

# 植物を用いた環境汚染の浄化の研究

東北学院大学工学部 遠藤銀朗研究室

## 1. 地震・津波被災によるヒ素汚染土壌の植物による浄化技術の開発

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波によってもたらされた東日本大震災は、東北地方の太平洋岸域を中心に局地的および広域的な無機化合物による環境汚染を引き起こしました。この大震災による局地的汚染の代表的例としては、宮城県気仙沼市の旧大谷鉱山鉱滓堆積場崩落地域における高濃度ヒ素汚染を挙げることができます。この旧大谷鉱山の鉱滓堆積場崩落現場では、200mg/kgのヒ素を含む4万立米の流出鉱滓によって約5ヘクタールの土地が汚染されました。また、津波侵入地域の農地や住宅地等に流入し堆積した土砂・ヘドロ等は、海湾底泥、河口底泥、干潟底泥、運河底泥などを大量に含み、そのような底泥には少なからず重金属やヒ素等の有害無機化合物が含まれていました。津波浸水農地だけを見ても、岩手県・宮城県・福島県の合計で合計面積が22,763ヘクタールに及ぶことから推定して、ヒ素、カドミウム、鉛などの有害無機化合物によって津波被災前よりも汚染されたと考えられる津波被災農地は、少なくとも数十ヘクタール以上、比較的軽度な汚染を含めれば数千ヘクタールにのぼるとみなされます。

このような地震および津波による土壌汚染をどのような技術を適用して復旧するかは、今回の東日本大震災からの復興に必要と言うだけでなく、今後も起こりうる自然災害による環境汚染の修復に有効に役立つ技術を確認しておく点からも必要と考えられます。通常は、人為的な重金属等の有害無機化合物による土壌汚染は、比較的限定された面積と影響範囲（深さ等）であることから、汚染土壌の撤去と隔離処分および客土などの物理的方法によって処置されてきました。しかし、今回の津波被災によるような自然的要因での大規模かつ広域に及ぶ環境汚染に対しては、その復旧に掛かるコストや労力などの点からこれまでの方法とは異なる新しい対処技術が必要と考えられます。また、津波がもたらした海水塩分による土壌被害（いわゆる塩害）とは違って、陸上部に流入したヘドロ等に含まれる有害無機化合物は一般に底質粒子や土壌粒子に強固に結合して残留し続けることから、淡水洗浄等では容易に除去することはできません。したがって、このような環境汚染に対応するための特別な処理法が必要と考えられるが、そのための一つの有効な方法として生物の代謝能力を活用して汚染を浄化するバイオレメディエーションの適用を検討することは意味があると考えられます。

当研究室では、今回の津波によって発生した環境汚染のうち、特に海底から陸上に押し上げられたヒ素による環境汚染をどのように修復するかについて取り組んできました。ヒ素による環境汚染の発生メカニズムや自然界や生態系におけるその浄化のメカニズムは、図-1のように模式的に示すことができます。

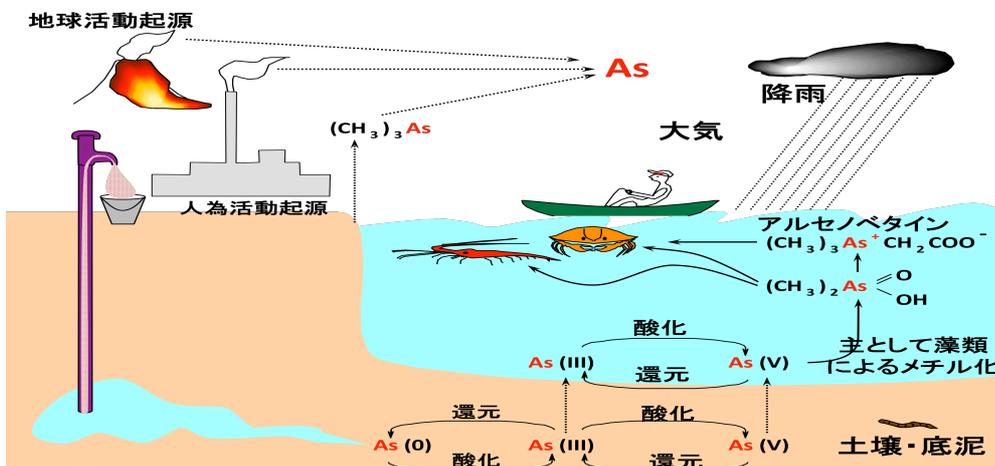


図-1 ヒ素による環境汚染おメカニズムと環境におけるヒ素の循環

## バイオメディエーション技術とは

近年、特定の環境（特に土壌および地下水）が有害物質（特に、重金属、有機塩素化合物や石油成分など）によって汚染されていることが顕在化してきたことをきっかけとして、エネルギー投入量が少ない経済的な環境浄化方法でかつ二次廃棄物を発生させずに最終的で恒久的な浄化が達成できる生物処理技術として、バイオレメディエーション技術に関する研究と開発がすすめられてきています。バイオレメディエーションには、図-1 に示したように主として2つの方法があります。また、大きく分けて汚染現場を必要な生物等を現場に直接投入して直接浄化する原位地（in situ）バイオレメディエーションと、汚染土壌等を採掘運搬し洗浄プロセスとバイオリクタープロセスとを組み合わせ浄化するオンサイト（on site）バイオレメディエーションとに分けることができます。

