

## 土壌汚染リスク調査 Survey for risk assessment of soil contamination

駒井 武<sup>1,2</sup>・川辺能成<sup>1</sup>・原 淳子<sup>1</sup>・宮崎晋行<sup>1</sup>・張 銘<sup>1\*</sup>  
Takeshi Komai<sup>1,2</sup>, Yoshishige Kawabe<sup>1</sup>, Junko Hara<sup>1</sup>, Kuniyuki Miyazaki<sup>1</sup> and  
Ming Zhang<sup>1\*</sup>

**Abstract:** A huge amount of tsunami deposits remain after the large earthquake and tsunami occurred on March 11, 2011. This event may induce a possibility of environmental pollution, particularly in the environment of soil and sediments around coastal areas of eastern Japan. Therefore a geochemical survey and investigation for soil contamination risk was carried out, to make clear the risk level caused by tsunami event and its deposits. First more than 200 points of soil and sediment samples were selected on the basis of tsunami event hazard and topography features. Samples were analyzed by means of chemical and physical methods to establish a database for evaluating the environmental risk. Various kinds of tsunami deposits were observed at the coastal areas, some of them are sandy sediments and others are muddy with much clay components. The result of chemical analysis showed that some portions of deposits contain a little higher content of arsenic and lead, but their concentrations are comparable with, normal subsurface soils. Environmental risk assessment by using self-developed GERAS system indicated that tsunami deposits sampled around north Miyagi and Iwate pref. have relatively higher risk level. In this case some kind of risk management is necessary for their storage and utilization. Other amount of deposits and soils can be safely used for reconstruction activity because of acceptable risk level. In the analysis of physical properties of deposits, a series of database were developed for particle distribution, soil and clay components, and content of organic matters. The behaviors of biological effects and aging trend in terms of components of tsunami deposits with sulfide minerals were clarified by the precise investigation by a long term testing method.

**Keywords:** tsunami, marine sediment, risk assessment, heavy metals, physical property

### 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を含む土壌は、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、その地質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1カ年余りにわたり津波被災地の緊急調査を行い、様々な種類の津波堆積物や土壌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粒子が主体であったが、一部は細粒の泥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、細かい粒子の泥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。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。一方、重金属類や

粘土成分の含有量が少なく、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活用できる可能性が大きいことも判明した。

報告では、東日本沿岸における津波堆積物の性状と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、上記の調査結果に基づいて、津波堆積物の移動性のシミュレーションを実施し、沿岸域と陸域における津波堆積物の物質移動について検討する。さらに、土壌汚染リスク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、表層土壌評価基本図を活用した比較調査を実施するとともに、震災に伴う複合地質リスクの管理と津波堆積物の再利用に際してのリスク低減について検討する。

### 2. 調査の目的と検討項目

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。しかし、今回のような大津波の痕跡は沿岸地域の地層中にも残されており、その頻度や規模については不

本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成25年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである

\*Corresponding author

1. 地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, AIST)

2. 現所属：東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

明な点も多い。そこで、土壌汚染リスク調査においては、今回の津波で発生した津波堆積物および過去の堆積物も調査の対象にした。

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後の約半年にかけて実施し、地形図をもとに沿岸域のおおよそ5km間隔に採取地点を設定した。その後の詳細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。

東日本の沿岸地域において採取地点を選定して、地理情報システムを用いてマッピングした。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、実験室において化学分析、微生物分析、粒度分析などを実施した。

実際に観察された津波堆積物の性状を第1図に示す。津波堆積物は主に砂粒子で構成されるが、砂と泥の数枚の層状の構造を形跡する場合があることが確認された。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、中間付近では泥と砂の互層、浸水限界では塩水のみが存在していることがわかった。

採取した津波堆積物について、その性状を詳しく観察するとともに、化学特性、物理特性および生物特性に関する分析を行った。また、集積された各種の分析結果やデータをもとに環境リスク評価および数値シミュレーションを実施し、表層土壌基本図の改訂作業を進めた。以下、これらの調査および検討の結果について述べる。

- 1) 津波堆積物および土壌の調査
- 2) 津波堆積物の化学分析とリスク評価
- 3) 津波堆積物の物理特性
- 4) 津波堆積物の移動特性に関する解析・評価
- 5) 表層土壌環境基本図（宮城県地域）の部分改訂

