

3.11 東北大津波被災地沿岸の干潟における堆積物と植物の分析 — 海洋生態系再生への影響 —

世良耕一郎¹、馬場史孝¹、後藤祥子²、高橋千衣子²、齋藤義弘²、松政正俊³

¹ 岩手医科大学サイクロトロンセンター
〒020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢留が森 348-58

² 日本アイソトープ協会滝沢研究所
〒020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢留が森 348-58

³ 岩手医科大学共通教育センター
〒028-3694 岩手県矢巾町西徳田 2-1-1

1 はじめに

沿岸における汽水域は、海水と河川水が合流し豊富かつ多様な海洋生態系を有することが知られている。中でも干潟には様々な海洋生物が生息し、海洋生態系を育む温床となっている。3.11 津波の被害を受けた岩手・宮城沿岸は、牡蠣、ホタテ、ホヤなどの産地として知られていたが、養殖業は壊滅的な打撃を受け、その再生が地域再興の一つのカギを握っている。しかし一方では岩手・宮城の干潟およびその生態系は津波により多くが水没・消滅した。そのためまず干潟の形成、それに続く海洋生態系の再生というステップを踏まなければ養殖業の再興もかなわない。一例を挙げれば、多様な生態系を保有することで知られていた仙台の蒲生干潟は全て水没し、その生態系は壊滅した。しかし多くの場合、周辺の干潟の一部は残り、海鳥などの飛来は見られる。海底における砂の堆積は順調に進んでおり、干潟自体は数年後に再生できるとの見通しもある。次は生態系の再生だが、それには一つの問題が存在する。

本報文集その他で報告を行ったように^{1,2)}、津波は海底の多量のヘドロを陸地に運んだ。現在までの我々の研究により、北は八戸から南は南相馬までの沿岸の堆積物が調べられ、重金属汚染の実態が把握されている。近年の我国の沿岸海底は重金属汚染されており³⁾、それが海産物に影響を与えていることが指摘されている⁴⁾。汚染の原因としては、鉱山廃坑からの浸出水、温泉水、産業廃棄物処理施設からの浸出水などが考えられる。特に港湾においては、船舶が排出する重油などの汚染も重なり、海底に堆積したヘドロの重金属汚染が進んでいた。それが津波により住民の居住域、汽水域、農地などに運ばれ、住民の健康被害、海洋生態系への影響、農業の再興への障害をもたらしている。汽水域における海洋生態系再生に対しても、この問題が障害となることが予想される。

本研究においては、津波がもたらした汚泥（ヘドロ）を含む砂・土試料が 3 つの干潟；津軽石干潟、織笠干潟（以上岩手県）、そして蒲生干潟（宮城県）において採取された。これらの干潟においてはアサリなどの無脊椎動物・甲殻類・虫などが姿を消し、かろうじて海鳥が飛来するのみであるが、海鳥の餌

となる生物もいない。特に蒲生干潟は豊富で多様な生態系を有することで知られ、多くの研究の対象となっていた著名な干潟であるが、殆どが水没し海と化した。しかし七北田川の河口の僅かな部分が残りに、試料採取はその上で行われた。また、重金属の海洋生態系への影響を調べるため、各干潟の上の植物試料も採取され分析された。これらの植物は津波後最初に生育を始めた生物であり、津波直後の状況を記録しているものと期待される。

2 実験

2.1 試料採取

干潟上または周辺における試料採取は、2011年8月31日と9月3日の2回にわたって干潮時に合わせて行われた。8月31日には岩手県の2箇所の干潟において採取が行われ、先ず12の砂・土試料、10の植物試料が津軽石干潟において採取された。またその足で織笠干潟に向かい土・植物が3試料ずつ干潟上で採取された。Fig. 1に、これら2干潟の位置を示す。特に後者においては干潟の大部分が失われたが、一部残存した干潟上で採取を行うことができた。各々の採取地点をFig. 2に示す。さらに9月3日、仙台港に近い蒲生干潟において採取が行われ、10の砂・土試料と5種の植物試料が干潟とその周辺において採取された。当干潟においてはその主要部分は水没し、河口付近の僅かに残存した干潟上で採取が行われた。(蒲生干潟に関しては、その後の海底の調査の結果砂の堆積速度が思いのほか速く、物理的再生は数年後には可能との見解もあるようだ。) Table 1に、干潟上で採取された植物名とその学名を記す。土試料は津波後の情報を保存していると思われる防波堤内においても採取された。(Fig.6 参照)



Fig. 1 Locations of the three tidelands.

