

特論 I レポート

Case studies of ~Phytoremediation~

農学国際専攻 修士1年
大根田将士 前田薫 楊哲嘉 綿貫園子

目次

1. 土壌汚染問題およびファイトレメディエーションについて
2. 株式会社 フジタ見学について
3. 現状の問題点
4. 今後の方向性
5. 参考文献

1. 土壌汚染問題およびファイトレメディエーションについて

土壌汚染とは、産業活動やその他の活動に伴い、土壌中に有害物質が残留し、蓄積することで土壌や地下水が汚染されることである。日本における歴史は古く、明治時代中期に社会問題化した足尾銅山鉍毒事件や昭和 30 年に報告されたイタイタイ病のような鉍山に由来する重金属の農用地汚染から始まった。鉍煙が森林の樹木を枯らして土壌を侵食し裸地化したり、農耕地が汚染され耕作が不可能となったり、汚染された農用地において栽培されたコメなどの農作物等を摂取したことで重金属が人の体内に蓄積し、大きな健康被害を生み出した。¹ 食べ物（畜産物、農作物等）や飲料水などが健康被害の主な原因と考えられる。昭和 30 年に報告されたイタイタイ病は、富山県で発生した病気で、おもにカドミウム汚染がもたらす被害が報告された。カドミウムは私たちの食べ物とくに米に蓄積し、汚染された米を食べることによって健康被害が生じた。土壌汚染問題は昔からあるにも関わらず、現在でも問題は解決しておらず、むしろ深刻化している状態である。近年では、2007 年に都市ガス製造工場跡地である豊洲のベンゼン等による土壌汚染が問題となった。土壌汚染は人の健康の保護や生活環境への影響、生態系や地球環境への影響などの環境リスクの他に、業績や不動産へのリスクといった社会リスクも存在する。業績へのリスクとは、直接的リスク、社会心理的リスク、規制リスクの 3 つに分類することができ、直接的リスクは調査・対策費用の発生や、それに伴う操業停止、訴訟・賠償費用の発生などが挙げられる。社会心理的リスクとは企業イメージの低下、地域からの信頼感の低下、社会からの監視の目の強化などが挙げられる。規制リスクとは環境規制の複雑化、企業競争力への影響などが挙げられる。不動産リスクとしては土地の資産価値低下、土地資産運用への影響、対策費用負担による土地売却益の減少などが挙げられる。このように土壌汚染は、環境リスクと社会リスクの両方の面から、しっかりと考えるべき問題である。

現在、日本国内において汚染に関する法律が厳しく定められており、2003 年の 2 月から 2004 年の 8 月までに土壌対策法の指定区域として分類されている数は全国で 20 箇所以上である。図 2、図 3 を見ると、カドミウムに関しては顕在化している箇所は少ないが、ヒ素に関しては顕在化している箇所も多く、その濃度も高い。汚染箇所は今後も増加すると考えられており、長期化するケースが多いと予想する。その為、土壌汚染対策においては低コストが重要視される。

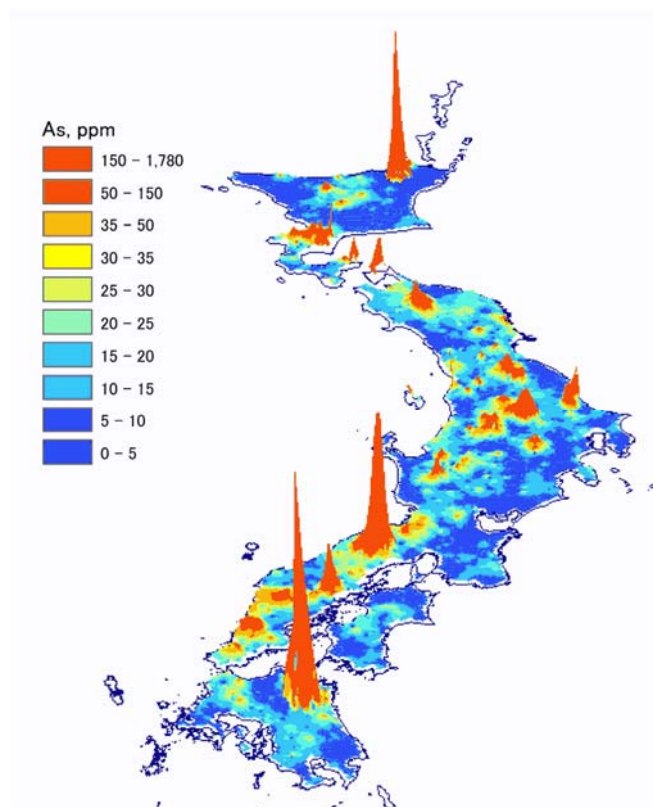


図2 日本国内におけるヒ素濃度の分布 2004年発表データ
(<https://www.gsj.jp/researches/topics/geochemmap.html>)