### 3. 過去の津波堆積物の調査および化学的特性

#### 3.1 過去の堆積物の調査と採取

##### 3.1.1 過去の堆積物の調査と採取

既往資料（澤井ほか, 2008）から貞観津波による堆積物が厚く分布する箇所を選び、予察によって掘削に支障がないことを確認して掘削地とした。各地区において選定した掘削地は次のとおりである。

- ① 仙台市若林区荒井地区（AI）
- ② 仙台市若林区荒浜地区（AH）
- ③ 名取市植松地区（UM）



第1図 宮城県内の沿岸部における津波堆積物の性状

Fig.1 Characteristics of tsunami deposits observed at coastal areas of Miyagi Pref.

- ④ 亙理町長瀬地区 (NT)
- ⑤ 山元町山寺地区 (YT)

3. 1. 2 過去の堆積物の調査と採取

地層採取は、パーカッション式の採土器を使用し、孔径 86 mm, コア径 70 mmの試料を採取した。掘削したコアは型くずれしないよう半割りにした塩ビパイプに入れ、長さ 1m×3 列のコア箱に収めた。採取したコア(第 2 図)は作業所まで運搬し、半割りした後、一方を保管用としてラップで密封し、もう一方について写真撮影と縮尺 1/5 で地質記載を行った。

3. 2 過去の津波堆積物の化学的特性

東北大学大学院環境科学研究科において、仙台平野で採取したボーリングコア(7 地点)に含まれる津波堆積物の化学的特性を検討した。そして、貞観津波(AD869)により形成された津波堆積物および上下の泥質堆積層について試料を採取し、蛍光 X 線による無機化学データを取得した。そして、これらのデータにより津波堆積物判定のための化学的特性を明らかにした。

3. 3 過去の津波堆積物からの長期的な重金属類の溶出特性

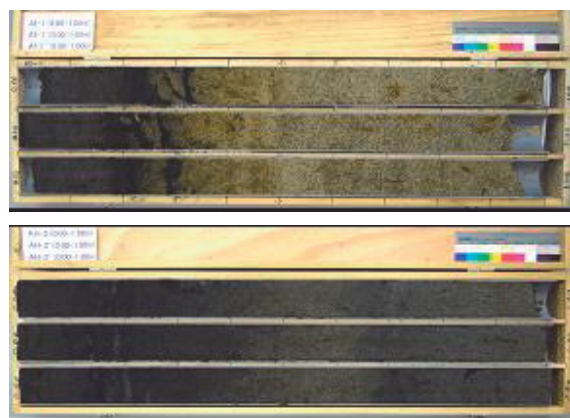
波堆積物からの長期的なヒ素、鉛の溶出挙動と土壌の酸性化および上記化学成分挙動における微生物活動の相関について検討した。

第 3 図に 84 日間における長期溶出試験における pH 変化、ヒ素溶出値を示す。pH については、初めから酸性性を示している場所が多くなっていった。また、ヒ素溶出値については、多くの場合でほとんど溶出が認められなかったが、溶出値が大きい AH 地区については時間の経過とともに溶出値が小さくなった。これは、酸素が存在する状態で溶出試験を行っており、一緒に溶出した鉄が沈殿する際に共沈したものと考えられる。なお、鉛についてはほとんど溶出が認められなかった。また本試験には、土壌からの重金属類溶出に関与する鉄酸化細菌や硫酸化細菌についても細菌数を測定したが、溶出と有意な相関は認められなかった。