## バイオレメディエーション

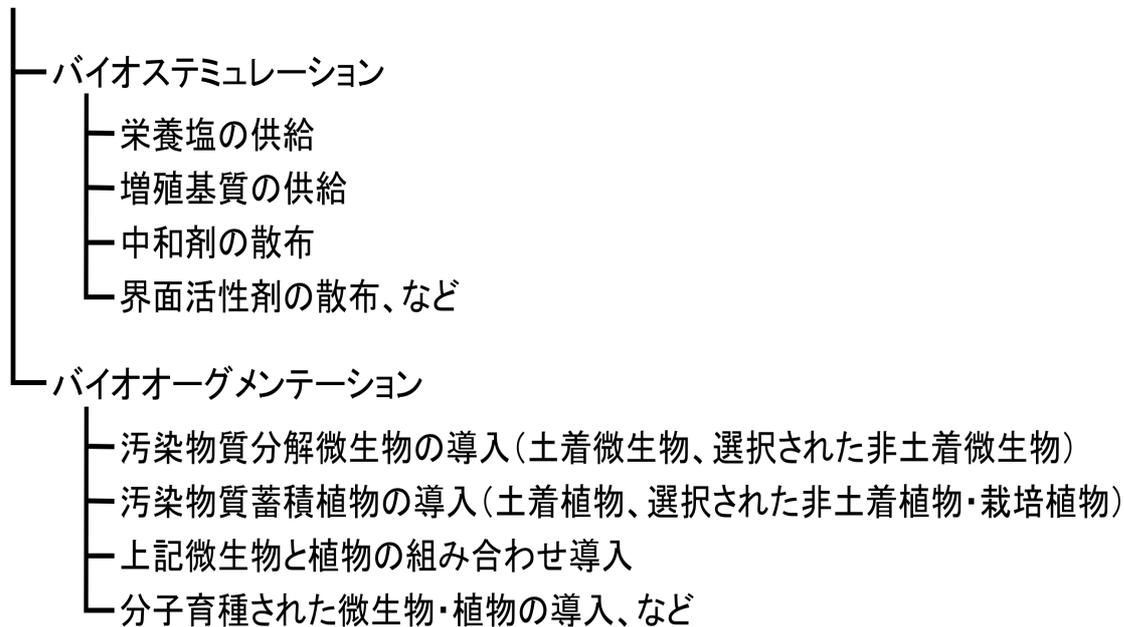


図-2 バイオレメディエーションのタイプと概要

バイオレメディエーションは、概略として次のような手順によって環境浄化事業に適用されています。

- (1) 汚染現況の調査
- (2) 汚染物質除去・分解に有効な生物の存在確認（必要に応じて、探索、分離、育種、培養・栽培技術の確立）
- (3) 室内における汚染環境試料を用いた汚染物質の分解又は除去試験
- (4) 生物分解活性又は除去活性の促進物質および阻害物質の把握、促進物質使用の最適条件等の検討
- (5) 現場処理事業の計画と設計および浄化に必要な時間およびコストの算定
- (6) 汚染現場の浄化に必要な機材・材料の調達
- (7) バイオレメディエーションによる浄化事業の実施
- (8) バイオレメディエーション実施後の環境モニタリング(浄化効果の評価と残留生物および既存現場生態系および周辺生態系への影響評価)

## ファイトレメディエーションの考え方

汚染土壌のバイオレメディエーション技術は、土壌から汚染物質を有効に除去する微生物または植物を用いてな

される環境浄化技術である。特に、環境汚染物質が有害無機化合物である場合には、対象となる汚染物質元素自体を何らかの方法によって汚染環境から除去することが必要とされるケースがほとんどです。また、単位土壌面積あたりの生物体重量が多いほどそれらの除去効率は高いものになります。したがって、この場合には、単位土壌面積あたりの生物体重量をより多く得られるものとして微生物よりも植物を用いることが一般的に有利であると考えられます。このように植物を用いて行うバイオレメディエーションを、特にファイトレメディエーションと呼んでいる。除去対象となる汚染無機物の特性および用いる浄化植物の特性に応じて、有害無機物による汚染環境のファイトレメディエーションは主として以下の2つのタイプに分類されます。

### (1) ファイトエキストラクションによる土壌浄化

ファイトエキストラクションは、特定の有害物質を高濃度に蓄積しても枯れることのない有害物質に耐性を示す植物を用いてなされる。汚染された土壌においてこのような植物を栽培するまたは繁茂させることによって、土壌中に存在する有害物質を植物体に吸収させて植物体に高濃度に蓄積させ、その後に汚染物質を高濃度に蓄積した植物体を刈り取って植物体ごと除去することによって土壌を浄化する方法です。土壌中に存在する有害無機物を除去するためにバイオレメディエーションを適用する場合の単位土壌面積あたりの除去量は、次式によって決定されます。

$$\text{有害無機物除去量 (mg/m}^2\text{)} = \text{生物体中の有害無機物濃度 (mg/kg)} \times \text{生物体重量 (kg/m}^2\text{)}$$

したがって、生物体中の有害無機物濃度が高いほど、また単位土壌面積あたりの生物体重量が多いほどその除去効率は高いものになります。この場合には、単位土壌面積あたりの生物体重量をより多く獲得できるものとして微生物よりも植物を用いることが一般的に有利と考えられます。また、その際に、土壌中よりも高濃度に特定の有害無機物を蓄積することができるいわゆるハイパーアキュムレーター植物を用いることが有利となります。このために、特殊な蓄積能力をもつ植物でかつバイオマス生産量の高い植物を探索することと、一般的な植物よりもより高濃度に有害無機物をちくせきできるハイパーアキュムレーター植物を栽培植物として扱えるようにする（播種や育苗による植栽や施肥や除草剤等の使用による選択的に生育させる技術を確立する）ことが必要です。

### (2) ファイトボラティリゼーションによる土壌浄化

ある種の無機物には元素化やメチル化などによって揮発性物質に変化されるものがあります。そのような特性を持つ有害無機物に対しては、限定された面積や濃度の汚染土壌を浄化するためにファイトボラティリゼーション技術の適用を検討することができます。ファイトボラティリゼーションは、植物が有害物質を吸収すると共に、それを気化可能な化合物や元素に変換し植物体から大気にこれら物質を気化放出することによって、結果的にそれらの有害物質を土壌から除去する浄化技術です。