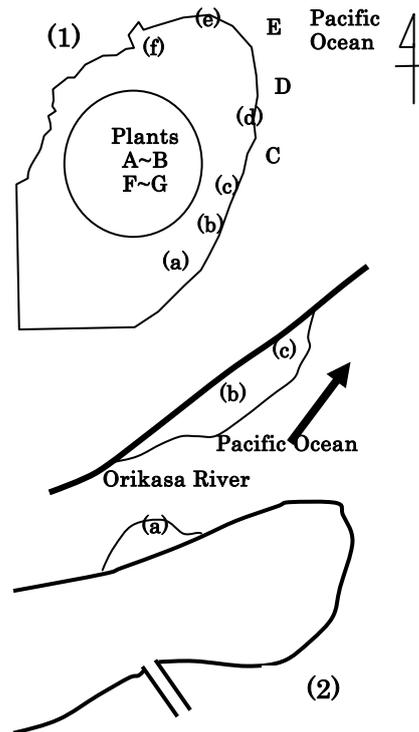


Fig. 2 Sampling spots on Tsugaruishi (1) and Orikasa (2) tidelands, where C, D and E in Tsugaruishi tideland are seaweeds.

Table1 Plants collected from the three tidelands.

Tsugaruishi	A: Hamaninniku	<i>Elymus mollis</i>
	B: Hachijouna	<i>Sonchus brachyotus</i>
	C: Bouaonori	<i>Enteromorpha intestinalis</i>
	D: Futojuzumo	<i>Chaetomorpha spiralis</i>
	E: Aosa no issyeu	<i>Ulva sp.</i>
	F: Ushinokegusa	<i>Festuca pratensis</i>
	G: Hamahirugao	<i>Calystegiasoldanella</i>
	H: Kauatsurigusa	<i>Cyperus microiria</i>
	I: Kurara	<i>Sophora flavescens</i>
	J: Hamanashi	<i>Rosa rugosa.</i>
	K: Hamanigana	<i>Ixeris repens</i>
	L: Yoshi	<i>Phragmites australis</i>
Oriksa	A: Nobudou	<i>Ampelopsis glandulosa var. heterophylla</i>
	B: Otokoyomogi	<i>Artemisia indica var. maximowiczii</i>
Gamou	A: Shiroza	<i>Chenopodium album</i>
	B: Hakobe	<i>Stellaria</i>
	C: Komatsunagi	<i>Indigofera pseudotinctoria</i>
	D: America sendanngusa	<i>Bidens frondosa</i>
	E: Suberihiyu	<i>Portulaca oleracea</i>

2.2 試料調製

土試料は感熱滅菌器内で6時間ほど105℃に保たれ、完全に乾燥させた後秤量された。定量分析は我々の開発した「粉末内部標準法⁵⁾」により行われ、各試料に対しPd-C(パラジウムカーボン)粉末が10,000ppmになるように加えられ、メノウ乳鉢内で完全に均一化された。その試料のうち1~2mgほどがバックリングフィルム上に乗せられ、1%コロジオン溶液により固定された。フィルム上の試料は、X線の自己吸収を避けるためピペットチップにより4mmφほどに均一に引き伸ばされ、乾燥後ターゲットとした。

一方、植物試料は「硝酸灰化-内部標準法⁶⁾」により処理された。同様に感熱滅菌器内で105℃に保ち数時間完全に乾燥させた後、乾燥試料30mgほどが秤量され、専用容器(テフロン製)に濃硝酸とともに封入された。さらにIn標準液がIn=1000ppmになるように添加され、圧力容器である外容器内で電子レンジにより均一に灰化された。ターゲットは、その溶液数mLがバックリング膜上に滴下され、クリーンベンチ内で乾燥させることにより作製された。干潟上で採取された植物試料は上記19試料であるが、その他比較のために内陸で採取された植物45試料に対しても同様の処理が行われた。