4. 東日本大震災による津波堆積物の化学分析とリスク評価

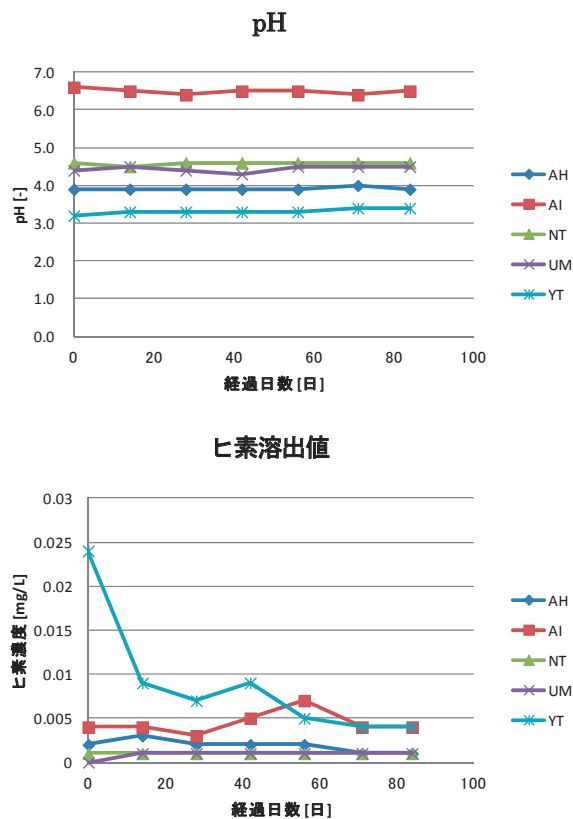
4. 1 表層堆積物の土壌汚染調査

試料採取地点は、青森県六ヶ所村を起点とし、南に約 5km 毎に津波堆積物試料を採取(福島第一原子力発電所 30km 圏内は除く)した。試料採取地点は青森県 19 地点、岩手県 38 地点、宮城県 36 地点、福島県 10 地点、茨城県 20 地点、千葉県 7 地点の合計 131 地点(第 1 表)で 134 試料を採取した。



第 2 図 採取した過去の津波堆積物のコア試料(上: 仙台市新井地区, 下: 仙台市荒浜地区)

Fig.2 Core samples of ancient tsunami deposits. (upper: Arai, Sendai, lower: Arahama, Sendai)



第 3 図 過去の津波堆積物からの長期的な重金属類の溶出傾向(上: pH 変化, 下: ヒ素溶出値)

Fig.3 Long-term leaching tendency of heavy metals from ancient tsunami deposits. (upper: pH, lower: arsenic)

第1表 津波堆積物試料採取地点  
Table 1 Sampling points of tsunami deposits.