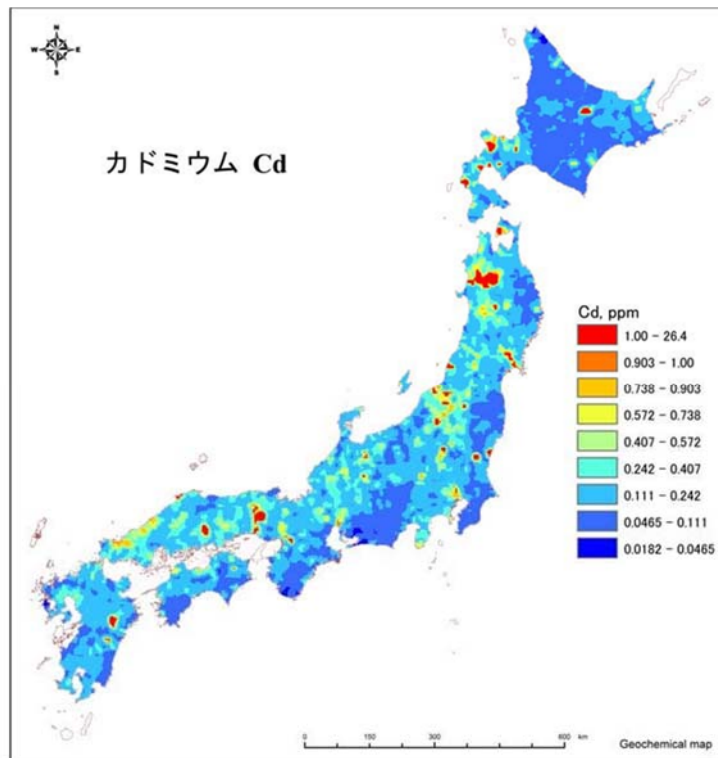


図3 日本国内におけるカドミウム濃度の分布 2004年発表データ
https://staff.aist.go.jp/a.ohta/japanese/study/GeoMap_ex_5.htm

汚染された土壌を浄化・修復する技術は多く存在する。例えば、有害物質の不要化や土壌洗浄などの化学物理的処理方法である。これらの方法は、浄化効率が高く比較的短時間に浄化することができる一方で、化学薬品を使用するため多大なエネルギーやコストを必要とするため、環境負荷がとても多い。さらに広大な地域に適用するには土壌性能の維持が困難であるなどと、他にも多くの問題が生じてしまうのが現状である。さらに、原位置での浄化ができない方法もあり、二次汚染のリスクも生じてしまう。

こうした問題を克服する技術として、バイオレメディエーションやファイトレメディエーションという方法がある。これらは微生物を使用したり植物を使用したりして土壌を浄化する方法であり、一切化学薬品等を使用せず、物理化学的な処理プロセスを使用しないのが特徴である。現在は、ガソリン等の燃料油や、その成分であるベンゼンなどの浄化に対して実用化されている。その他にもダイオキシンや塩素系の残留農薬などへの応用研究も活発に行われている。

この方法を利用した浄化の実用例を挙げる。微生物を使用したバイオレメディエーションは、1970年代に、米国でパイプから漏れた石油による汚染を修復するために初めて実施された。その後、1989年に米国アラスカ州でタンカーから大量の原油が流出した際に、大規模に実施された。日本においては、1997年に発生したナホトカ号タンカー事故により流出した重油が漂着した日本海沿岸部において小規模のバイオレメディエーション現場実験が行われている。その他にも、様々な報告がされている。また植物を使用したファイトレメディエーションは、米国において活発に報告されており、これまでに60件以上報告されている。さらに、チェルノブイリ原発事故や、近年では福島原発事故の浄化の際に実施

された。しかしながら、バイオレメディエーションやファイトレメディエーションがもたらす効果は曖昧であり、いまだに本格的には実用化には至っていない。なかでもバイオレメディエーションは微生物を用いるため、土壌の性質を変えてしまったり生態系に影響をもたらすという危険性が多少なりとも存在している。