2.3 照射・測定条件

島津製作所小型サイクロトロンより引き出された 2.9 MeV の陽子ビームは、2 組の三連 Q magnet、steering magnet などで調整され、真空散乱槽に導入される。発生した X 線は、2 台の Si(Li) 検出器により測定される。検出器 1 には 500 μm Mylar 膜の X 線吸収体が装着され、K、Ca から重元素までの測定が行われ、検出器 2 には計数率を調整するための X 線コリメータが装着され、Na~Ca までの軽元素測定が行われる。土試料に対しては、Fe が突出する試料に対し、重元素の感度を 2 桁高める効果のある「特殊吸収体⁸⁾」を装着した測定もあわせて行われ、Ni 以上の重元素の高感度測定が行われた。Fig.3 に、特殊吸収体を装着して得られたスペクトル（津軽石土試料-a）を示す。内部標準の Pd peaks に加え、Zr、Ba、Pb、As などの重元素ピークが観測されている。ビーム径は 5 mmφ、平均的ビーム電流及び測定時間は 3 nA、3~10 分であったが、特殊吸収体により重元素測定を行う場合は、ビーム電流 100 nA で照射が行われた。

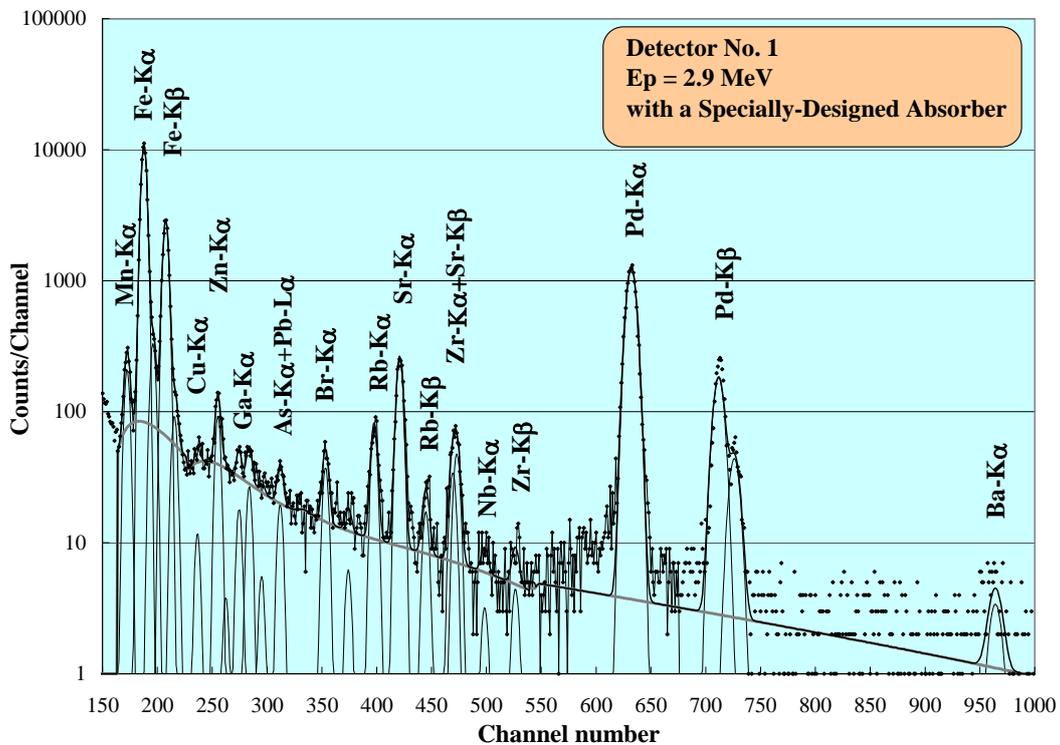


Fig. 3 Typical spectrum of a sludge sample (Tsugaruishi -a) obtained with a specially designed absorber developed for improving sensitivity for heavy elements. Palladium was added to the sample as an internal standard.

