE テクノリサーチ株式会社  
210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1 番 1 号

<sup>3</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字留が森 348-58

## 1 はじめに

「ファイトレメディエーション (Phytoremediation)」は、土壌や水などの環境中に存在する有害物質を、植物の生理的作用によって除去もしくは無害化し、リスクを低減する技術の総称である<sup>1)</sup>。この技術は、環境中に存在する有害物質を根圏で固定化するファイトスタビライゼーション (Phytostabilization)、根圏を用いた地下水の濾過による Rhizofiltration や植物体内に有害物質を蓄積し固定化するファイトエクストラクション (Phytoextraction) 等の機能を用いる。これらの技術は、従来の土木工学的な汚染処理技術と比較して、周辺環境へ与える負荷が小さく、低コストである<sup>2)3)</sup>等のメリットがある。

重金属汚染媒体のファイトレメディエーションに利用可能な植物として「超集積植物 (Hyperaccumulator)」の存在が挙げられる。この植物は、他の植物と比較して有害物質に対する耐性が高く、その植物体中における有害物質濃度は、他の植物の 1000 倍以上に達する<sup>4)</sup>。従来、超集積植物として報告されている植物の大部分は草本類である。これは、草本類が総じてバイオマスが小さいことや成長速度が速いことなど、栽培実験が行いやすいということが理由であると考えられる。

一方、木本類は、草本類と比較して、広範囲に及ぶ根圏を有しており、かつバイオマスが大きい。さらに、それらは長期的な成長するなど、地下水の移動による汚染物質の拡散を防ぐ上で大きな利点を有している<sup>5)</sup>。しかしながら、バイオマスが大きい点および生存期間が長いという点が逆に短所となり、栽培実験や野外における調査が困難である。そのため、木本類のファイトレメディエーションに関する研究は、草本類のそれと比較して乏しいのが現状である。

本研究では、有害重金属に汚染された廃止鉱山残土堆積場に自生する植物の植生調査および木本類の重金属濃度分析を行った。そして、その結果に基づいて、木本類によるファイトレメディエーションの可能性について検討した。

## 2 分析試料および分析方法

本研究の分析試料は、国内のA廃止鉱山の残土堆積場において採取した。この残土堆積場は、本地域近郊のCu・Zn・Au含有鉱石を採掘していた鉱山の母岩およびスラグを貯蔵していたもので、明確な記録はないものの、昭和40年までにその活動を終了したと推定される、堆積場は小規模な谷の東岸に残土を貯蔵したもので、その規模は、東西約30 m×南北約200 mである。

本研究では、2009年3月および5月の2回にわたって、同残土堆積場に自生する木本類の採取を行った。その際、木本類は可能な限り葉・枝・根表面部・根中心部の部位に分けて分析した。分析試料は、乾燥後、電動ミルを用いて粉碎した後、めのう乳鉢で微粉末化して作成した。採取した木本類のうち、13種25試料を、岩手医科大学サイクロトロンセンターのPIXEを用いて分析した。

土壌試料は、植物片や礫サイズの岩片等を除去した後、乾燥する。乾燥後、2 mm メッシュの篩を用いて細粒部を分離し、めのう乳鉢を用いて微粉末化して作成した。これらの重金属濃度は、愛媛大学総合研究支援センターに設置しているエネルギー分散型XRF (PANalytical 製 Epsilon5) を用いてFP法で測定した。

## 3 調査・分析結果

### 3.1 本調査地の植生

周囲の森林地域との境界付近の残土堆積場では、アカマツ、コバノミツバツツジおよびヌルデなどの好日性木本類が多く分布している。堆積場東部の堆積場の重金属汚染土壌と森林帯の境界付近にはモチツツジ、ムラサキシキブおよびコバノミツバツツジが見いだされた。堆積場東部に広く分布する森林帯は、そのほとんどがスギによって構成されている。また、堆積場内には地下水流路に沿っても、アカマツが自生している。これら木本類は荒廃した土地に先行して生育する先駆植物であることから、本調査地は調査地近辺の森林地帯と異なり、未だ二次遷移の初期状態にあると考えられる。また、堆積場内を流れる川に沿って、シダ植物のヘビノネゴザが群生しており、地下水が湧出している地点では、蘚苔類が自生している(表1)。

