

津波による土壌のヒ素汚染とその修復への取り組み

Arsenic Contamination of Soil by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami and Its Remediation

宮内 啓介^{1*}, 簡 梅芳¹, 黄 毅¹, 大友 俊介¹, 和泉 卓也¹,
井上 千弘², 北島 信行³, 遠藤 銀朗¹

KEISUKE MIYAUCHI, MEI-FANG CHIEN, YI HUANG, SHUNSUKE OHTOMO, TAKUYA WAIZUMI,
CHIHIRO INOUE, NOBUYUKI KITAJIMA and GINRO ENDO

¹ 東北学院大学工学部環境建設工学科 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

² 東北大学大学院環境科学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20

³ (株) フジタ環境エンジニアリングセンター 〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1

* TEL: 022-368-7445 FAX: 022-368-7070

* E-mail: kmiya@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Tohoku Gakuin Univ.

1-13-1 Chuo, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

² Graduate School of Environmental Studies, Tohoku Univ., 6-6-20 Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

³ Fujita Co., 2025-1 Ono, Atsugi 243-0125, Japan

キーワード: ヒ素汚染, ファイトレメディエーション, モエジマシダ, 東日本大震災

Key words: arsenic pollution, phytoremediation, *Pteris vittata*, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami

(原稿受付 2013年7月2日/原稿受理 2013年7月2日)

1. はじめに

ヒ素は地殻の構成元素であり, 水圏・地圏や岩石中など自然界に広く分布している。工業的には半導体の材料として用いられており, またその毒性を利用して農薬や防腐剤, さらに薬として使用されてきた歴史がある。地殻中のヒ素は地下水に溶け出すことで井戸水を通した飲料水・農業用水の汚染の原因になり, バングラディッシュをはじめとする世界中の国で, 4千万人以上が飲料水のヒ素汚染の危険にさらされている²⁾。

宮城県内には鉱山が多く存在しており, 金属およびそれに結合しているヒ素等の有害無機化合物が長年の河川活動によって運搬され, 河口域およびそれに続く海底に堆積していたと考えられる。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって引き起こされた大津波により, 沿岸部全域において大量の海底堆積物が巻き上げられ, 津波堆積物として沖積平野部に流れ込み堆積した。この堆積物によって, ヒ素等の有害無機化合物汚染が沿岸部全域に広がったと考えられる。宮城県内の津波浸水農用地だけでも15,002ヘクタールに及ぶ³⁾ことから推定して, 有害無機化合物が高濃度化したと考えられる津波被災面積は, 少なくとも数百ヘクタール, 比較的軽度な場合を含めれば数千ヘクタールにのぼるとみなされる。無機化合物汚染は物理的な被害とは異なり目には見えないが, 農作地の汚染による農作物の被害など, 我々の健康に大きな影響を与えかねない重大な汚染であ

る。本稿では, 我々がおこなった津波被災地域のヒ素汚染の実態調査の結果と, 汚染土壌の植物を用いた浄化(ファイトレメディエーション)の結果を報告したい。

2. 津波被災地沿岸域土壌のヒ素汚染調査⁴⁾

津波被災地域のヒ素含有量の状況を知るために, 宮城県内5つの主要河川の沖積平野部において, 主として農用地を対象に津波被災域およびその近傍の津波非被災域の計57箇所において土壌試料を採取し, 土壌中ヒ素含有量を調べた(図1, 表1)。この研究においてヒ素含量の測定に用いた土壌試料は, 津波被災土壌にあっては, 津波被災後7ヶ月から1年を経過した時点において採取されたものである。その結果, いずれの河川流域でも津波被災土壌のヒ素含有量が非津波被災土壌のそれを上回っており, 津波により押し上げられた河口域堆積物および沿岸海底堆積物は従来の沿岸域土壌よりヒ素含有量が高いことが明らかとなった(表2)。また, 津波堆積物はヘドロ状のものと砂状のもの2種類に大別されたため, 津波被災域における津波堆積物の種類によるヒ素含有量の差違と, 津波被災後7ヶ月から1年を経過した時点で, 津波によって押し上げられた海底堆積物中のヒ素がどの程度下層の従来平野土壌表層に移行したかを調べた(表3)。その結果, ヘドロ状津波堆積層におけるヒ素含有量が相対的に高い値となっていることが明らかとなった。また, これら津波堆積物の下層にある従来平野



図1. 宮城県の沖積平野を形成する主要河川の流路と土壌サンプリング地点⁴⁾.