ところがファイトレメディエーションはそのような危険性がないというのが特徴であり、現在土壌汚染対策において有効な方法であると注目を集めている。

ファイトレメディエーションとは、植物利用による環境修復技術であり、環境中の有害汚染物質を吸収、分解、大気への蒸散により低減または固定化する方法で、利用できる植物の機能として吸収集積(phytoaccumulation)、固定化(phytostabilization)、蒸発散(phytoevaporation)、根圏での分解(rhizodegradation)、吸収分解(phytodegradation)、地下水流制御(hydraulic control)、根圏での表層水や地下水濾過(rhizofiltration)の七つが提唱されている。²また、根圏を形成する根粒菌や分解微生物などの相乗効果により浄化する方法も含んでいる。対象となる有害物質は重金属(カドミウム、鉛など)、大気汚染物(窒素酸化物、硫黄酸化物)、環境ホルモン、放射性物質など、多様な汚染物質である。中でもカドミウム等の重金属は一度土壌に入ると土壌成分と強く吸着し取り除く作業がとても難しいため、これを除去できる点は優れていると言えよう。

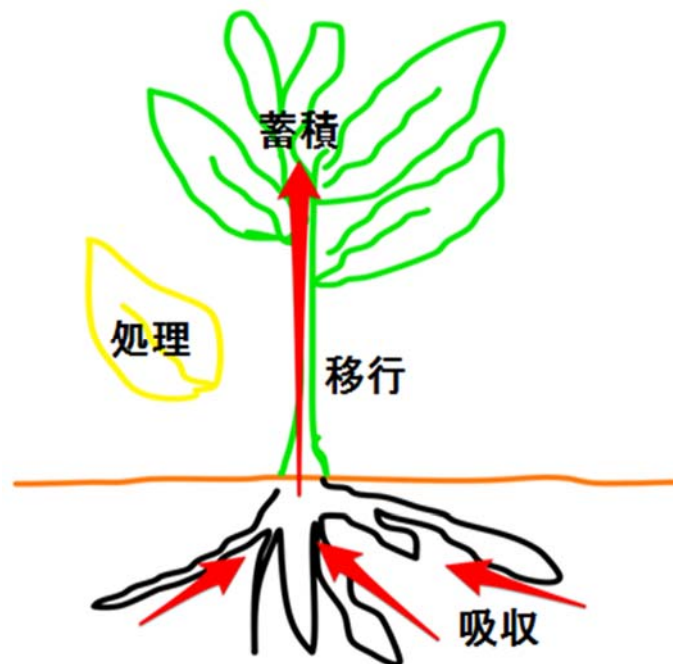


図1 ファイトレメディエーション概要 簡略図

ファイトレメディエーションの利点として最もよくあげられるのは、コストの面である(表1)。ファイトレメディエーションは他の物理化学的手法と比べ低コストで浄化を行うことができる。そのほかにも、植物を植えることで景観が良くなり人々にリラックス効果を与える、さらに汚染土壌を移動することなく処理することができるのでさらなる汚染リスクを回避することができるなどといった利点をこの方法には含まれている。

しかしファイトレメディエーションは同時に数々の欠点も有している。まず、吸収した植物体の処理である。吸収した植物を燃やして灰にするには専用の施設が必要になり、また処理する面積が大きければ大きいほど処理に手間と労力がかかってしまう。次に、吸収

量が年間において安定しないことや、効果が得られる面積には限界があることである。植物の汚染物質の吸収量は、気候などに応じて変動するため、安定した成績を得ることが難しい。ほかには、効果をすぐに得ることが難しいことや、根の届く範囲でしか効果が得られない（小さい植物では効果を得にくい）ことが挙げられる。

バイオレメディエーションは、ファイトレメディエーション同様低コストで広範囲に及ぶ汚染の浄化、原位置での浄化、操業中での浄化が可能である。また常温・常圧のためエネルギーをあまり必要としないので、浄化に伴う負荷が小さいことが挙げられる。バイオレメディエーションにもデメリットはあり、ファイトレメディエーションと同じく、結果の不安定さや時間がかかること、さらに天候に左右されることなどが挙げられる。

現在そして将来の土壤汚染除去に対しては、エネルギー投入量が少なく、環境に優しい方法が求められている。さらに、低コストで二次汚染リスクが少ない方法も重要である。そこで今回私たちは、ファイトレメディエーションに焦点をあて、どんな状況においてファイトレメディエーションを使用できるかを確認すると同時に、今後ファイトレメディエーション技術の利用可能な範囲が拡大していくにはどのようにしていけばいいのかを模索していく。

表 1 土壤汚染処理技術の性能比較³

比較項目	ファイトレメディエーション	バイオレメディエーション	物理、化学的手法
対象物質	無機 有機	有機	無機 有機
コスト	安価	安価	高価
外部エネルギー	不要	不要	必要
浄化効率	低い	やや高い	高い
低濃度、広範囲汚染への適応	有効	有効	非効率
土壌性能の維持	しやすい	しやすい	難しい
外部環境の影響	大きい	やや大きい	小さい