表1 残土堆積場に自生していた植物種および分析試料

和名	学名	科名	分類
ヘビノネゴザ	<i>Athyrium yokoscense</i>	オシダ科	シダ植物
ススキ	<i>Miscanthus sinensis</i>	イネ科	草本類
ヤクシソウ	<i>Youngia denticulata</i>	キク科	草本類
アケビ	<i>Akebia quinata</i>	アケビ科	木本類
ハンノキ	<i>Alnus japonica</i>	カバノキ科	木本類
ムラサキシキブ	<i>Callicarpa japonica Thunb</i>	クマツヅラ科	木本類
リョウブ	<i>Clethra barbinervis</i>	リョウブ科	木本類
スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	ヒノキ科	木本類
ヤマフジ	<i>Last modified</i>	マメ科	木本類
アカマツ	<i>Pinus densiflora</i>	マツ科	木本類
モチツツジ	<i>Rhododendron macrosepalum</i>	ツツジ科	木本類
コバノミツバツツジ	<i>Rhododendron reticulatum</i>	ツツジ科	木本類
ヌルデ	<i>Rhus javanica</i>	ウルシ科	木本類

### 3.2 調査地域における表層土壌の重金属濃度

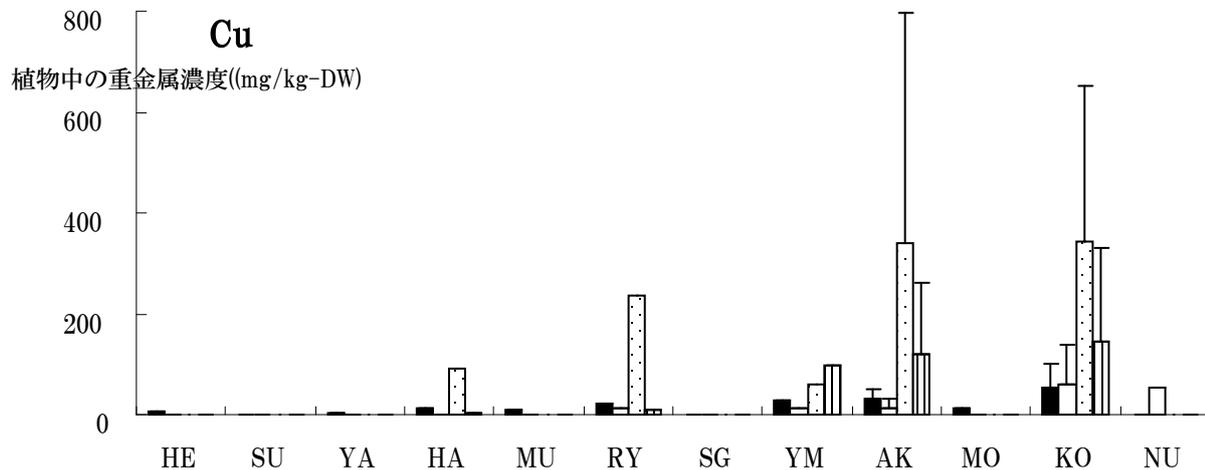
今回測定した重金属は Cu、As および Pb である。本調査地上における各重金属の分布を調査したところ、いずれの重金属においても、南部（特に河川東側の森林帯近辺）と西～北西部の森林帯近辺が高い濃度を示した。また調査地東部においては、Pb のみが高い濃度を示した。一方、南部の河川沿いや北部の河川沿いでは、全体に低い濃度を示し、東部斜面についても、As 以外の重金属は低い濃度を示した。本調査地域における土壌中の平均重金属濃度は、Cu が 673 mg/kg、As が 2,090 mg/kg および Pb が 1,820 mg/kg であった。本調査地における土壌中の重金属濃度はすべて環境省が提示した基準値（Cu=125 mg/kg 以下、Pb および As=150 mg/kg 以下）を大幅に上回っていた（表 2）。

表 2 本調査地域における土壌中の重金属濃度 (mg/kg)

	Cu	As	Pb
平均	673	2090	1820
標準偏差	±132	±359	±460

### 3.3 調査地域における自生木本類の重金属濃度

分析した自生植物のうち、マツ科のアカマツは根の表面部において Cu が平均で 338 mg/kg 集積していた。アカマツの最大重金属濃度は Cu が 1,560mg/kg、Pb が最大 688 mg/kg であった。ツツジ科のコバノミツバツツジは、根の表面部に Cu を平均で 458mg/kg、最大で 690 mg/kg 集積していた（図 1）。



