

# 津波堆積物の地球化学的特徴とリスク評価



東北大学 大学院 環境科学研究科 教授 駒井 武

## 1. はじめに

2011年3月11日に東日本地方を襲った巨大地震は、地震の直接的な被害のみならず、液状化や地盤沈降、さらには沿岸域における広域の大津波による甚大な被害をもたらした。特に、東日本沿岸における膨大な津波堆積物と震災瓦礫は、被災地の復興を妨げる大きな要因となっている。津波堆積物には通常の土壌と比べて、海成堆積物に特有な重金属類が含まれる可能性があり、その汚染リスクを適切に評価することが重要である。

そのため、震災後の3月から12月にかけて津波被災地の緊急調査を行い、様々な種類の津波堆積物を採取するとともに、その化学的、物理的な組成を分析した。多くの津波堆積物は砂状であったが、一部は細粒の泥質を含む砂泥互層を形成し、津波による物質の移動性の痕跡を残していた。また、泥質を含む津波堆積物にはヒ素や鉛などの重金属等を多く含有するものがあり、その管理には十分な留意が必要である。さらに、海洋底質を起源とする津波堆積物では、嫌気的な環境で生成した有機物や硫化鉄物が含まれ、長期的に酸性化する可能性も示唆された。

本報告では、東日本沿岸における津波堆積物の性状と地球化学的特性を中心に、津波堆積物に含有する重金属類や塩分の組成について表層土壌や海底堆積物と比較した結果について報告する。また、緊急調査の結果として得られた各種データを用いて環境リスクの評価を行い、震災に伴う土壌環境のリスク管理と津波堆積物の再利用に際してのリスク回避について述べる。

## 2. 津波堆積物の調査と試料採取

東日本沿岸の青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県および千葉県を対象にして、津波浸水域に蓄積された津波堆積物

を調査するとともに、各種分析のため試料の採取を行った。初期の予察調査は津波発生から3月から8月にかけて実施し、地形図をもとに沿岸域のおおよそ5 km間隔に採取地点を設定した。調査では津波浸水の状況、津波による地盤の変化、津波堆積物の性状を詳しく調べた。今回の調査対象は、主に自然由来の津波堆積物であり、人為的な汚染物質はできるだけ排除するようにした。



図1 津波堆積物の採取地点(宮城県、岩手県の沿岸地域)

東日本の沿岸地域で約200地点(おおむね、5 km間隔)を選定し、地理情報システムを用いてマッピングした。宮城県および岩手県内の調査地点を図1に示す。かなりの地域で津波被害により海岸線の地形が変化している箇所があったが、海岸線から浸水限界までのほぼ中間あるいは特徴的な堆積状態を示す地点で試料を採取した。採取した津波堆積物の試料は、人為的な混在物を除去するなどの前処理を行った後に、実験室において以下のような各種の分析を行った。

- 1) 塩分、pH、有害化学物質、重金属等の化学的分析
- 2) 微生物解析、長期変質、曝露特性などの生物的分析
- 3) 土質、粒度分布、強度特性などの物理的分析
- 4) 上記の各種分析データによる汚染リスク評価

### 3. 津波の被害状況と堆積物の性状

東日本大震災に伴う大津波は、これまでの想定を超える巨大なものであり、数百年に1度の災害と言われている。環境省の調査によれば、東北、関東6県内の津波堆積物の総量は、1000-1500万トンと推計されている<sup>1)</sup>。

宮城県内の地質調査により、実際に観察された津波堆積物は砂状が中心であるが、砂質と泥質の数枚の層状の構造を形跡することが認められた。このことは、津波が第一波から数波にわたり断続的に陸域方向に押し寄せ、その後陸域から沿岸域に引き波となったことを表している。また、詳しい調査によれば、海岸線付近では砂質、中間付近では泥質と砂質の互層、浸水限界では塩水のみが存在していることがわかった。



図2 宮城県地域における津波堆積物の性状

図2は、宮城県内の数カ所における津波の被害と津波堆積物の状況を示したものである。大津波により海岸付近の構造物が破壊され、陸域では強固な岩盤すら粉碎されて、その破壊威力の大きさを物語っている。また、巨大地震の影響で沿岸部の地盤が沈降して、一部では沿岸部の地形や標高が変化し、南三陸や石巻では水没現象が続いている地域も多い。そのため、津波堆積物の堆積状態は元の地形に依存し、田畑のような窪地や湿地帯では厚く堆積し、市街地などでは比較的