2. 株式会社 フジタ見学について

株式会社フジタ技術センターは神奈川県厚木市にある会社で、主に建築、環境、土木をメインに研究開発を行っており、特に環境技術においては大気水質環境対策技術としてEAP (Earth Purifier System)、フェスタ工法 (FESTA Method) の研究を行なっている。今回私たちは、こちらの会社でファイトレメディエーションの研究を行なっている北島信行さんにお話を伺うとともに、センター内を見学させていただいた。エントランスには、ガラス張りの天井があり、アトリウムとなっている。正面には実験ヤードがあり、研究で使用する植物が育っていた。

フジタでは、低コストと低環境負荷をキーワードに研究を行なっている。研究に使用している植物は主にモエジマシダとハクサンハタザオの2つである。モエジマシダはヒ素を、またハクサンハタザオはカドミウムという汚染物質を非常に高濃度で吸収・蓄積する能力を持っており、この2つの植物は「超集積植物」として注目を集めている。根から吸収された汚染物質は茎を移行し、やがて葉に蓄積される。刈り取った植物は廃棄物として燃やされ、灰として処分される。現在、鉱山廃水の影響をうけて、土壌中のヒ素濃度やカドミウムが高いことが問題である。そこで、農用地への対策と併せて発生源への対応が望まれる。つまり、廃水処理を対象とした適用拡大が望まれている。さらにコストのかからない対処法が求められている。

フジタにおける汚染物質の吸収の成果としては、若干年ごとでリバウンドが見られるが4年間通して汚染物質の量が減った。モエジマシダを使用した実験では、刈取り量とヒ素除去量が比例していることから、確かにこの植物が土壌中のヒ素を除去していることが確認された。

超集積植物を活用した水質浄化の研究では、自然界の浄化能力を活用し、水質改善を図っている。商業レベルで使用できるようなものが理想であるという。ただ植物を利用した除去を行うのではなく、物理的・化学的処理をはさむことが有効であるようだ。前処理をしてからその後に生物処理をすることで、除去量はかなり変わる。また、土壌のpHが低い場合があるので中和沈殿する効果や、重金属を処理する効果がある。ただファイトレメディエーションだけを行うのではなく、様々な組み合わせで処理することが大切である。さらにファイトレメディエーションで大切なことは、植物と重金属との接触の機会を増やすことである。そして、大きく、根がある植物が理想的である。今後は、安定した量を吸収できるようにすることが目標であるとお話ししていた。また、土壌汚染対策法にのっとり基準値をクリアすることが最終目標であると仰っていた。

今回、実際にファイトレメディエーションの研究を行っている方にお話を聞き、さらに実際の実験ヤードを見学することができてとても勉強になったとともに、今後ファイトレメディエーションがどのようにあるべきか、普及発展していくべきか具体的に考えるきっかけをみつけることができた。



図 4 株式会社 フジタ技術センター
(http://www.fujita.co.jp/tech_center/)

3. 現状の問題点

現在の土壌は、特定の土地利用に限定されず様々な土地利用において汚染が確認されている。しかし、それらの中で今回我々が注力して取り組みたい場所は、日本国内における水田や畑等の農用地と、休廃止した鉱山である。もちろん世界各地の土壌汚染問題を解決の道を描くことが理想ではあるが、まずはアクセスできる情報が一定量存在する国内の問題に対してアプローチして、それを応用する形で徐々に適用できる場所を世界に広げていきたい。

農用地と鉱山跡地を選んだ理由は、後述するが農用地に対しては厳しい時間的制約、休廃止鉱山に対しては財政負担があり、ほかの土地よりも迅速な対応が必要とされるためである。国の基準としては、高度成長期時代のイタイタイ病の発生を受けて、公害対策基本法（現行環境基本法）に土壌汚染が追加されたほか、1970年に農用地土壌汚染防止法（農用地の土壌の汚染防止等に関する法律）が制定された。これは、汚染された農地で栽培した農作物の汚染に由来する健康被害を防止することを目的としたもので、カドミウム、銅、および砒素を対象にしている。しかし現在の土壌汚染状況を見ると、多くの地域で基準値を超えた汚染物質が確認されており、4、対処すべき土地がきわめて多く存在することも、今回これらの土地を選択した理由である。またその他の理由として、農用地および休廃止鉱山におけるこの技術の適用可能性が見込まれるためである。汚染物質として挙げられているものに関して、何れも土壌中から吸収する植物は発見されており、技術も研究が進んでいるため、これらは適用可能土地であると考えられる。