そのような方法の適用が可能な例として、水銀化合物を金属水銀に変換する能力を持つ植物または変換能力を付与した植物を用いて、植物体に吸収させた水銀化合物をさらに水銀蒸気として気化放出させて除去する方法があります。また、ヒ素のメチル化機能を持つ植物を用いてアルシン等の揮発性の有機ヒ素化合物に変換して土壌中の無機ヒ素化合物を気化放出させて除去する方法なども検討されています。

### (3) その他のファイトレメディエーション技術

上記2つのファイトレメディエーション技術以外にも、植物を使う土壌浄化方法としては、植物根圏における有害物質の分解や固定化を利用する方法が存在します。これらの方法は、通常は植物根圏微生物の生物変換機能や吸着機能等を活用したり促進したりすることを原理としています。しかし、有害無機化合物による土壌汚染のケースでは、最終的な汚染原因物質の除去という点では有効とは言えないことから、完全な土壌浄化のためのファイトレメディエーション技術としてこれらの方法が採用されることは稀と考えられます。

## モエジマシダによるヒ素汚染土壌のファイトエクストラクション処理技術の開発

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による環境汚染のうちヒ素化合物による広い面積に亘る土壌汚染を浄化するために適用できる可能性があります。その技術としての実効性の立証は、実際の汚染土壌におけるモエジマシダなどの植栽実験によって明らかにすることにしています。しかし、植物体に吸収・蓄積させたヒ素化合物を安全にかつ二次汚染問題を発生させることなく処理して最終処分するかという問題についても回答を得ておく必要があります。また、有害無機化合物高蓄積植物によって浄化する方法の費用対効果を明確にするだけでなく、一般に処理のために長期間が必要となるファイトレメディエーションの経済活動への影響を含む社会的評価を行うことも必要と考えられます。津波被災汚染環境の修復のための環境政策や災害復興政策に反映するためには、ファイトレメディエーションをよりトータルに研究し開発を行うことが求められます。今後も発生することを覚悟しなければならない大規模自然災害による広範囲環境汚染の復旧・復興に役立つ環境技術の選択肢を一つでも多く増やすことは、この度の大震災を経験した工学技術分野の研究者としての後世に残さなければならない重要な仕事であると思われま

## ヒ素汚染土壌のファイトレメディエーション

ヒ素汚染土壌のファイトレメディエーションに有効と考えられるヒ素化合物に対する耐性が高くかつヒ素を高濃度に蓄積できるヒ素ハイパーアキュムレーター植物として、シダ類のヘビノネゴザ(*Athyrium yokoscense*) およびモエジマシダ (*Pteris vittata*) がよく知られています。また、重金属やヒ酸イオンを結合させる植物タンパク質であるファイトケラチンやグルタチオンを比較的高含量に含む植物もヒ素の吸収と蓄積によるファイトレメディエーションに利用できると考えられています。さらには、遺伝子組み換えによってこれらのヒ素吸着物質を高発現させた形質転換植物も作られてきています。しかし、それらの植物が実際のヒ素汚染現場に適用可能かどうかは、現場の気候条件や土壌条件がそれらの植物の栽培に適しているかどうかによっても決定されます。

土壌汚染浄化の対象とするヒ素化合物は、通常ヒ素原子の酸化数が+3 価の亜ヒ酸イオンまたは+5 価のヒ酸イオンの無機ヒ素化合物として多く存在しています。また、ヒ素は地球環境において化学形態を変化させながら循環しており、その循環の様子を図-2に模式的に示します。したがって、土壌中に存在するヒ素の化学形態も、ヒ素汚染土壌のファイトレメディエーションにどのような植物（および、ヒ素の化学形態を変化させる微生物や他の薬品または触媒等との組み合わせ）が採用可能かどうかを決定する要素となります。

## モエジマシダによるヒ素汚染土壌のファイトエクストラクション処理技術の適用

シダ植物の中でも特に葉状体(shoot部)におけるヒ素蓄積能が高い種としてモエジマシダが知られており、乾燥重ベースで2%ものヒ素を蓄積する場合があります。このようなヒ素のハイパーアキュムレーターとしての能力を利用してヒ素汚染土壌をファイトエクストラクションにより浄化する研究が報告されています。モエジマシダを用いたヒ素汚染土壌のファイトエクストラクションによる浄化の工程を図-3に示します。