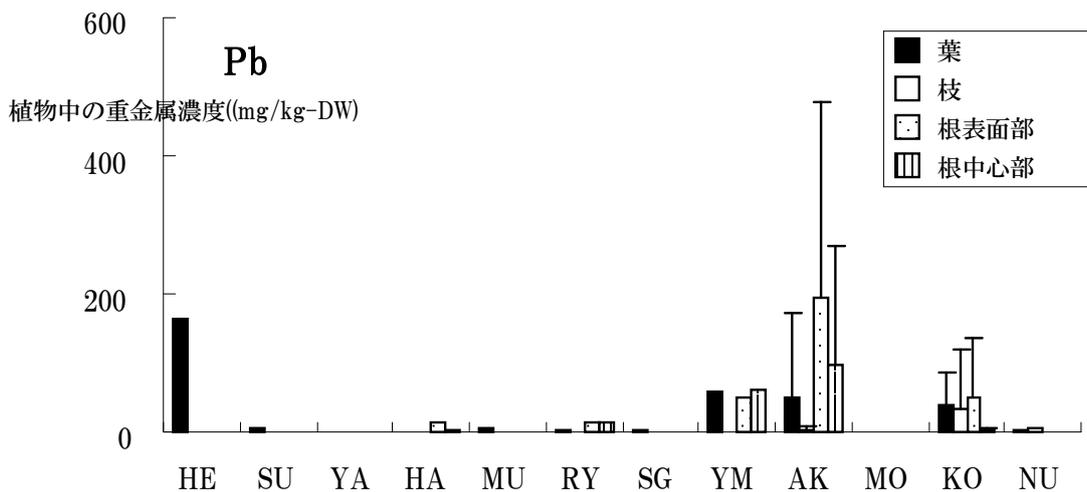
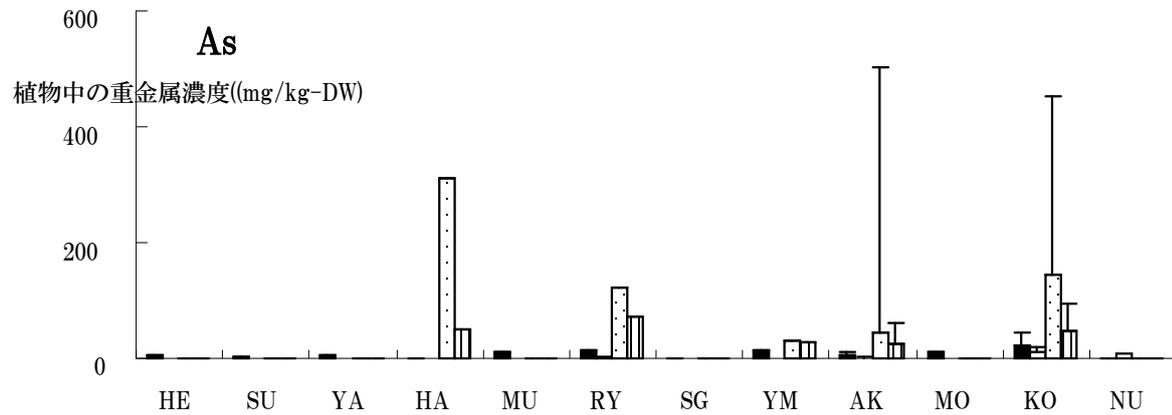


図1 自生植物中の各部位における重金属濃度 (mg/kg)

HE : ヘビノネゴザ、SU : ススキ、YA : ヤクシソウ、HA : ハンノキ、MU : ムラサキシキブ、RY : リョウブ、SG : スギ、YM : ヤマフジ、AK : アカマツ(n=11)、MO : モチツツジ、KO : コバノミツバツツジ(n=4)、NU : ヌルデ

その他の自生植物の重金属濃度に関しては、リョウブが根の表面部で 236mg/kg の Cu をそれぞれ集積していたが、それ以外の重金属元素の濃度は低かった。また、他の植物種および植物部位では、特筆すべき値は検出されなかった。なお、本調査地に自生していたアカマツ根部の平均重金属濃度は、Cu が 302 mg/kg、As が 24.7 mg/kg、Pb が 61.2 mg/kg であった。コバノミツバツツジ根部の平均重金属濃度は、Cu が 245 mg/kg、As が 95.4 mg/kg、Pb が 26.2 mg/kg であった。また、すべての植物において、葉や枝などの地上部よりも、地下部のほうが高い重金属濃度を示した。