表1. 宮城県主要河川沖積平野土壌の採取地点数と標本サイズ⁴⁾

河川流域	採取地点数 (土壌標本サイズ)	
	津波域	非津波域
北上川	6 (10)	6 (6)
鳴瀬川	7 (12)	5 (5)
七北田川	6 (11)	5 (5)
名取川・広瀬川	6 (11)	5 (5)
阿武隈川	6 (12)	5 (5)

表2. 宮城県各河川沖積平野部土壌の平均ヒ素含有量⁴⁾

河川名	平均ヒ素含有量 (mg/kg-dw soil) 〈標準偏差〉		津波によるヒ素 濃度の上昇 (mg/kg-dw soil)
	津波域	非津波域	
北上川	8.72 <4.41>	4.77 <2.25>	3.95
鳴瀬川	1.82 <1.03>	0.810 <0.41>	1.01
七北田川	6.82 <5.67>	1.84 <0.80>	4.98
名取川・ 広瀬川	5.74 <3.92>	2.46 <0.63>	3.27
阿武隈川	2.95 <3.42>	1.44 <0.71>	1.52

土壌表層のヒ素含有量は、いずれの河川流域においても表2に示した非津波被災土壌のヒ素含有量平均値よりも高い値を示した。さらには、上層の津波堆積層のヒ素含有量よりもその下層にある平野土壌表層のヒ素含有量の方が高い場合がいくつか見られた。砂津波堆積物はヘドロ堆積物より顆粒サイズが大きく有機物含量も低いため、透水係数が高く、ヒ素の移行が進行しやすいと考えられた。また、地震が起こした地盤沈下などにより地下水位が大きく変化し、津波堆積物からのヒ素の溶脱と下層への移行を容易にしたことも考えられた。これらのことは、津波堆積物に含まれていたヒ素が、7ヶ月以上の

表3. 宮城県主要河川沖積平野部土壌の津波堆積物ヒ素含有量と従来土壌層への移行⁴⁾

河川名	平均ヒ素含有量 (mg/kg-dw soil)	
	ヘドロ堆積 (標本サイズ) 【従来土壌表層】	砂堆積 (標本サイズ) 【従来土壌表層】
北上川	12.1 (2) 【11.0】	4.11 (2) 【10.7】
鳴瀬川	2.68 (2) 【1.48】	1.23 (2) 【1.76】
七北田川	12.5 (1) 【10.4】	1.83 (1) 【5.49】
名取川・ 広瀬川	10.2 (3) 【4.10】	3.53 (2) 【5.21】
阿武隈川	2.95 (3) 【0.818】	1.18 (2) 【1.49】

時間経過後にはその下層にある従来土壌に移行し、土壌の新たなヒ素高濃度化をもたらしたことを示している。また、表2に示した結果より、津波が運んだ砂堆積物に含まれていたヒ素は、ヘドロ堆積物に含まれていたヒ素と比較してより容易に下層の従来土壌層へと移行し、下層の従来土壌に吸着し高濃度化していることが知られた。

3. 植物を用いた土壌浄化 (ファイトレメディエーション)