さらに物質的な適用可能性だけでなく、経済的な適合性もある。現行法である盛り土などの物理的手法、また薬品を用いた化学的手法などは、前述の通り、より短期間で効果を得ることができるものの、莫大な費用がかかる。汚染土壌たる農用地や休廃止鉱山を管理する農家や自治体が、それに対するコストを抑えたいと考えるのは自然であろう。

以下、表2を参考にそれぞれの土地に対する汚染問題と除去に対する課題をより詳細に提示する。農用地は、カドミウム、放射性物質、ヒ素という有害物質の問題がある。消費者は農地で有害物質を吸収してしまった作物を食べようとはしない。つまり、土壌汚染や作物への汚染物質の集積が国の定める基準値を超えた場合、出荷すらできない状況に陥る。そのため、土壌中に汚染物質が蓄積されないよう予防することには意義がある。農用地は個々の対象範囲は比較的小さいものの、極力短期間で行わなければならないという時間的制約がある。なぜならば、その畑に対してファイトレメディエーションを行う期間中は、作物を育てられずその土地を持つ農家が収入を得られないためである。

一方、休廃止鉱山には主にカドミウム、ヒ素、銅という有害物質の問題があり、これが坑廃水に溶け込んでしまうのが問題である。また、現状では休廃止鉱山の1/3には義務者である責任企業、すなわちその鉱山を開発していた企業がおらず、鉱山の属する自治体が責任者となっている。鉱山跡地ではその汚染度の高さ、地形条件ゆえに作物は育てられず、放棄され今後の用途も存在しないため、ただ汚染物質を垂れ流すだけの存在となり、非常に大きな問題である。そのため、自治体や企業の財政的負担から、なかなか除去が進んでいないという現状がある。もしこの土地に低コストを利点とするファイトレメディエーションによる浄化を適応できれば、汚染水の問題の改善に加え、対象地の緑化および自治体や企業の財政負担の軽減といった副次的な利益も期待される。鉱山に対しては対象となる土地面積は広大である。また鉱山跡地では一般に作物を育てることもなく新たな土地利用も行われないため時間的制約はないものの、物理、化学的手法ほどではないものの管理の

面で金銭的に大きな問題を抱えている。

以上で述べたように、コスト面で優れるファイトレメディエーションは、農用地や休廃止鉱山に対して一定の浄化が期待できる。しかしながら、直面する課題のため実行に移されていないのが現状だ。そこで、次章ではファイトレメディエーションの利点を保ちつつも、この手法の抱える浄化に要する期間の長さや浄化効率の不安定性といった課題をどのようにして改善し、今後の利用可能性の拡大につなげていけるかを考える。

表 2 対象地とその特徴

対象地	汚染物質	対象範囲	浄化に要する期間
農用地	カドミウム, ヒ素, 放射性物質	狭い	短い
休廃止鉱山	カドミウム, ヒ素, 銅	広い	長い

4. 今後の方向性

本章では、はじめに全体的な土壌浄化の方向性を示した後、それぞれの植物の持つポテンシャルを検討し、それらを用いた際に期待される効果を推定する、という流れで説明しようと思う。

まずは農用地に対しての施策を考える。農用地において重要視すべき点は、収入を変化させないことであり、換金作物を栽培していない期間にできるだけ有害物質の除去に取り組むことである。したがって、夏に換金作物を栽培している農用地では、冬にカドミウムを吸収する大根または里芋を植える。冬にヒ素を吸収する作物が現段階では見つからないため、ヒ素吸収については今回考慮しないこととする。冬に換金作物を栽培している農用地では、夏にヒ素を吸収するモエジマシダとカドミウムを吸収するハクサンハタザオを植える。こうして収入源を減らすことなく、有害物質が高濃度になることを予防する。

次に鉱山に対しての施策を考える。鉱山は先述した通り時間的制約がないため、バイオマス量が大きく、有害物質の吸収量が大きい樹木を中心に施策の方向性を考える。私たちの一つの案としては、モエジマシダとヤナギ、さらに微生物という組み合わせによる浄化方法である。表 3 よりモエジマシダ(*Pteris vittata* L.)はヒ素を吸収して、ヤナギ(*Salix* spp.)はカドミウムを吸収する。ヤナギは根が深くまで伸び、またバイオマス量も大きいいため吸収する量が多い。モエジマシダは陰性植物であるため、ヤナギの木陰で日射量が少ない場所でも生育することができ、同時期にヒ素もカドミウムも吸収できる。さらに微生物を使用することでファイトレメディエーションの効果を増大させるという方法をとる。