薄い堆積状況になっている。平均の堆積厚さは5-10cm程度であり、最大では40cm以上に及ぶ地点もあった。図2に示すように、堆積物の色彩は多様で、砂質ではグレー、泥質では茶褐色から黒色まで千差万別であった。また、砂質の粒度は比較的荒く、泥質は細かい粒子が大半を占めていた。

### 4. 津波堆積物の地球化学的特性

#### 4.1 塩分濃度と電気伝導度

採取した津波堆積物の化学的組成を調べるため、塩分濃度やpH、重金属成分を中心に化学分析を行った。図3にそれぞれ土壌pHと電気伝導度の分布を示す。土壌pHは6.5から11の範囲にあり、平均値は8から8.5となって塩水のpH環境をよく反映している。陸域の土壌pHは比較的酸性側にあることから、今回調査した津波堆積物は通常の土壌の組成とは大きく異なっていることがわかる。また、電気伝導度の測定結果からも同様の傾向を示し、平均的な塩分濃度は0.3から0.8%と、通常の土壌よりも高い塩分濃度を示した。0.5%を超える土壌では植物の生育阻害を生じる可能性があることから、塩害対策が必要となる地域もあった<sup>2)</sup>。

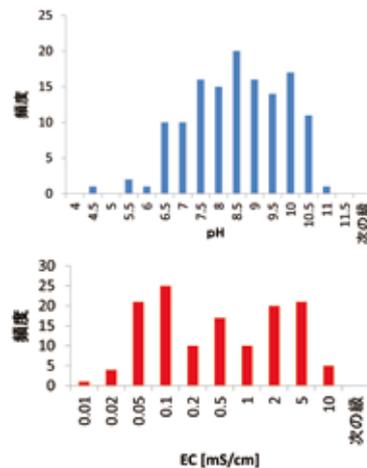


図3 津波堆積物の性状 (pH、電気伝導度)

#### 4.2 重金属成分

分析項目としては、鉛、カドミウム、セレン、ヒ素、クロム、水銀などの重金属、無機成分としてフッ素およびホウ素を分析した。全般的な傾向としては、公表している表層土壤環境基本図(宮城県地域)<sup>3)</sup>に示した組成とほぼ同様であり、バックグラウンドレベルと大差がないことが示された。しかし、重金属類の分析結果によれば、表1に示すようにヒ素、鉛の成分において通常の土壤よりも高濃度となる地点が多いのがわかった。宮城県内および岩手県内の沿岸部では、それぞれ21%と13%の試料が土壤環境基準値(ヒ素)を超過していた。東日本全体では、約15%の津波堆積物が基準値を超過していた。通常の土壤でも基準値を超える場合があるが、これらの超過率は土壤の場合よりもかなり大きくなっている。

表1 ヒ素および鉛の濃度範囲と基準超過率

県	総試料数	ヒ素		鉛	
		濃度範囲 [mg/dm <sup>3</sup> ]	超過件数 (超過%)	濃度範囲 [mg/dm <sup>3</sup> ]	超過件数 (超過%)
青森	19	QL-0.015	1 (5.3)	QL-0.14	1 (5.3)
岩手	38	QL-0.059	5 (13)	QL-0.026	1 (2.6)
宮城	38	QL-0.027	8 (21)	QL-0.011	1 (2.6)
福島	12	QL-0.0051	0	QL	0
茨城	20	QL-0.0048	0	QL-0.089	1 (5.0)
千葉	7	QL-0.012	1 (14)	QL	0
全体	134	QL-0.059	15 (11)	QL-0.14	4 (3.0)

特に、泥質の堆積物においてこの傾向が顕著なことから、津波堆積物の多くは海成堆積物に由来していることが示唆される。また、海洋の底質には海成堆積物を起源とするものや河川から流出した土砂が沿岸堆積物として蓄積され、土壤よりも高濃度のヒ素や鉛を含有していることが報告されている<sup>4)</sup>。また、沿岸部では環境条件が急速に変化する酸化還元フロントであることから、これらの元素が汽水域に集積しやすいと言われている。さらに、海成堆積物には海洋の微生物作用によりヒ素が高濃度で濃縮され、津波によって海洋堆積物や底質が巻き上げられ

て陸域に達したことも考えられる<sup>5)</sup>。

#### 4.3 表層土壤と津波堆積物の差異

沿岸部の表層土壤および津波堆積物の化学組成の比較を行った<sup>6)</sup>。図4に含有量試験(1N塩酸溶出試験)により得られた土壤および津波堆積物中の有害金属元素の頻度分布(ヒ素、鉛)を示した。