3 結果と議論

図 4 に 3 干潟上で採取された 14 の土試料の結果を示す。これらの土試料は表面に存在する黒色の部分を選んで採取されたが、これは陸地に堆積したヘドロ試料の一つの特徴でもある。図には 14 のヘドロを含む土試料の平均値とともに、岩手・宮城の内陸で採取された 57 の土試料の平均値も示されている。予想に反し、干潟の土試料は内陸の土壌と比べ重元素濃度が高いわけではないことが図から確認できる。一つには、干潟は満潮時に水没し、その繰り返しの繰り返しにより堆積した汚泥中の重元素がすでに洗われ失われている可能性があると考えられる。図中には、港湾や市街地などに堆積したヘドロ 72 試料^{1,2)}の平均値も示されているが、それと比べると重元素濃度は低い。それに対し蒲生干潟において、満潮時に

海水で覆われない防波堤の内側で採取された 5 土試料の結果を、同様に内陸の土壌試料と比較したものが Fig.5 に示され、その採取場所が Fig.6 に示されている。As、Zr、Ba などの重元素が内陸と比べ高い値を示していることが分かる。

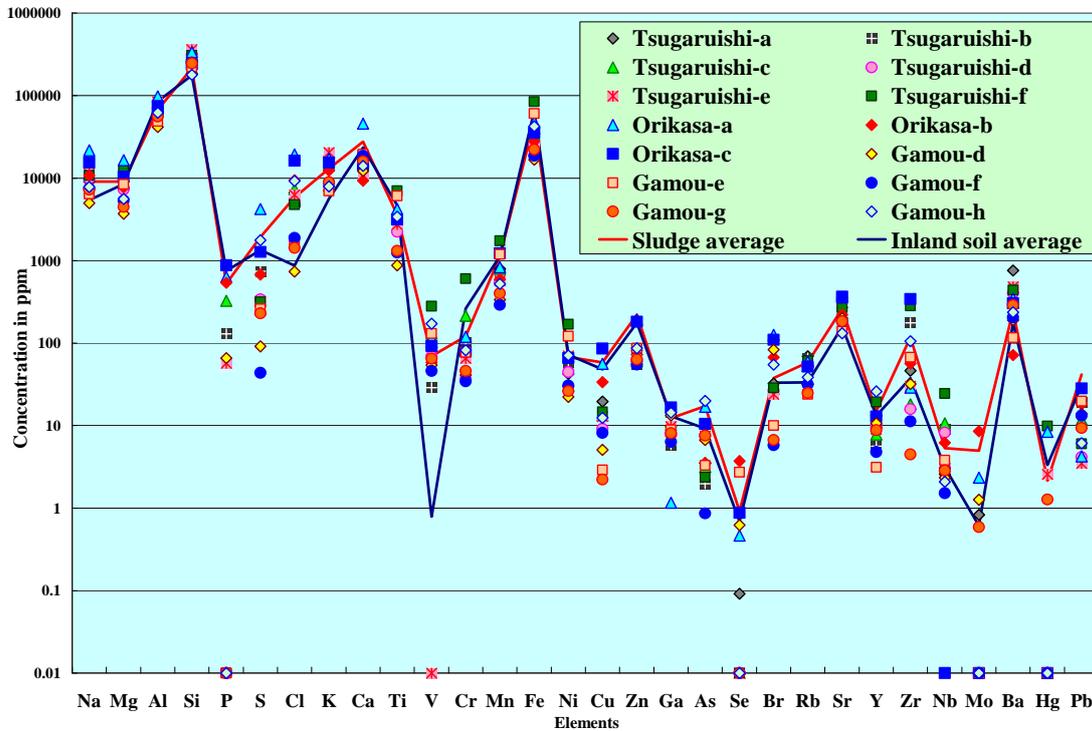


Fig. 4 Elemental concentrations of the soil samples collected from the three tidelands.