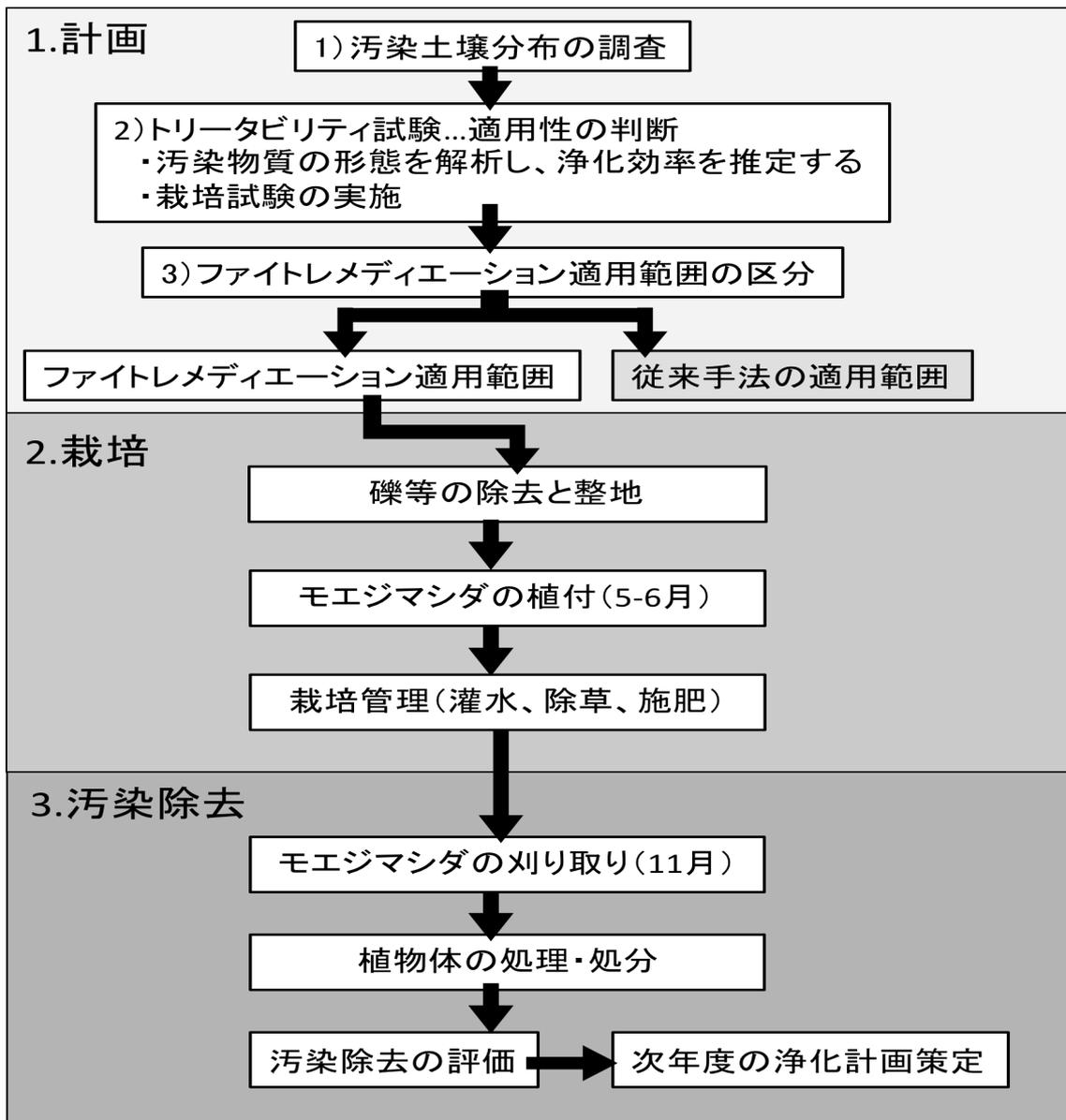


図-3 モエジマシダを用いたヒ素汚染土壌ファイトレメディエーション実施のプロセス

モエジマシダは亜熱帯性植物であることから、日本の近畿以北において自生することはなく寒冷地での越冬は期待できません。したがって、毎年苗を植え替えて成長させることによって浄化を行う必要があります。孢子からの育苗は室内や温室において冬期間からでも可能ですが、その育苗方法とプラグ苗植栽後の雑草の制御方法などがノウハウとして必要です。これまでの研究において、モエジマシダによるファイトエキストラクションによって除去できるヒ素の量は  $500 \text{ mg} \sim 1000 \text{ mg/m}^2$  と見積もられており、ヒ素汚染の程度が分かれば浄化の達成効率はおおよそ推定することが可能です。

#### 津波によるヒ素汚染土壌のモエジマシダによるファイトエキストラクション浄化処理

今回の津波による堆積物の厚さは、特別な条件の場所を除けば 30cm を超えるところは稀です。したがって、モエジマシダの根状体(root 部)の土壌中での深さ到達範囲であることから、ほとんどの津波堆積物中のヒ素を吸収させることは原理的には可能と考えられます。また、最近の研究によりモエジマシダは比較的高い濃度の塩分に耐え

て生育できることも分かってきた(データ未発表)ことから、この点での津波によるヒ素汚染土壌浄化への適用の可能性はあるように思われます。ただし、東日本大震災の被災地は主に東北地方の太平洋沿岸地域であり日本国内では比較的寒冷的な地域であることから、モエジマシダの生育とヒ素吸収・蓄積については被災現地における栽培実験によって確認する必要があります。

そこで、宮城県内の実際の津波によるヒ素汚染が発生した農地においてヒ素汚染土壌をモエジマシダによるファイトエクストラクションによって除去する以下のような研究を行いました。

宮城県気仙沼市の3ヶ所の圃場にモエジマシダを植生し、5月～11月の期間1ヶ月毎にモエジマシダを採取し、生育データ並びにヒ素蓄積量を測定しました。ヒ素蓄積量を調べるためにモエジマシダから検液を作製する。検液の作製法は、土壌から採取してきたモエジマシダをハサミで細かく切断し、切断したモエジマシダを80℃で2日間乾燥させました。乾燥させたモエジマシダをマイクロウェーブ処理システムにより溶解し、メスアップして40mlになるように調製してこれを検液として用いました。作製した検液を原子吸光光度計により測定し検液中のヒ素濃度からモエジマシダに含まれているヒ素含有量を求めました。

## この研究の成果

この研究で得られた成果は下記の通りでした。

ヒ素吸収蓄積の結果を図4～6に示します。これらの実験結果より、11月測定分を除いて、月が経つごとにモエジマシダ内部のヒ素蓄積量が増加したことが知られました。これにより、モエジマシダは成長するとともに土壌からヒ素を吸収していることが示唆されました。また、モエジマシダは7月から9月にかけて大きく成長しましたが、同時にその時期に採取したモエジマシダのヒ素蓄積量が急増しているため、成長に必要な栄養を土壌から吸収する際にヒ素も吸収すると考えられます。モエジマシダの最大ヒ素蓄積量は乾燥重量の2%であるので、ヒ素吸収量は更に体積の分だけ増加するのでヒ素汚染除去の効果は十分に高いと考えられました。