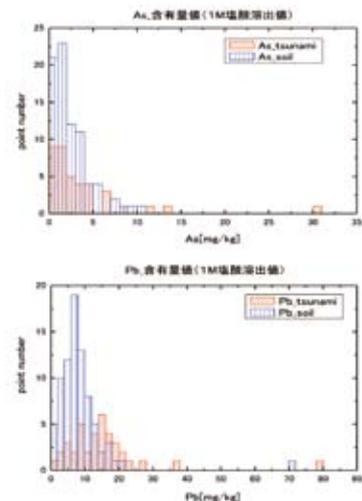


図4 土壤と津波堆積物の含有量の差異(ヒ素・鉛)

これらの項目は、宮城県内の土壤調査で局所的に高い分布が見られた元素である。沿岸域における鉛およびヒ素の含有量は、統計的に既存表層土壤より津波堆積物の方がやや高いことがわかる。いずれの元素に関する含有量値も環境基準値150mg/kgを超過するものではないが、津波堆積物により陸域に重金属が付加されていることが明らかである。一方、津波堆積物からのヒ素溶出量は既存土壤と同程度であり、鉛溶出量は津波堆積物が既存土壤よりも低い値を示した。両元素の溶出環境基準値は10ppbであり、特にヒ素に関しては沿岸部で高い溶出傾向を示した既存土壤と同様に津波堆積物からも基準値を超過する濃度が検出されている。津波堆積物は腐植物質に富み、海水影響で溶出時のpHは5.7

～10.2と全体にアルカリを示すものが多いのが特徴である。総じて津波堆積物は、既存土壌に比べてヒ素を現位置に留め、還元環境に移行した時に溶出しやすい特性をもつ。

#### 4.4 津波堆積物の長期変質と微生物作用

津波堆積物が蓄積されている陸域では、2011年9月から12月にかけて表面の性状が大きく変質していることが観察された。当初は砂質の土砂と大差がなかったが、数ヶ月の経過とともに赤褐色の堆積物となり、ため池や用水路では褐色の鉄分が溶出していることが示唆された。このような地域では、堆積物中の鉄やマンガンの含有量が高く、図5に示すように長期の堆積によって鉄酸化により変質が進行していることが考えられる。鉄



図5 津波堆積物の長期変質と生物的影響

などのミネラルは、河川から供給されて沿岸部の海岸線付近の底質に蓄積され、津波によって大量の鉄成分が陸域に巻き上げられたものと考えられる。海洋底質では嫌気的な環境であったが、陸域で酸化作用を受けることにより徐々に酸性化して赤褐色の土砂に変質したものと推定される。この変質には鉄酸化細菌が深く関与していることが考えられ、現在堆積物を対象にして微生物相の解析を進めている。

## 5. リスク評価および管理

### 5.1 重金属等によるリスクとその管理

採取した津波堆積物の化学成分のうち、ヒ素や鉛などの重金属類を対象にして環境リスク評価を行った。重金属を含む堆積物は、土壌摂取、土壌粒子の摂取、植物への移行、地下水への移行などの曝露経路を通じて作業員や居住者にとってのリスクとなる。そこで、産総研で開発した地圏環境リスク評価システム GERAS を用いて現在の堆積状況を想定したリスク評価を実施した<sup>7)</sup>。その結果、ヒ素については宮城県および岩手県の一部の地点において許容される曝露量をわずかに超過することが見出された。しかし、地下水の飲用などがなければ、許容されるリスク基準値(耐用摂取量)の以内であり、安全な管理条件にあることが判明した。このほか、沿岸部の特定の地域において、フッ素とホウ素の溶出量が基準値を調査する事例が見つかったが、健康リスク上問題となるレベルではなかった。図6は、ヒ素について上記のリスク評価の結果を図示したものである。表層土壌と比べて津波堆積物では、一部で相対的にリスク値が高い地域も見られるが、堆積物の安全な管理や地下水の飲用を制限することにより曝露を防止することが可能な状況である。

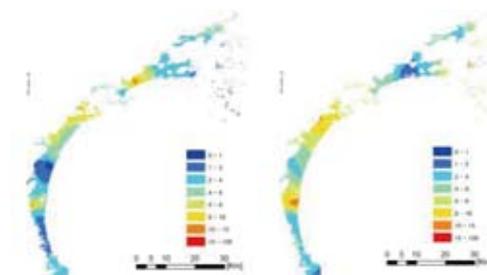


図6 宮城県沿岸におけるヒ素の溶出によるリスク  
 (左図: 表層土壌、右図: 津波堆積物)