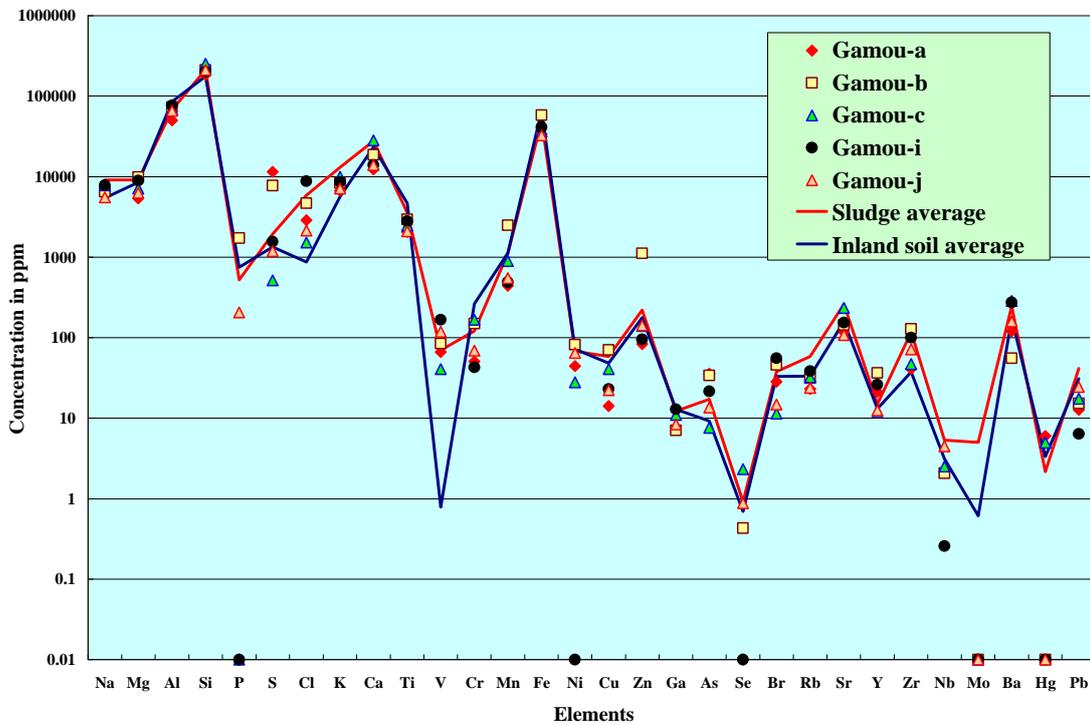


Fig. 5 Elemental concentrations of the sludge samples collected near the Gamou tideland inside a coastal levee.

そのことは、以下に示す干潟上の植物試料の分析結果により裏付けられる。Fig.7 に津軽石干潟上で採取された12の植物試料の分析結果を示す。図中には、岩手県内陸で採取された45の植物試料中元素濃度の平均値も示されている。沿岸と内陸では植生が大きく異なるため同種の植物は数が限られているが、平均値による比較が行われた。内陸の植物においては、Ca、Ti、Mn、Rbが干潟上の植物と比べ高濃度を示すが、当然のことながら、NaとClは干潟上の植物の方が高濃度である。それに加え、Mg、Si、S、Cr、Se、ZrそしてPbが干潟においてかなりの高値を示し、Rb以外の重金属濃度が高いことが確認できる。Fig.8には同様の比較を織笠・蒲生干潟上の植物に対し行った結果を示すが、ほぼ同様の傾向が現れている。特にCrとPbの高値は、海洋生態系の再生に悪影響を及ぼすことが懸念される。植物は干潟上で最初に再生した生命体であり、津波直後の情報を反映するものと思われることから、海洋生態系における食物連鎖の出発点である植物性プランクトンが先ず重金属を吸収し、それが動物性プランクトンや小動物に移行し食物連鎖に組み込まれることが予想されるからである。それに対し、やはり有害重元素であるAs、Hgに関しては、内陸の植物とほぼ同等の濃度であった。