表 3 植物種とその特徴

植物種	吸収物質	植物の分類	生育期間
モエジマシダ	ヒ素	多年草	5~11月
ハクサンハタザオ	カドミウム、亜鉛	多年草	9~5月
イタリアングラス	石油炭化水素、一般的な農薬の残留物	多年草	4~9月
ヒマワリ	鉛、カドミウム	一年草	5~9月
ダイコン：春のめぐみ(春)	カドミウム	一年草	3~7月
ダイコン：秋舞台(秋)	カドミウム	一年草	8~12月
カラシナ	鉛、カドミウム、セレン、亜鉛、水銀、銅、セシウム 137	一年草	春まき：3~6月 秋まき：9~2月
ミゾソバ	鉛、カドミウム	一年草	3~11月
ヤナギ	カドミウム、鉛、ニッケル	樹木	収穫サイクル：3年
ポプラ	トリクロロエチレン、四塩化炭素	樹木	収穫サイクル：3~4年
微生物	VOC		



図5 モエジマシダ(左)とハクサンハタザオ(右)

モエジマシダをファイトレメディエーションに応用した例は、フジタ技術センターにて北島さんらが行った研究にて報告されている。彼らの研究により、モエジマシダのバイオマスは年間 $1\sim 2\text{kg DW/m}^2$ であり、ヒ素を地上部の羽片(frond)に蓄積させることが分かっている。その濃度は実験室レベルでは最大 20g/kg DW を超えている。またモエジマシダは亜熱帯～熱帯の植物であるが、実際に寒冷地である東北地方の宮城県でも最大 0.8 kg DW/m^2 のバイオマス(5月から11月まで)が得られ、モエジマシダによるファイトレメディエーションが東北地方までも適用可能であることを示している(井上ら、2014)。

その一方で、海外の ANSWER プログラム(agricultural need for sustainable willow effluent recycling program)ではヤナギの短伐期萌芽更新(Short Rotation Coppice, SRC)について研究報告があり、ヤナギは年間 10t/ha のバイオマスが得られる(McCracken et al. 2014)。一年生草本類をファイトレメディエーションに用いる場合は、播種や収穫の回数が増え、手間がかかってしまうが、樹木の場合は一度植樹すれば、非常に再生力が強いいため、伐採をしても切り株から萌芽が発生するため、以後の作業が少なく済む利点がある。

またこれらの集積植物の能力を高める手段として、根圏微生物の併用も有効であると考えられる。微生物の中の植物成長促進根圏微生物(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)という微生物の種類が植物の生育を促進することができ、バイオマスの増加や根の伸張も促進することがわかっているのでその種類を併用する。さらに、植物成長促進根圏微生物は土壌の中の重金属を可溶化することもでき、植物が土壌から重金属の吸収量も増加することによって、ファイトレメディエーションの効果を向上させることができる。色々な植物成長促進根圏微生物(*Pseudomonas*、*Janthinobacterium*、*Serratia*、*Flavobacterium*、*Streptomyces*、*Agromyces* など)の中から、*Agromyces* の *Agromyces* sp. AR33 が最もサルヤナギ(*Salix caprea*)にふさわしい植物成長促進根圏微生物であると報告されている。バイオマスを増加させることにより、サルヤナギのカドミウム、亜鉛の吸収量が約 2 倍になった(Kuffner et al. 2008)という報告もあり、こうした微生物の利用は今後のファイトレメディエーションにおいても積極的に用いられていく可能性は大いにある。

その他の植物成長促進根圏微生物を用いた例としては、ポプラと一緒にファイトレメディエーションを行った研究が報告されている。この実験ではヒ素汚染の土壌から、

ヒ素耐性の菌株である植物成長促進根圏微生物の一種の *Agrobacterium radiobacter* が単離されて、D14 と名付けられた。ポット実験で、ポプラ単体だけと D14 を接種したポプラ(*Populus deltoides* LH05-17)のヒ素吸収効率を比較すると、43%から 54%となり、約 1.25 倍に吸収効率を向上させた。これは、茎や葉のヒ素集積率が 1.13 倍、2.91 倍増加することによって、回収できる量が増えたことによるものである(Wang *et al.* 2011)。

植物の処理方法については、蓄積した植物の金属を回収することができればリサイクルに役立てることができる。しかし、処理施設に関しては目処が立っていない。かつては電池などに多く使われていたカドミウムだが、近年人体への配慮として使用料は激減しており、処理回収のもたらす便益が縮小していることが原因であろう。