## 4 考察

### 4.1 自生木本類の重金属耐性

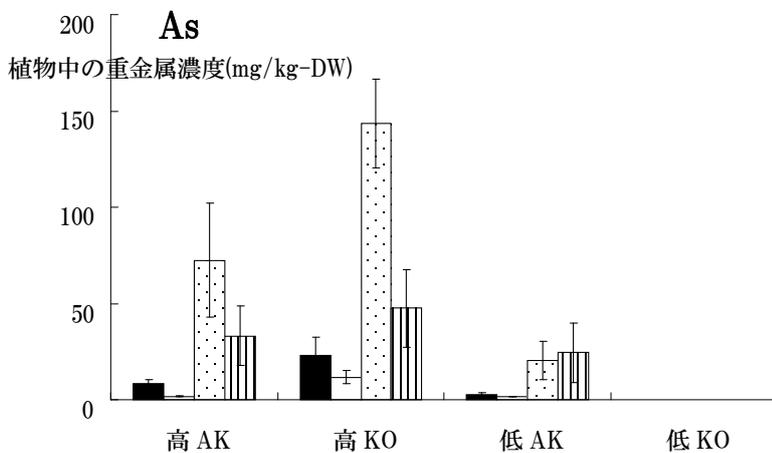
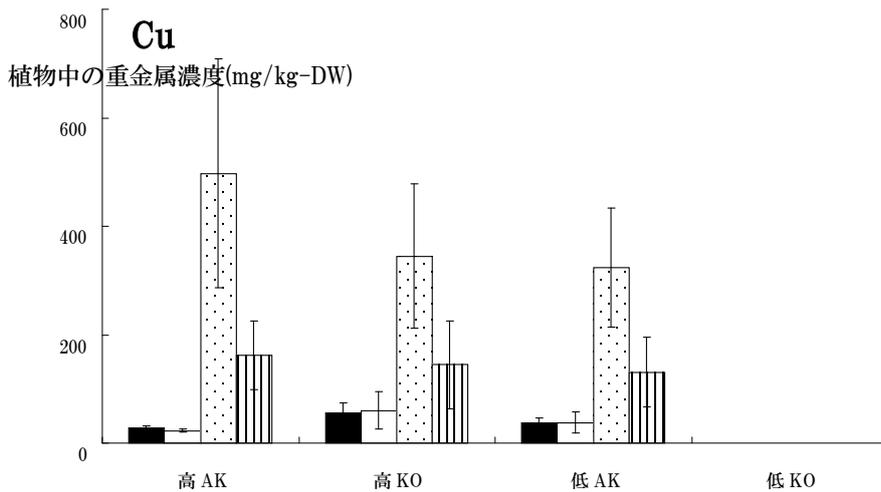
調査地域の木本類は、いずれも重金属を多量に含む土壌に自生していた。特にアカマツとコバノミツバツツジに関しては、鉱山残土上で萌芽、生育していた個体が確認された。このことから、これらの木本類は重金属に対する耐性を有していると考えられる。

### 4.2 自生木本類および土壌の重金属濃度の相関関係

植物直下の土壌中の重金属濃度によって「高濃度エリア」および「低濃度エリア」に分別し、アカマツおよびコバノミツバツツジの根部における重金属濃度を比較した(図2)。ここで区分した「高濃度エリア」は、植物直下の土壌のCu濃度が500 mg/kg以上、As濃度が1,500 mg/kg以上およびPb濃度が3,000 mg/kg以上であることとした。

高濃度エリアにおけるアカマツ根部中の重金属濃度は、低濃度エリアのそれと比較して、CuおよびAsでおよそ2~3倍、Pbに関しては40倍以上と、非常に高い値を示した。このことから、アカマツ根部における重金属濃度の高低には、土壌中の重金属濃度が密接に関与している可能性が高いと考えられる。

一方、コバノミツバツツジは、植物直下の土壌中のPb濃度の高低による有意な差異は見いだせなかった。このことから、コバノミツバツツジ根部と土壌の重金属濃度の相関関係は低いと考えられる。