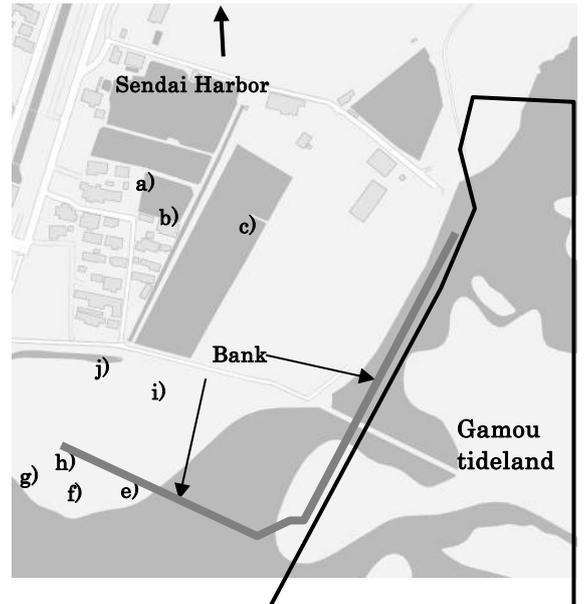


Fig.6 Sampling spots of sludge samples on and near Gamou Tideland.

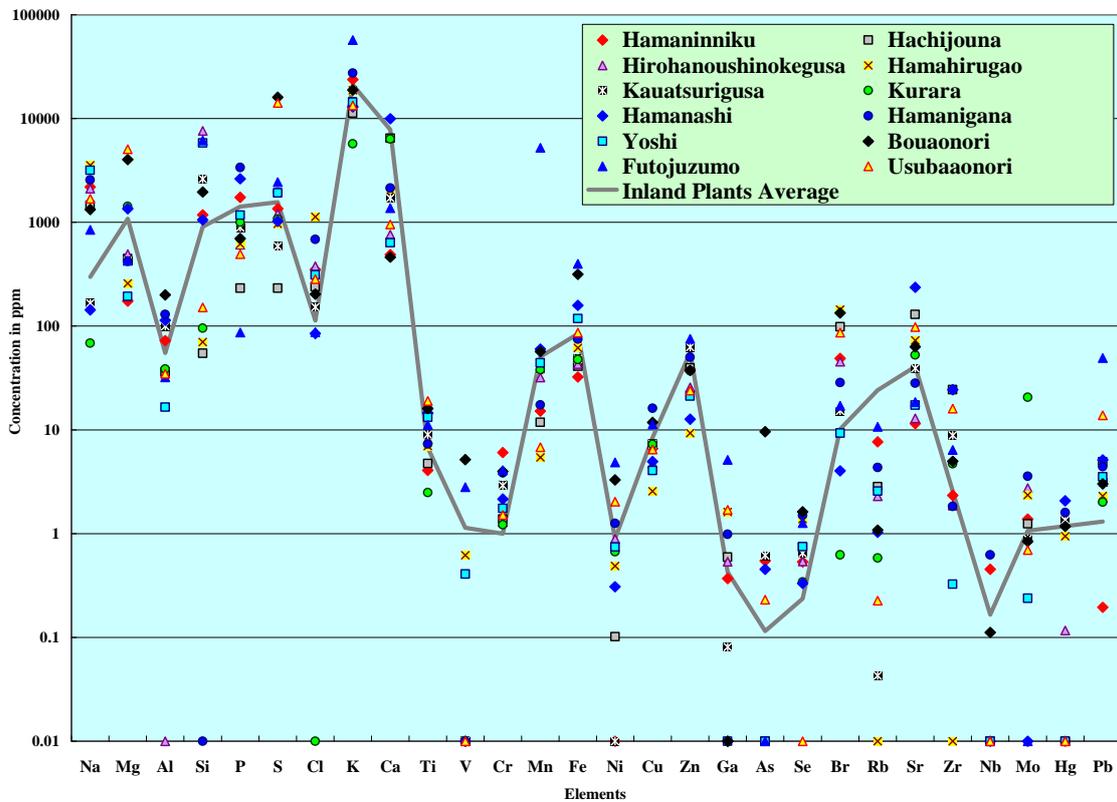


Fig. 7 Elemental concentration in 12 kinds of plants collected from the Tsugaruishi Tidelands, where average concentration of 45 wild plants collected from the inland district is shown in the solid line.