上記のような低濃度・広範囲のヒ素土壌汚染を浄化する方法については、土壌の入れ替えを始め様々な方法が考えられるが、その中でも植物による浄化(ファイトレメディエーション)は有望な方法の一つであると言える。ファイトレメディエーションは他の方法に比べて、省エネルギー、低コスト、低環境負荷であるため、実用化が望まれる方法である。ファイトレメディエーションのためには、浄化したい化合物を吸収(あるいは分解や蒸発)させるための植物の選定が重要な要素になるが、ヒ素を吸収する植物としては、モエジマシダ(*Pteris vittata* L.) (図2)がよく知られている。モエジマシダはイノモトソウ科イノモトソウ属のシダ植物で、アジア、アメリカ等世界各地に分布し、日本では和歌山県以南に自生する多年草である。モエジマシダは2001年にMaらによってヒ素超蓄積植物として報告された¹⁾。ここで言うヒ素超蓄積植物とは、地上部に1 mg/g以上のヒ素を蓄積可能な植物と定義されている³⁾。この植物はヒ素汚染土壌で生育することが可能であると同時にヒ素を地上部である羽片に高濃度で蓄積し、その濃度は実験室内で最大20 g/kg dry weight (乾燥重量, 以後DW)にも上る。また、植物生産量も1-2 kg DW/m²と高く、ファイトレメディエーションに適した植物であるといえる。

4. モエジマシダを用いたヒ素汚染土壌の浄化実験

我々は、宮城県内の5カ所の圃場を用いて、モエジマシダを用いたヒ素汚染土壌のファイトレメディエーションの実証試験をおこなった。5カ所のうち4カ所は津波被災地域であり、1カ所は津波被災地域ではないが、元来のヒ素濃度が高い土壌である。実験期間であるが、上

記の通りモエジマシダは和歌山県以南にのみ自生するため、宮城県内では冬場の低温で枯死してしまうことが予想された。そのため、気温が上昇し始める5月に苗を植え、気温が下がる前の11月に刈り取ることにして実験をスタートした。その間、一ヶ月ごとに土壌とシダをサンプリングし、それぞれのヒ素濃度を測定した。

モエジマシダの植え付けは、基本的に一畝を1m×10mとし、一畝に100株のシダを植え付けた。一圃場当たり10畝を基本としたので、1圃場に約1000株のシダを植えたことになる。図3に苗移植時の圃場の様子を示す。土壌のサンプリングは手動の土壌サンプラーを用

いて地表から30cmの土壌を直径約6cmの円柱の形で抜き取り、上層15cm(作土層)と下層15cmの2つに分けて各処理をおこなった後、原子吸光度計を用いてヒ素含量を測定した。土壌中のヒ素濃度に関しては、土壌汚染対策法では乾燥土壌：水=1：10で6時間振とうして溶出したときの水中のヒ素濃度が10µg/L未満、1N塩酸で抽出される土壌中のヒ素濃度が150mg/kg未満となっている。また、農用地の土壌汚染防止法では、乾燥土壌：1N塩酸=1：5で30分振とうして溶出する土壌中のヒ素濃度が15mg/kg未満となっている。上記の分析法および基準値からも分かる通り、土壌中のヒ素のうち、水に溶け出すのはごくわずかの割合である。水溶出量は地下水汚染のリスクを表すものであるが、ファイトレメディエーションにおいては、植物が吸収可能なヒ素の量を決定する値となる。土壌中のヒ素のうち、水に不溶性成分と可溶性成分の割合はpHや土中の酸素量によって可逆的に変化するため一度に全てのヒ素を吸収することは難しく、また、水で溶出されるヒ素成分をモエジマシダが吸収した後に不溶性画分から可溶性画分に変化することも多く、浄化を困難にしている。シダのサンプルについては、羽片の数と長さを測定した後に細かく裁断し乾燥させ、乾燥重量を量った後に酸分解して植物地上部内に含まれるヒ素含有量を測定した。