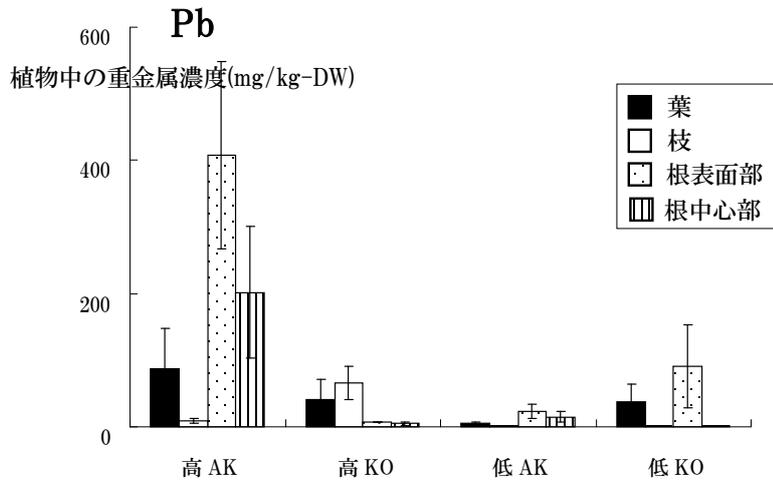


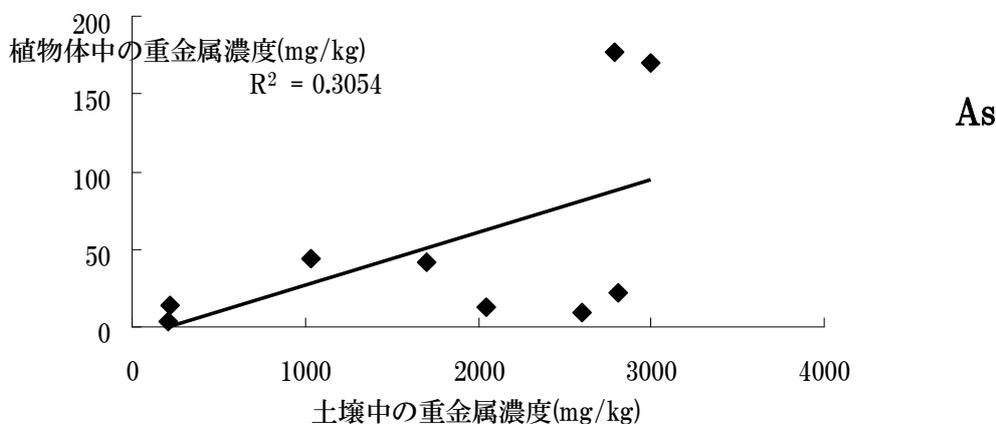
図2 それぞれの濃度エリアにおける植物中の重金属濃度(mg/kg-DW)  
AK: アカマツ、KO: コバノミツバツツジ

#### 4.3 根部における重金属濃度の不均質性

調査地に自生していた木本類の根の表面部における重金属濃度は、概ね根の中心部におけるそれより 35～50 %程度高い値を示した。その濃度は高く、一部では、超集積植物の定義を満たすレベルまで重金属を高濃度に含む個体も見出された。その一方で、調査地域に自生する木本類の葉や枝などの地上部における重金属濃度は根の表面部の 10 %程度であり、根の中心部を含めた地下部全体と比較しても、その濃度は非常に低い。今後、このメカニズムについては、より詳細な検討を行う必要がある。

#### 4.4 アカマツおよびコバノミツバツツジを利用したファイトレメディエーションの可能性

4.2でも示したように、本研究で測定されたアカマツの根部における Cu および Pb 濃度は、先行研究のデータ<sup>9)</sup>を上回る数値を示した。特に、As および Pb については、根の部分の重金属濃度が比較的高く、土壌中の重金属濃度と正の相関関係が認められた (図3)。一方、アカマツ中の Cu 濃度は、土壌中の重金属濃度と負の相関を示したが、アカマツの成長ステージの違いやバイオマス量、土壌中の重金属の形態などの要因によって変化する可能性があることから、より詳細な検討が必要であると考えられる。