蒲生干潟において、防波堤の内側で採取された汚泥を含む土試料中重元素濃度が高い値を示した事実は、仙台港周辺の海底の重元素汚染がかなり進んでいることを示している。これらの試料も津波から5ヶ月以上経過し風雨により重元素濃度がある程度薄められていることを考えると、津波直後の重元素濃度がかなり高いものであったことが予測できる。海底の汚染は仙台港に限らず多くの被災地の港湾部に共通の問題であり、文献1、2中の主要な港近辺で採取されたヘドロ試料の分析結果もそれを示している。しかし干潟は満潮時に何度となく水没し海水で洗われるため、堆積物やその中の重元素の多くが取り除かれ、津波後数ヶ月経過した時点での重元素汚染の問題はほぼ消えていることが確認できた。しかし一方で、津波後最初に再生した植物試料中の重元素濃度が高値を示したことから判断し、生物がすでに重元素を摂取してしまった可能性が高い。植物中のAs(砒素)が高値を示さなかったという事実も、溶解した砒素が植物性プランクトンにより容易に吸収されるという報告があり⁹⁾、植物再生の前に既に食物連鎖に取り込まれた可能性が否定できない。プランクトンに吸収された重元素は、フジツボなどの甲殻動物類、貝類などの海洋無脊椎動物に移行することが知られている。現在、一時的に食物連鎖の中に潜んでいる重元素がどのような形で海洋生態系再生へ影響を与えるのか、今後上記の海洋生物の分析を長期的に続け、監視する必要があるものと思われる。

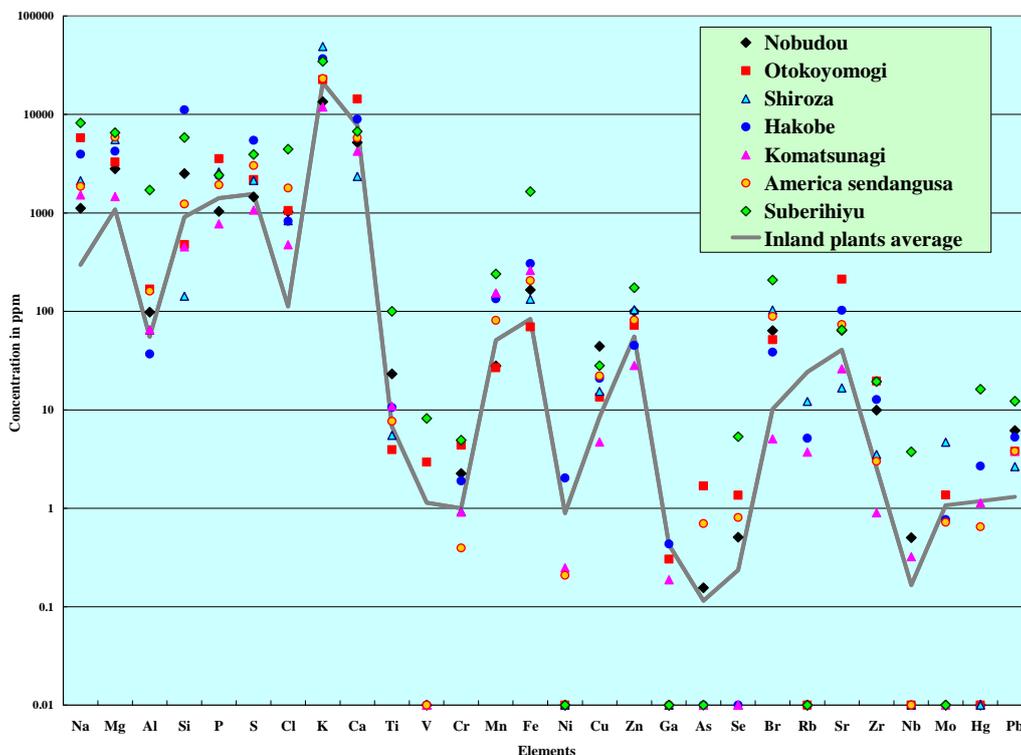


Fig. 8 Same as Fig. 7 but for seven plant samples collected from the Orikasa and the Gamou Tidelands..