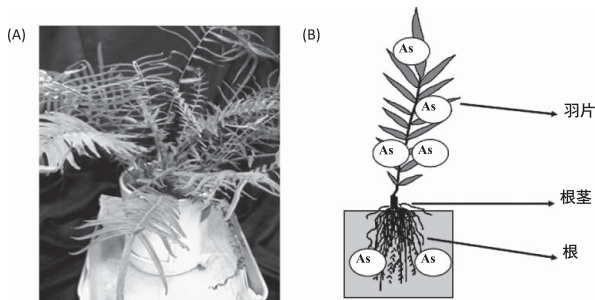


図2. モエジマシダ (*Pteris vittata*) の写真 (A) と模式図 (B)。地上部を羽片と呼び、地下部は根茎と根からなっている。



図3. シダ苗移植時の圃場の様子。

5. ヒ素汚染土壌浄化の結果

本稿では5つの圃場のうち一つの圃場を例として1年目の結果を報告する。

図4にモエジマシダ羽片のバイオマス量(図4A)と羽片のヒ素濃度(図4B)の結果を示す。モエジマシダの羽片バイオマスは5～7月にかけてはほとんど変化がないが、その後急速に生育が見られ(図5)、11月には一株当たりの乾燥重量が約80グラムとなった(図4A)。1m²当たり10株植えているので、バイオマス量は800g DW/m²となる。羽片のヒ素濃度(乾燥重量1g当たり)の変化については、苗を植えてから一ヶ月で約20µg/g DWに上昇し、その後8月から10月にかけては50-60µg/g DWでほぼ一定であった。しかし、11月になるとその値は大きく落ち、30µg/g DWとなった。羽

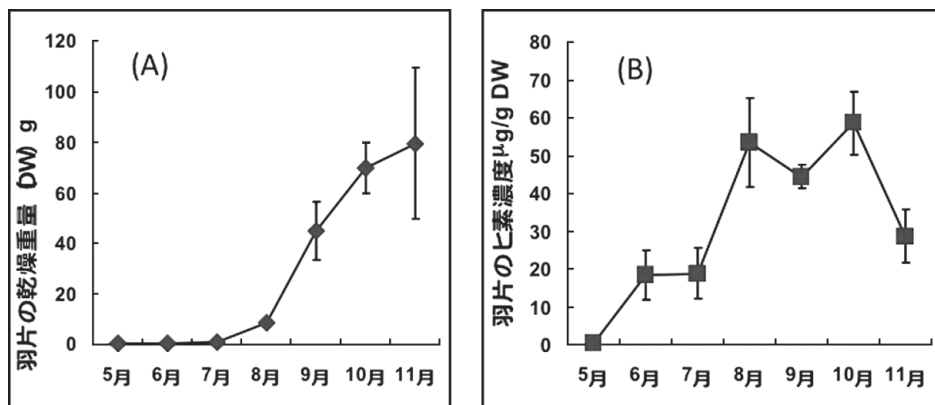


図4. モエジマシダ羽片のバイオマス量 (A) とヒ素濃度 (B) の経時変化。(A) 一株当たりの乾燥重量 (g) と乾燥重量当たりのヒ素濃度を一ヶ月ごとに測定した。

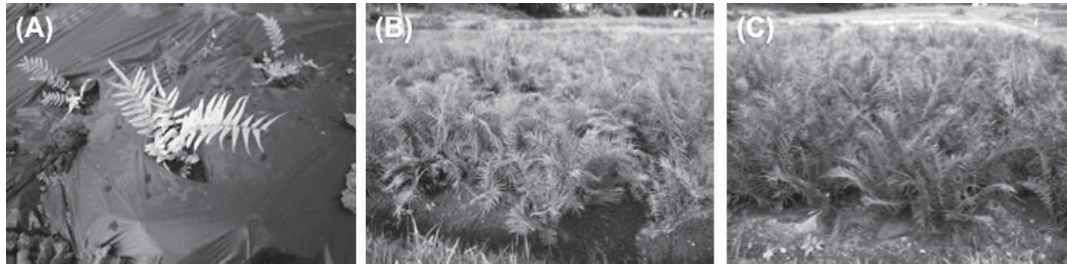


図5. モエジマシダの生長の様子. (A) 5月, (B) 9月, (C) 11月の圃場の様子.

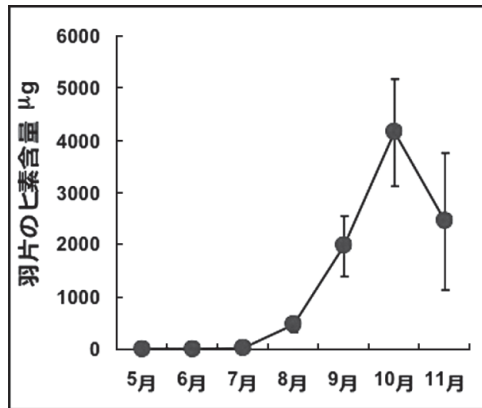


図6. モエジマシダ一株当たりの羽片に含まれるヒ素含量の経時変化.