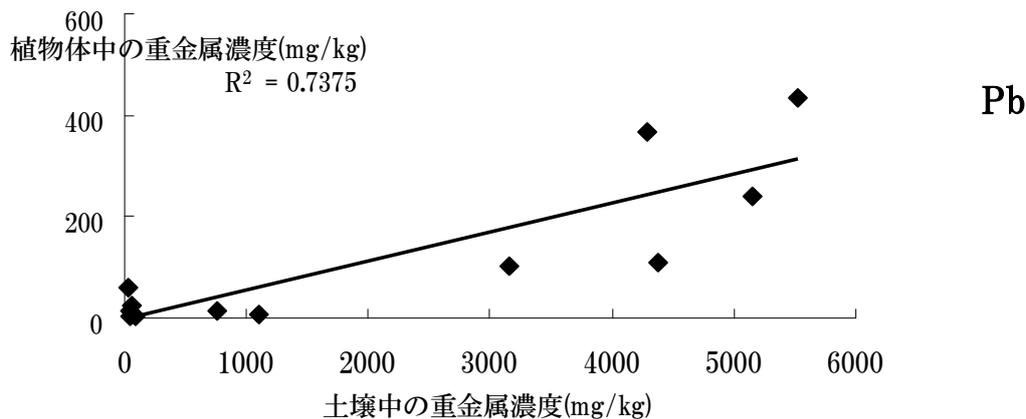


図3 アカマツ根表面部におけるAs（上）およびPb（下）濃度と土壌中重金属濃度の相関関係

また、アカマツは荒廃した土地に先進して繁殖する先駆植物である。重金属汚染が深刻な土地は一般的に、他の植物が繁殖しづらい荒廃した土地であることから、本調査地と似た状況にある他の汚染地域においても、他の植物と比較してよく生育すると考えられる。以上の点から、アカマツは重金属に汚染された地域において、ファイトレメディエーションに使用できる可能性があると考えられる。

一方、コバノミツバツツジは、根部のCu濃度が他の自生植物と比較して高い値を示した。しかしながら、植物が自生する土壌のCu濃度には、大きなばらつきが認められなかったのに対し、植物根部のCu濃度には50~350 mg/kgと、大きなばらつきが認められた。また、植物根部と土壌の重金属濃度の間に負の相関関係が認められた。従って、コバノミツバツツジを使用したファイトレメディエーションに関しては、より詳細な検討が必要であると考えられる。

#### 謝辞

調査地調査に関しては、ベトナム国家大学の Nguyen Thi Hoang Ha 博士、内海あずさ氏および彦田真友子氏にご協力いただいた。この場を借りて深謝申し上げる。また、植物の同定に関しては、愛媛県総合科学博物館の川又氏および植生調査の濱田 崇氏にご助言いただいた。

#### 参考文献

- 1) Salt, D. E., Smith, R. D. and Raskin I. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol.*, 34, 133-139 (1998).
- 2) Raskin, I., Smith, R. D. and Salt, D. E. Phytoremediation of metals using plants to remove pollutants from the environment. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 8, 221-226 (1997).
- 3) 王効挙・李法雲・岡崎正規・杉崎三男, ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復, 埼玉県環境科学国際センター報, 3, 114-123 (2004).
- 4) Brooks, R. R., Chambers, M F. Nicks, L. J. and Robinson, B. H., *Phytomining Trends, Plant. Sci.*, 9, 359-362 (1998).
- 5) Pulford, I. D. and Watson, C., *Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees - a review, Environ. Inter.*, 29, 529-540 (2003).
- 6) Seo, K. W., Son, Y., Rhoades, C. C., Nam, J. N., Jin, W. K. and Kim, J. G., *Seedling Growth and Heavy Metal Accumulation of Candidate Woody Species for Revegetating Korean Mine Spoils, Restoration Ecol.*, 16, 4, 702-712 (2008).

## Heavy metal accumulation in trees on an abandoned mine tailing in southwestern Japan

Kotaro Hori<sup>1,2</sup>, Masayuki Sakakibara<sup>1</sup> and Koichiro Sera<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>JFE Techno-Research Corporation  
1-1 Minamiatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, Kanagawa 210-0855, Japan

<sup>3</sup>Cyclotron Research center, Iwate Medical University  
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

### Abstract

Phytoremediation is a general term for technologies cleaning heavy metal pollution of water and soil using plant's metabolism. Hyperaccumulator plants heavily absorb heavy metals compared to other normal plants and can be used efficient and sustainable cleaning environmental pollution without civil engineering works. The purpose is to study on the absorption of heavy metals of collected trees and soils at an abandoned mine tailing site polluted by heavy metals in Japan. The tree samples are analysed by PIXE, and the soil samples are analyzed by PIXE and ED-XRF. The average concentrations of heavy metals of the soils are 673 mg Cu/ kg-DW, 2,090 mg As/kg, and 1,820 mg Pb /kg-DW. The maximum concentration of roots of *Pinus densiflora* had 1,560 mg Cu/kg-DW and 688 mg Pb/kg-DW. Root of *Rhododendron reticulatum* had 690 mg Cu/kg-DW in maximum. The *Pinus densiflora* have the possibility use for phytoremediation.