4 要約

以上の事柄は以下に要約できる。

1. 重金属汚染された汚泥による海洋生態系再生の影響を調べるため、岩手・宮城の3つの干潟の残存部において、25の土試料、18の植物試料が採取され分析された。
2. これらの結果は内陸部で採取された57の土壌試料、45の植物試料、さらに被災地の港や市街地、住宅地で採取された72のヘドロ試料の結果と比較された。
3. その結果、72のヘドロ試料と比較し干潟上の土試料中重元素濃度はかなり低く、さらに内陸部の土

壤試料との比較においてもほぼ同様であることが確認された。しかし一方で、干潟上で採取された植物試料中の重元素濃度は内陸の植物と比較しかなりの高値を示し、生物が既に重金属を吸収していることが示唆された。

4. 干潟上の重金属汚染の問題はさほど深刻ではなく、海洋生態系の早期再生は有望と思われるが、今後食物連鎖における重元素の動きを長期的に監視する必要がある。

謝辞

被災地の再興に向けて種々の形で携わり貢献されている方々の努力に敬意を表します。また、多分野における NMCC 共同利用者の方々にも、貴重なご助言をいただきましたこと感謝いたします。

参考文献

1. F. Baba, K. Sera, S. Goto, C. Takahashi and Y. Saitoh, "Analysis of Contaminated Sludge Deposited on the Land Attacked by Great Tsunami Following Tohoku Great Earthquake Disaster.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.22-1-2, 231-239, (2012)
2. 馬場史孝、世良耕一郎、後藤祥子、高橋千衣子、齋藤義弘、"3.11 大津波が陸地にもたらした重元素汚染された汚泥試料の分析"、本報文集 (2012)
3. H. M. Kabir, T. Narusawa, F. Nishiyama and K. Sumi, "Elemental Analysis of Uranouchi Bay Seabed Sludge Using PIXE.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.16-3,4, 221-230 (2006)
4. 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)
5. K. Sera, and S. Futatsugawa, "Quantitative Analysis of Powdered Samples Composed of High-Z Elements.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.8-2,3, 185-202 (1998)
6. S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, Y. Saitoh, 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)
7. K. Sera, T. Yanagisawa. H, Tsunoda, S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, Y, Saitoh, S. Suzuki, and H. Orihara, "Bio-PIXE at the Takizawa Facility. (Bio-PIXE with a Baby Cyclotron).", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 2-3, 325-330 (1992)
8. K. Sera, and S. Futatsugawa, "Effects of X-ray Absorbers Designed for Some Samples in PIXE Analyses.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 5-2,3, 181-193 (1995)
9. J. G. Sanders, R. W. Osman and G. F. Riedel, "Pathways of arsenic uptake and incorporation in estuarine phytoplankton and the filter-feeding invertebrates *Eurytemora affinis*, *Balanus improvisus* and *Crassostrea virginica*.", *Marine Biology*, Vol. 103, 3, 319-325 (1989)

Analysis of plants and sediments from the tidelands of the coastal regions of the Tohoku district following the 2011 tsunami

K. Sera¹, F. Baba¹, S. Goto², C. Takahashi², Y. Saitoh² and M. Matsumasa³

¹Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

²Nishina Memorial Cyclotron Center, Japan Radioisotope Association
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

³Department of Biology, Center for Liberal Arts and Sciences, Iwate Medical University
2-1-1 Nishitokuta, Yahaba, Iwate 028-3694, Japan

Abstract

The tidelands (tidal flats) of the seaside district of Tohoku, Japan, which play an important role in maintaining the diversity of the marine ecosystem, were almost completely destroyed by the massive tsunami that occurred on March 11, 2011. The tsunami also brought large quantities of contaminated sludge from the bottom of the sea to the coastal lands including the tidelands. In this study, we collected sludge samples from three tidelands: the Tsugaruishi estuary tideland (Iwate pref.), the Orikasa estuary tideland (Iwate pref.), and the Gamou tideland (Miyagi pref.). We then analyzed the samples using PIXE in accordance with a powdered-internal-standard method that we developed. In order to investigate the effects of the contaminated sludge on the ecosystem, we gathered and analyzed various kinds of wild plants and seaweed. We found that the tidelands are contaminated with heavy elements, such as arsenic, lead, zirconium, and barium, although the contamination is less serious in the vicinity of the beach.