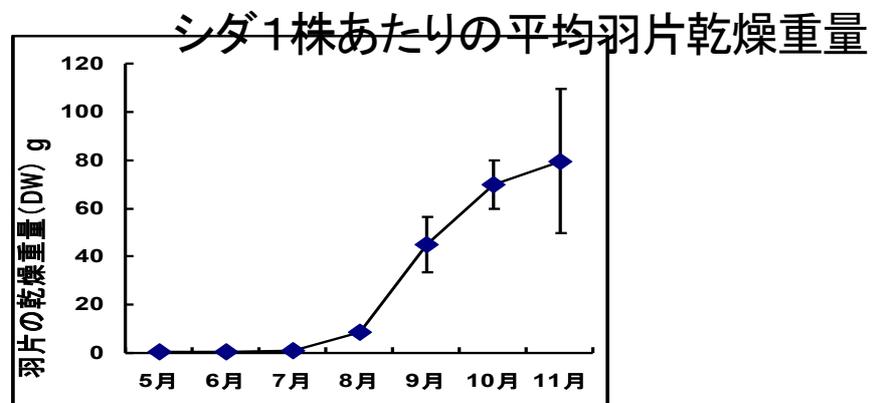


図4 モエジマシダの羽片バイオマスの経月変化

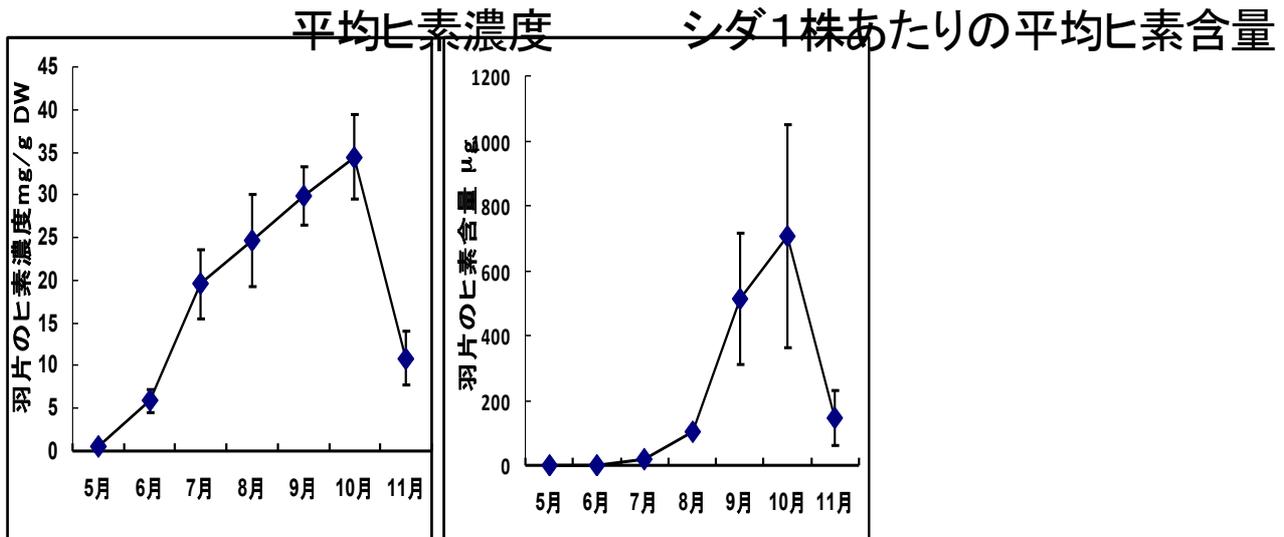


図-5 モエジマシダのヒ素蓄積量の経月変化

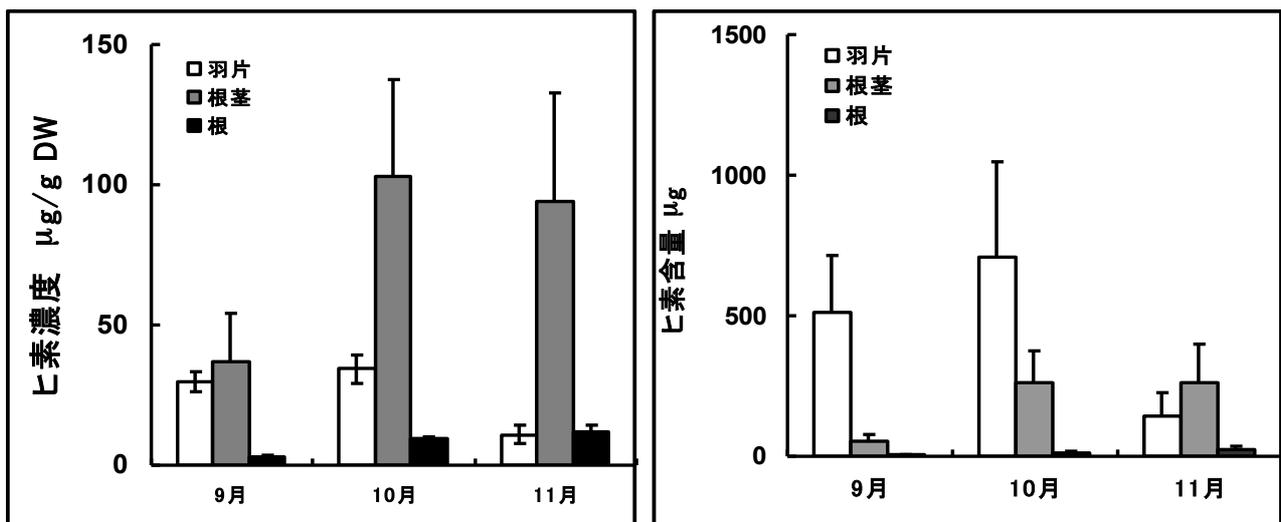


図-6モエジマシダの羽片・根茎・根のヒ素 (9月~11月)