次にこれらのデータをもとに試算を行う。

農用地に関しては、カドミウム被害の多くはコメである。水管理によってカドミウム濃度を減らすと、ヒ素濃度が上昇するというトレードオフの関係である。したがって玄米中のカドミウムとヒ素の濃度を下げるにはファイトレメディエーションをしなければならない。2ppm で玄米中の平均濃度が基準値を超えると推算され、コメの根の深さを 20cm と仮定したとき、その土壤に含まれるカドミウム量は 6000g/ha と試算される。ハクサンハタザオによるカドミウムの吸収量は 3000g/ha であり、ファイトレメディエーションが有効であると考えられる。大根の吸収量は 10g/ha であり、吸収量は少ない。野菜でもカドミウム吸収はあるので冬に換金作物を栽培しているときでもファイトレメディエーションをする意義はある。しかしコメのカドミウム吸収を抑えるには冬にファイトレメディエーションをするのでは吸収量が足りないのでは有意義ではない。したがって、一年作付をしないか、冬にファイトレメディエーションをする意義のある高集積植物の開発が必要である。モエジマシダによるヒ素の吸収量は 4400g/ha であるが、ヒ素に関してはどのくらい汚染されているかのデータが見つからなかった。定量的数字はなく議論はできないが、ヒ素はコメからの摂取よりも海洋物からの摂取が多いため、廃水から海に流れることを考慮するとやる意義はある。農研機構によると (<http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouthou/H17/seisan/h17seisan10.html>)ソルガムのファイトレメディエーションの費用は稲作機会費用を含めると、年間 200 万/ha である。稲作機会費用を含めないと年間 150 万/ha である。農家の面積平均は 2ha であるため、冬にファイトレメディエーションをする場合は、年間 300 万/ha かかり、夏に稲作をやめて 400 万/ha かかると計算できる。この費用の捻出については今のところ国の補助金という考えしか出てこないが、外部経済的付加価値が付くアイデアが存在すればファイトレメディエーションの利用可能性が上昇すると考えられる。今回はソルガムのデータで試算しているが、換金作物を栽培していない時期に対応している植物で同じ量を吸収するものがあればよいと考えられる。

以下、休廃止鉱山における除染を表 4 を参考にして計算していく。休廃止鉱山における土壤中のカドミウムの目標基準値は 0.2mg/kg (土壤 1kg 中に 0.2mg のカドミウムが含まれるの意)、ヒ素は 150mg/kg である。この目標値は、カドミウムに対しては現行法の化学物理的手法である土壤洗浄を行った際に想定される値、ヒ素に対しては現在国の定める環境基準値である。また、現在の汚染レベルは、先行研究によると、鉱山 0.5km 圏内のカドミウム含有量は約 10mg/kg、ヒ素は約 2000mg/kg と報告されており^{5,6}、土壤洗浄による浄化を行う際の費用は、深さ 20cm の場合、約 8 億円/ha と推定される⁸。

今回の試算に用いる植物について考える。植物体への重金属の吸収量は、植物体の体積すなわちバイオマスの大きさと、植物体中に集積する濃度との積で表わされる。候補として挙げたのはハクサンハタザオやモエジマシダといった超高濃度集積植物と、ヤナギやポプラといったバイオマスの大きい木本類であるが、我々は前者を選んだ。一部の木本類は土壌中の重金属を蓄積するという報告がなされてはいるものの、面積当たりの収量という観点では10~10²程度のオーダーで超集積植物に遠く及ばず、現状では実用性は低いと考えられたためである。

ハクサンハタザオのCd吸収量とモエジマシダのAs吸収量はそれぞれ3kg/ha、400kg/haである。それぞれの根の長さは30cm強であるが、根の大半が20~25cmまでの範囲に留まるため、今回は20cmとして試算を行う。さらに土の比重を1.5と仮定すると、1ha辺りの土壌の重量は30000tとなる。この土壌中のカドミウムおよびヒ素濃度を現状の値から目標値まで低減するのに上記の植物を使用した場合、要する年数はそれぞれ9.8年および13.9年である。つまり、両者を目標値以下まで除去するのにかかる合計年数は23.7年となり、通常30年~40年以上を考慮して計画されるファイトレメディエーションと比較した場合、大幅な時間の短縮が予想される。加えて、上述した根圏微生物を併用することでこの値はさらに改善されることも期待される。

またこれを行った際のコストについて比較を行う。ハクサンハタザオやモエジマシダを用いて除去を行う際にかかる費用は、農用地の除染活動費用から稲作機会費用を除いた年間150万円/haである。これを23.7年継続した場合、総費用は3550万円となった。一方、比較対象として物理的手法の代表的なものとして土壌洗浄法を用いた際の試算を行うと、同じ体積の土壌から除染を行うための総費用は8億円/haとなる。つまり、今回我々の考えるファイトレメディエーション除染方法によって面積当たりの費用は20分の1未満に抑えられることが分かった。