一方、津波堆積物を長期的に保管・管理する環境条件では、ヒ素や鉛の長期溶出

のリスクがあるため、遮蔽のためのシートや粘土層の設置、浸出水の処理などのリスク管理が必要となる場合があった。特に、ヒ素を含有する津波堆積物では、長期保管により堆積層内が嫌気的な環境になり、ヒ素の溶出を促進する可能性が示唆された。また、微生物作用により長期的に鉄バクテリアの活性が高まり、土壌を酸性化する可能性も指摘された。津波堆積物を農用地に適用するためには、このような長期変質のリスクを十分に考慮した上で検討することが重要である。

## 5.2 災害廃棄物のリスク管理

最近になって環境省の調査<sup>9)</sup>により、重金属成分以外の項目でも災害廃棄物や津波堆積物に起因する土壤汚染があることが報告されている。もっとも頻度が多いのは鉱物油(灯油や軽油)および有機塩素化合物であり、大津波や地震による工場や事業場の被害に起因すると考えられている。このほか、震災時に火災などの燃焼が発生した箇所ではダイオキシン類なども検出され、これらの箇所では曝露を回避するためのリスク管理が必要である。

災害廃棄物の中には家電製品や工場の機材も含まれており、一時保管やリサイクルに使用された土地は汚染されている可能性がある。重金属等が中心であるが、有機塩素化合物やダイオキシンやPCBなどの複合汚染の事例も報告されている。特に、大規模な工場や事業場などが立地されている地域では、有害化学物質が流出した可能性があることから、敷地内だけでなく周辺環境も調査する必要がある。また、震災復興の再開発時に環境修復を同時に進めることが求められている。

## 5.3 建設資材としてのリスク管理

現在、津波堆積物の性状や物性、力学的特性や環境リスクなどの情報が不足し

ているため、現場において膨大な量の堆積物が一時保管されている。しかし、復旧・復興に向けて、津波堆積物が土木・建設資材や農業用途に利活用することが期待されている<sup>9)</sup>。砂質の津波堆積物の場合では、粒度分布や力学特性において土木・建設材料に適していると考えられる。しかし、塩分や無機成分などが多く含有する堆積物では、資材として活用するために除塩や洗浄などの処理が必要である。一方、泥質および互層の混合状態の堆積物では、ヒ素や鉛、有機汚染物質を含有する割合が多いため、そのままの状態で利活用することは困難である。しかも、化学的、生物学的に長期変質するリスクも伴うため、浄化やモニタリングなどの対策が必要である。膨大な量を対象とするため、微生物や植物を活用した環境共生型のオンサイト浄化技術の開発が期待される。加えて、油分やダイオキシン類などの人工化学物質を含有する堆積物では、それらの除去や分解のためのリスク低減措置の実施が必須である。

## 6. まとめ

東日本地方を襲った大津波後の3月から12月にかけて津波被災地の緊急調査を行い、様々な種類の津波堆積物を採取するとともに、その化学的、物理的な組成を分析した。津波堆積物は砂状が大半であったが、一部は細粒の泥質を含む砂泥互層を形成し、津波による海底堆積物の移動性の痕跡を残していた。一方では、泥質を含む津波堆積物にはヒ素や鉛などの重金属類を多く含有するものがあり、その管理には十分な留意が必要であることが分かった。さらに、海洋底質を起源とする津波堆積物では、嫌気的な環境で生成した有機物や硫化鉱物が含まれ、長期的に酸性化する可能性も示唆された。しかし、重金属等の含有が少なく、物理

.....

的に安定な津波堆積物は建設材料として復興活動に利活用できる可能性が大きいことも判明した。

#### 参考文献

1. 環境省：東日本大震災津波堆積物処理指針、平成23年7月13日、(2011)
2. 日本土壌肥料学会、原発事故・津波関連情報、津波による農地の塩害、(2011)
3. 原 淳子ほか：表層土壌評価基本図（宮城県地域）、地質調査総合センター、数値地質図 E-3、(2008)
4. 土屋範芳ほか：津波堆積物中のヒ素および重金属類と津波堆積物の化学判別、東北大学第6回震災フォーラム、(2012)
5. 駒井 武ほか、東日本沿岸における津波堆積物の性状に関する緊急調査 - 津波堆積物に起因する土壤汚染リスク -、GSJ 地質ニュース、1(6)、(2012)
6. 川辺能成ほか、東日本大震災における津波堆積物中の重金属類とそのリスク、土木学会論文集 G（環境）、68(3)、東、68(3)、195-202、(2012)
7. 駒井 武：土壤汚染対策の課題と環境地質学の役割、地学雑誌、116、853-863、(2007)
8. 環境省：津波堆積物の性状（参考資料）、平成23年9月1日、(2012)
9. 一般社団法人廃棄物資源循環学会：津波堆積物処理指針、平成23年7月5日