## 2. アジアのヒ素汚染地下水の微生物と植物による浄化技術の開発

世界においてヒ素による環境汚染が特に深刻な問題となっているのは、地質学的要因によって地下水のヒ素汚染が広範囲に起こっている地域で、それらの地域としてよく知られているのが、ヒマラヤ山脈およびその支山脈であるホントワン山脈の南方・東南方に位置するインダス川流域（パキスタン）、ガンジス川デルタ（ベンガル地方）およびブラマプトラ川デルタ（主としてバングラデシュ南部）、エーヤワディー川流域（ミャンマー）、メコン川デルタ（カンボジアおよびベトナム）、ホン川流域（ベトナム）などです。これらの地域は、いずれも中生代後期の

造山活動によって形成された世界最大の山脈を有するヒマラヤ高地を源流とする大河の河口域です。また、上記ヒ素を含む大河デルタの土壌はフミン質等の有機物を含有することが多いことから、その地下水はほぼ無酸素の状態になっています。したがって、これらの土壌に含有されているヒ素の大部分は還元された亜ヒ酸の状態として存在しており、ヒ酸等よりも水に容易に溶出しかつ毒性の高い形態の亜ヒ酸イオンとして地下水中に高濃度に溶存しています。

国内外におけるこのような地下水のヒ素汚染は、環境問題としてだけでなく、民生の質的向上や産業の発展に必要な水資源問題としても解決が必要とされている重要な問題となっているのです。

## 研究の目的

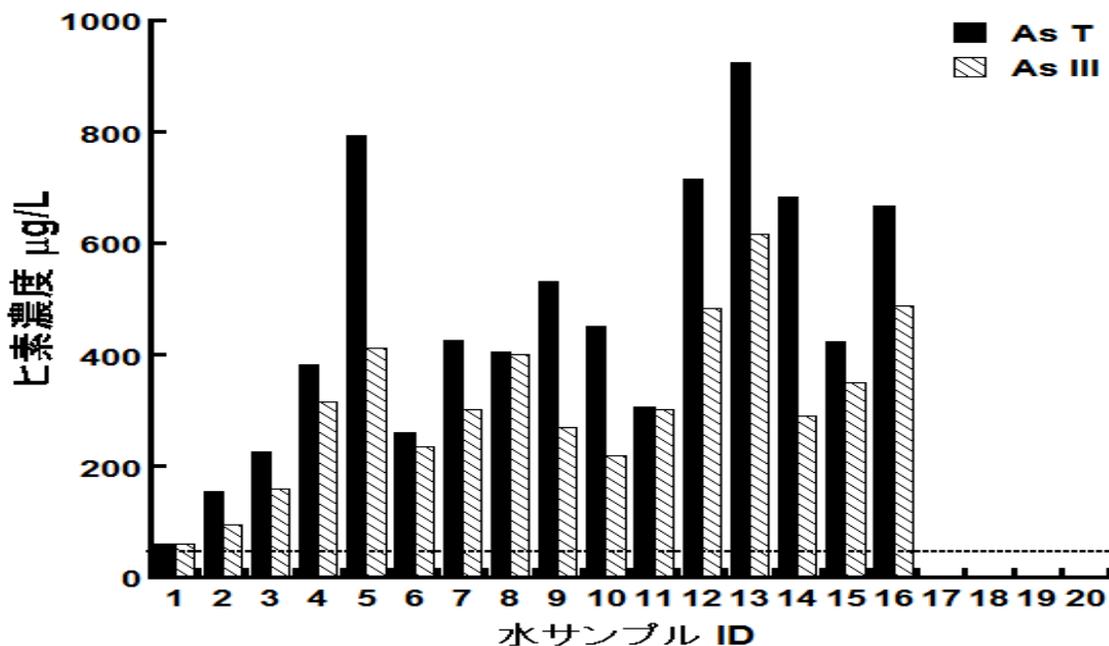
本研究の目的は、上記研究の背景に示した南アジアや東南アジア等の新興国や開発途上国においてヒ素を含む大量の地下水を生活用水や農業用水等として利用できるようにするために、効率的かつ経済的なヒ素除去技術を開発することです。現在のヒ素汚染水の浄化処理技術として、凝集剤を用いる凝集沈殿除去法と吸着剤を用いる吸着除去法が開発されていますが、凝集剤や吸着剤の使用は農業用水などのような大量の産業用地下水の処理には経済的ではありません。また、凝集沈殿除去法や吸着除去法では $10\mu\text{g/L}$ 以下のヒ素濃度基準を達成できないことも多いのです。

本研究では、途上国や新興国に適用可能なできるだけ化学薬品を用いない地下水からのヒ素除去技術を開発することを目的として、水中亜ヒ酸イオンのヒ酸イオンへの微生物酸化処理技術と、現地国に自生するヒ酸イオン高吸収植物の水耕栽培による地下水中ヒ素の高アフィニティー除去技術とを組み合わせ、現地国の経済状況に見合った低コストヒ素除去技術を開発することです。

## 研究結果の概要

### ベトナム・メコンデルタの地下水および地下水灌漑農地土壌のヒ素汚染調査の結果

ベトナム、マレーシアおよび台湾の東南アジアにおけるヒ素による地下水汚染およびその地下水利用による土壌汚染の実態を調査しました。特に、人口が急増しつつあるベトナム・メコンデルタ地方における地質学的要因等によって引き起こされた地下水ヒ素汚染を詳しく調査し結果は、図-7に示したようにその汚染が深刻なものであることを明らかにできた。また、そのヒ素含有地下水を灌漑農業用水に利用することによる土壌のヒ素汚染についても併せて調査し、ヒ素汚染地下水で灌漑されている農地土壌はそれ以外の河川水を用いる農地土壌に比較して有意にヒ素含有量が大きいことが知られました。



## 図7 メコンデルタ地域の地下水のヒ素濃度調査結果

これらの結果より、ベトナムのメコンデルタにおける地下水ヒ素汚染の実態を把握することができたとともに、地下水利用に伴う土壌汚染の実態についても把握することができました。