表4 鉱山に対するファイトレメディエーション効果の試算

	集積物質	年間蓄積可能量(kg/ha)	depth of root(m)	density of soil(kg/m ³)	weight of soil(kg/ha)	ppm of contaminant soil(mg/kg)	目標値(mg/kg)	必要除去量(kg/ha)	必要年数
ハクサンハタザオ	Cd	3	0.2	1500	3000000	10	0.2	29.4	9.8
モエジマシダ	As	400	0.2	1500	3000000	2000	150	5550	13.9

最後に、我々の将来的な展望を示して本章を締めたい。我々はこれまで述べてきた現在までのファイトレメディエーションは、高い効果を認めることはできるが除染機関の長期化などの問題は完全にはぬぐい去れず、また超高濃度汚染土壌への適応が困難であるなど、同時に限界も感じている。そこでそうした課題を乗り越えるべく、長期的には新規作物の開発にも取り組むべきであると考えている。

農用地の施策でも述べたが、冬季にヒ素を吸収する植物で十分な浄化能力をもつ植物種

が発見されていないため、その植物が必要になる。さらに農用地では多年草を用いた場合換金作物に影響を与える可能性が高いため、多年草を用いることは避けたいが、ヒ素を吸収する種が現段階では多年草のみであるため、ヒ素を吸収する一年草の植物の開発も必要である。また、現段階では高集積植物の中にはバイオマス量が少なく、結果として有害物質の吸収量が少なくなってしまうものが存在したり、植物全体として環境に左右されたり、集積できる物質に制限があったりなどの欠点が生じている。

したがって、高集積植物でバイオマス量が大きく様々な有害物質を吸収できる植物の開発が必要であり、それに加え環境に対して影響をほとんど受けずに成長できる植物を開発することが出来れば、今後ファイトレメディエーションの利用可能性が拡大していくだろう。そのために、超集積植物を超集積植物たらしめている遺伝子群の同定や、それを基にし集積耐性やトランスポーター強化、肥大化遺伝子の挿入等の行われた新しい植物の開発をはじめとした研究がさらに前進することが望まれ、企業研究・学問研究ともに長期的な視点を以てこの問題に取り組む姿勢が今後必要になってくるのではないだろうか。ファイトレメディエーションを実際に成功させた海外の研究成果およびその背景などを今後さらに調べることにより、この問題に対してまた新たな知見が得られるかもしれない。

5. 謝辞

本調査を進めるにあたり、ご指導を頂いた株式会社フジタ技術センター 北島信行先生
および農学国際専攻 地球生物環境学講座 新機能植物開発学研究室 中西啓仁先生に心
より厚く深謝いたします。

6. 参考文献

1. 「土壌汚染の特徴」
<<https://www.env.go.jp/water/dojo/guide/pdf/mat01.pdf>>
(2017/01/19 アクセス)
2. 吉田 光毅・秋吉 美穂・藤原 靖 (2005)
「ファイトレメディエーションの現状と課題」 (大成建築技術センター報 第 38 号)
<http://www.taisei.co.jp/giken/report/01_2005_38/paper/A038_006.pdf>
(2016/12/30 アクセス)
3. 王 効挙・李 法雲・杉崎 三男 (2004)
「ファイトレメディエーションによる土壌汚染修復の現状と展望」 (全国環境研会誌 Vol. 29 No.2)
<http://tenbou.nies.go.jp/science/institute/region/journal/JELA_2902013_2004.pdf>
(2017/01/05 アクセス)
4. 「農用地土壌汚染防止対策の概要」 (2003)
<https://www.env.go.jp/water/dojo/nouyo/gaiyo_h14.pdf>
(2017/01/05 アクセス)
5. 服部 拓生・西村直正 「鉱山由来の重金属による中山間地の土壌汚染に関する研究」
<https://js-soilphysics.com/data/symposiums_posters/poster_55_90009058.pdf>
(2017/01/05 アクセス)
6. 堀 孝太郎・榊原 正幸・世良 耕一郎 (2012)
「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」 (NMCC 共同利用研究成果報文集 19)
<https://www.jrias.or.jp/report/pdf/2012_J1.2.19.pdf>
(2017/01/05 アクセス)
7. 「浄化・対策工法 比較表」
<<http://www.chugai-tec.co.jp/kankyo/pdf/cleanup.pdf>>
(2017/01/05 アクセス)