片のヒ素濃度と乾燥重量を乗じて羽片のヒ素含有量を求めたグラフが図6である. 7月から10月にかけてヒ素含有量が増加しており, 11月に大きく減少することが見て取れる. シダの刈取りは11月におこなったので, この圃場 (100 m²) からは 80 g DW/m² × 約 2.4 g × 100 m² × 30 µg/g DW = 約 2.4 g のヒ素を除去できたことになる.

モエジマシダはヒ素を地上部に蓄積することが知られているが, 今回の結果は, 地上部に蓄積されたヒ素が10月から11月にかけて別の場所へ移動したことを示唆している. そこで, 地下部である根茎と根のバイオマス量とヒ素濃度を測定した. 根茎と根のバイオマス量は地上部である羽片に比べて低いものの, 根茎のヒ素濃度が非常に高くなることが明らかとなった. これは実験室内での水耕栽培およびポット栽培では観察されなかった新たな知見である. 羽片のヒ素含量が下がる10月から11月にかけて, 根茎のヒ素含量が上昇しているが, 羽片での減少量に比べて根茎の上昇量が低いことから, 土壌中にヒ素が戻っている可能性も示唆された. この原因は不明であるが, 圃場のある地域の平均気象データと実験をおこなった2012年の気象データを較べると, 2012年は降水量が非常に少ない年であったこと, 10月の気温は苗を植えた5月並みであるが, 11月はそこからさらに気温が下がったことが分かった. これらのことから, ヒ素の地上部から地下部への逆輸送は, 気温の低下によるものである可能性や, 降水量不足によって地下から地上への水の移行が不活発であったために, シダの植物体内でヒ素を輸送する力が不足した可能性が考えられる. これらの可能性については, 実験室での水耕栽培やポット栽培で詳細な解析をおこなう必要がある.

6. おわりに

東日本大震災における大津波によって多くの被害が報告されているが, 有害無機化合物汚染もそのうちの一つである. ヒ素に関しては現在の基準と比較した場合深刻な汚染ではないものの, 土壌中のヒ素の形態変化によっては水による溶出値が基準を超える可能性は十分にあり, 必要に応じた汚染調査が今後も必要である. 本稿で紹介したモエジマシダを用いたヒ素汚染の浄化は低濃度汚染の浄化に適した方法であると言えるが, 刈り取り後のバイオマスの減容化および有効利用法の開発, またバイオマスからのヒ素の分離技術の開発等, まだ解決すべき課題が数多く存在しており, 今後の研究でこれらの課題を解決していきたい.

謝 辞

本研究の一部は下記のグラント提供により実施したものです. ここに記し, 感謝いたします.

「津波による有害無機化合物汚染土壌の生物浄化技術の開発」三井物産環境基金・東日本大震災復興助成 (研究助成) (平成23年度～平成25年度)

「地震・津波流出土壌の生物浄化技術の開発」JST 研究シーズ探索プログラム (平成23年度)

「環境保全と健全生活のための先端バイオテクノロジーの統合的研究」文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成21年度～平成25年度)

文 献

- 1) Ma, L.Q., K.M. Komar, C. Tu, W. Zhang, Y. Cai, and E.D. Kennelley. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature* 409: 579.
- 2) Nordstrom, D.K. 2000. Public health—Worldwide occurrences of arsenic in ground water. *Science* 296: 2143–2145.
- 3) Verbruggen, N., C. Hermans, and H. Schat. 2009. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytol.* 181: 759–776.
- 4) 簡 梅芳, 宮内啓介, 井上千弘, 北島信行, 遠藤銀朗. 2013. 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分冊)*. 69: 19–24.
- 5) 農林水産省: 農地等の被害と復旧状況 (岩手県, 宮城県, 福島県), 2011.7, <http://www.cao.go.jp/shien/2-shien/2-infra/11-agr.pdf>