### 室内実験におけるヒ素高蓄積植物の水耕栽培によるヒ素汚染水からのヒ素除去実験の結果

ヒ素汚染を植物によって浄化することにより健康障害問題を解決するための技術的方法を開発することについて、ベトナムの低地から高地にかけて自生するシダ植物を採取し、そのバイオマス当たりのヒ素含量を調査した。その結果、*Pteris* 属のシダ植物はヒ素を高濃度で蓄積していることを明らかにすることができました。また、水耕栽培による地下水汚染ヒ素除去への適用性について検討したうえで、地下水汚染ヒ素の除去に適用するシダ類植物としてモエジマシダ(*Pteris vittata* L)を選定しました。また、国内実験として、モエジマシダの水耕栽培実験系を構築し、模擬ヒ素汚染水を用いた水耕栽培ヒ素除去実験を行いました。この実験の結果を図-8に示します。この結果から、モエジマシダの水耕栽培は可能であり、ヒ素濃度 1000 ppb の疑似ヒ素汚染水を2週間程度で環境基準値以下にすることが可能ということが知られました。生育環境により成長具合は変化するものの、モエジマシダは極端に劣悪な環境でない限り水耕栽培で十分に成長することから、様々な地下水の処理に適用できると考えられます。

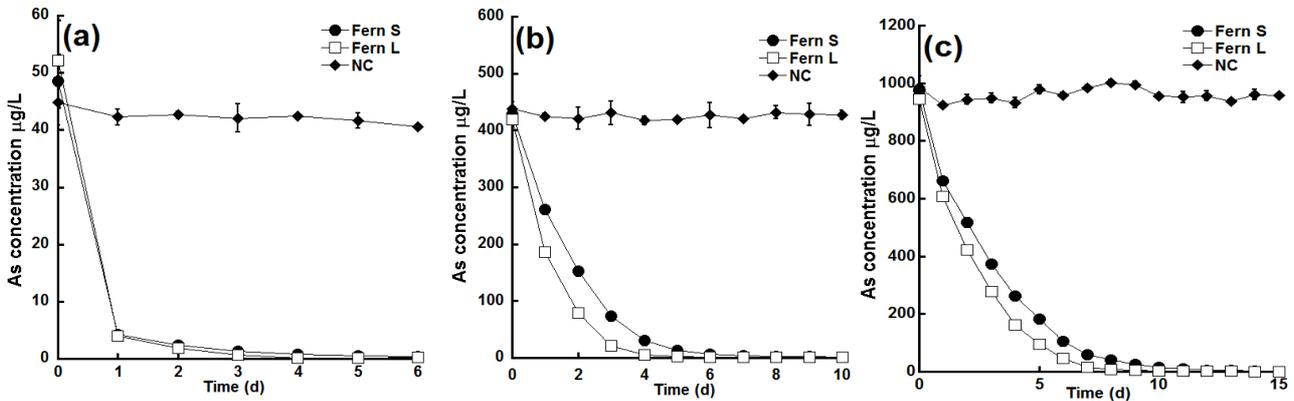


図8 水溶液中のヒ素除去室内実験の結果

### ベトナム・ホーチミ市における現地パイロットプラントによるヒ素汚染水からのヒ素除去実験の結果

ベトナム・ホーチミ市のNong Lam大学構内において、水耕栽培系によるヒ素除去の現地実験のための図-9に示したパイロットプラントを建設しました。この実験プラントを用いて模擬地下水からヒ素を除去するためのバッチ実験と連続実験を行いました。その結果を図-10に示します。この結果から、地下水中に約500 ppbの濃度で溶存している亜ヒ酸イオンのヒ酸イオンへの微生物酸化処理によって、高濃度(約20~30 ppm)で共存する第1鉄イオンの第2鉄イオンへの酸化も同時に起こり、鉄イオンとヒ酸イオンの水酸化物としての共沈により全ヒ素濃度はベトナムの農業用水基準である50 ppb以下に低下することが知られました。また、この微生物酸化処理後の地下水のモエジマシダ水耕栽培処理によって、モエジマシダ羽片部には比較的高濃度のヒ素が吸収蓄積され、最終水耕処理水中の全ヒ素濃度は10ppb以下に低下することが知られました。



図-9 ベトナム・ホーチミン市に設置したモエジマシダ水耕栽培ヒ素除去実験用パイロットプラント

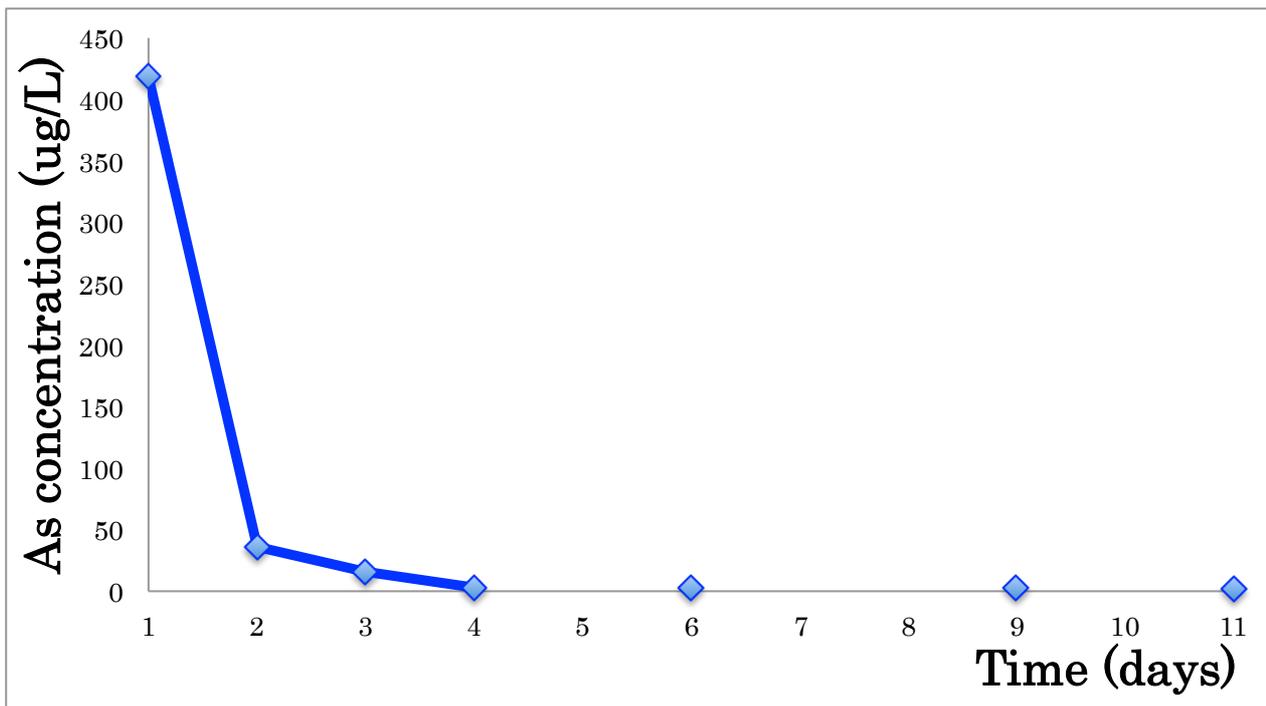


図-10 現地パイロット実験によるヒ素除去の結果

## おわりに

本研究では、ヒ素によって汚染された大量の地下水をできるだけ経済的に浄化し、生活用水や農業用水として利用可能にする方法を開発し、ヒ素高蓄積植物の水耕栽培を用いたファイトレメディエーション技術の有効性を確認することができました。しかし、微生物酸化処理によって発生する鉄／ヒ素水酸化物の後処理・処分方法の開発およびシダの羽片バイオマスに蓄積されたヒ素の処理・処分方法の開発が課題として残されています。これらの開発課題を含め、今後は総合的水処理技術としての地下水ヒ素汚染浄化技術の完成と、特に南アジアおよび東南アジア

ヒ素汚染地帯における地下水浄化技術としての普及に取り組む必要があると考えられます。

## 本研究による発表論文の一覧

簡 梅芳、宮内啓介、井上千弘、北島信行、遠藤銀朗：宮城県主要河川沖積平野部の土壌ヒ素濃度と東北地方太平洋沖地震津波の影響、土木学会論文集G（環境），Vol. 69, No. 1, pp. III19-24（2013）

宮内啓介、簡梅芳、黄毅、大友俊介、和泉卓也、井上千弘、北島信行、遠藤銀朗：津波による土壌のヒ素汚染とその修復への取り組み、J Environmental Biotechnology, Vol. 13, No. 1, 27-30（2013）

簡 梅芳、小幡和貴、黄 毅、宮内啓介、遠藤銀朗：ヒ素高蓄積植物による土壌ヒ素の吸収・除去と土壌微生物の亜ヒ酸酸化に関する研究、土木学会論文集G（環境），Vol. 69, No. 7, pp. III\_9-15（2013）

Kazuki Sugawara, Akihito Kobayashi, Ginro Endo, Masayoshi Hatayama and Chihiro Inoue: Evaluation of the effectiveness and salt stress of *Pteris vittata* in the remediation of arsenic contamination caused by tsunami sediments, Journal of Environmental Science and Health, Vol. 49, No. 14, 1631-1638（2014）

Yi Huang, Keisuke Miyauchi, Chihiro Inoue, Ginro Endo: Development of suitable hydroponics system for phytoremediation of arsenic contaminated water using an arsenic hyperaccumulator plant *Pteris vittata*, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry (doi:10.1080/09168451.2015.1107461)（2015）

Yi Huang, Keisuke Miyauchi, Chihiro Inoue, Le Dinh Don, Nguyen Cong Manh, Ginro Endo: Arsenic contamination of groundwater and agricultural soil irrigated with the groundwater in Mekong Delta, Vietnam, Environmental Earth Sciences (revised for the publication)

遠藤銀朗、宮内啓介、簡 梅芳、井上千弘、北島信行：地震・津波被災によるヒ素汚染土壌の植物による浄化技術の開発、ケミカルエンジニアリング、Vol. 57, No. 6, pp. 437-442（2012）

平田一真、遠藤銀朗、宮内啓介：ヒ酸耐性ロドコッカス属細菌のヒ素耐性遺伝子群の解析、東北学院大学工学総合研究所紀要、No. 2, pp. 73-79（2013）

井上千弘、菅原一輝、文 霞、遠藤銀朗、宮内啓介、黄 毅、北島信行：ヒ素、カドミウム含有土壌のファイトレメディエーション、ケミカルエンジニアリング、Vol. 59, No. 1, pp. 57- 61（2014）

遠藤銀朗：ヒ素汚染問題の解決のためにまず学理の構築を、水環境学会誌 Vol. 37, No. 11, p. 391（2014）

遠藤銀朗、黄 毅、宮内啓介：ヒ素汚染地下水の亜ヒ酸酸化微生物とヒ素高蓄積植物の水耕栽培による低コスト浄化技術の開発、Journal of Environmental Biotechnology（環境バイオテクノロジー学会誌）、Vol. 15, No. 2, 63-69（2016）

Yi Huang, Keisuke Miyauchi, Chihiro Inoue, Le Dinh Don, Nguyen Cong Manh, Ginro Endo: Arsenic contamination

of groundwater and agricultural soil irrigated with the groundwater in Mekong Delta, Vietnam, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, No. 9, 1-7 (2016)

(doi: 10.1007/s12665-016-5535-3)

宮内 啓介, 黄 毅, 菅原 一輝, 水戸 光昭, 成瀬 美樹, 中村真理子, 門間 聖子, 井上 千弘, 遠藤 銀朗: ヒ素高蓄積植物を用いたヒ素汚染水処理技術の開発、*Journal of Environmental Biotechnology* (環境バイオテクノロジー学会誌), Vol. 17, No. 1, 35-39 (2017)