青森県		岩手県	
NO.	ポイント範囲	NO.	ポイント範囲
S001	六ヶ所村泊漁港周辺	S020	洋野町鹿糠周辺
S002	六ヶ所村泊付近	S021	洋野町八木港周辺
S003	六ヶ所村棚沢川河口付近	S022	久慈市夏井川河口付近
S004	六ヶ所村老部川河口付近	S023	久慈市久慈川河口付近
S005	六ヶ所村尾敷浜周辺	S024	久慈市久喜浜付近
S006	六ヶ所村むつ小川原港周辺	S025	野田村野田周辺
S007	六ヶ所村高瀬川河口付近	S026	野田村安家川河口付近
S008	三沢市天ヶ森周辺	S027	普代村普代川河口付近
S009	三沢市塩釜周辺	S028	田野畑村羅賀周辺
S010	三沢市六川目周辺	S029	田野畑村松前川河口付近
S011	三沢市淋代周辺	S030	岩泉町小本川河口付近
S012	三沢市港町周辺	S031	宮古市撰待川河口付近
S013	おろらせ町二丁目周辺	S032	宮古市田老川河口付近
S014	おろらせ町奥入瀬川河口付近	S033	宮古市女遊戸周辺
S015	八戸市北沼周辺	S034	宮古市宮古港周辺
S016	八戸市馬淵川河口付近	S035	宮古市津軽石川河口付近
S017	八戸市陸奥白浜駅周辺	S036	宮古市重茂川河口付近
S018	八戸市大蛇駅周辺	S037	宮古市千鶴川河口付近
S019	階上町道仏周辺	S038	山田町山田港周辺
		S039	山田町船越周辺
		S040	山田町小谷島周辺
		S041	大槌町浪板海岸周辺
		S042	大槌町大槌港周辺
		S043	釜石市片岸町周辺
		S044	釜石市甲子川河口付近
		S045	釜石市平田周辺
		S046	釜石市片瀬川河口付近
		S047	大船渡市三陸町吉浜川河口付近
		S048	大船渡市三陸町浦浜川河口付近
		S049	大船渡市三陸町野々前漁協周辺
		S050	大船渡市三陸町綾里川河口付近
		S051	大船渡市猪川町中井沢周辺
		S052	大船渡市細浦駅周辺
		S053	大船渡市小友周辺
		S054	陸前高田市広田町天王前周辺
		S055	陸前高田市米崎町川崎周辺
		S056	陸前高田市高田町大石沖周辺
		S057	陸前高田市長部川河口付近
		福島県	
		NO.	ポイント範囲
		S094	新地町埜木崎周辺
		S095	新地町駒ヶ嶺周辺
		S096	相馬市岩子周辺
		S097	相馬市柏崎周辺
		S098	南相馬市鹿島区北屋形周辺
		S099	いわき市久之浜町久之浜周辺
		S100	いわき市四倉町上仁井田周辺
		S101	いわき市平下高久周辺
		S102	いわき市平豊間周辺
		S103	いわき市永崎小周辺
		S104	いわき市勿来町九面周辺
		茨城県	
		NO.	ポイント範囲
		S105	北茨城市大津港周辺
		S106	北茨城市花園川河口付近
		S107	高萩市関根川河口付近
		S108	高萩市花貫川河口付近
		S109	日立市川尻海岸周辺
		S110	日立市河原子港周辺
		S111	日立市水木周辺
		S112	ひたちなか市阿字ヶ浦周辺
		S113	水戸市那珂川河口付近
		S114	大洗町大貝海岸周辺
		S115	鉾田市荒地周辺
		S116	鉾田市滝浜周辺
		S117	鉾田市大竹周辺
		S118	鉾田市上沢周辺
		S119	鹿嶋市浜津賀周辺
		S120	鹿嶋市荒野周辺
		S121	鹿嶋市下津周辺
		S122	神栖市柳川周辺
		S123	神栖市矢田部周辺
		S124	神栖市波崎周辺
		宮城県	
		NO.	ポイント範囲
		S058	気仙沼市唐桑町只越周辺
		S059	気仙沼市唐桑町宿浦周辺
		S060	気仙沼市南郷周辺
		S061	気仙沼市最知駅周辺
		S062	気仙沼市本吉町大谷海岸周辺
		S063	気仙沼市本吉町津谷川河口付近
		S064	南三陸町歌津馬場周辺
		S065	南三陸町志津川小森周辺
		S066	南三陸町戸倉水戸辺周辺
		S067	南三陸町戸倉下道周辺
		S068	石巻市北上町橋浦周辺
		S069	石巻市針岡周辺
		S070	石巻市雄勝町雄勝周辺
		S071	女川町女川浜周辺
		S072	石巻市桃浦周辺
		S073	石巻市野々浜周辺
		S074	石巻市竹浜周辺
		S075	石巻市網倉浜周辺
		S076	石巻市谷田浜周辺
		S077	石巻市小瀬浜周辺
		S078	石巻市鮎川浜周辺
		S079	石巻市渡波周辺
		S080	石巻市三ツ股周辺
		S081	東松島市大曲周辺
		S082	東松島市矢本周辺
		S083	東松島市吉田川河口付近
		S084	東松島市大塚周辺
		S085	仙台市宮城野区福室周辺
		S086	仙台市若林区荒浜周辺
		S087	名取市小塚原周辺
		S088	名取市杉ヶ袋周辺
		S089	岩沼市早股周辺
		S090	亶理町荒浜周辺
		S091	亶理町吉田周辺
		S092	亶理町山寺周辺
		S093	山元町高瀬周辺
		千葉県	
		NO.	ポイント範囲
		S125	銚子市君ヶ浜周辺
		S126	旭市菰園周辺
		S127	旭市井戸野周辺
		S128	匝瑳市川辺周辺
		S129	横芝光町粟山川河口付近
		S130	山武市本須賀周辺
		S131	九十九里町作田川河口付近

#### 4. 2 地球化学的評価 (川辺ほか, 2012)

第2表(a)に津波堆積物に含まれる重金属類の溶出量および含有量の結果を示す。溶出量はヒ素および鉛で環境基準値(両物質とも0.01 mg/L)を超過する試料があったものの、それ以外の重金属では基準を超過した事例は認められなかった。また、第2表(b)に都道府県別のヒ素および鉛の溶出量の結果を示すが、全134試料中で環境基準値を超過した試料はヒ素で15試料(11%)、鉛で4試料(3.0%)であった。ただしその濃度の範囲はヒ素の場合ほとんどの試料で基準値の2倍(0.02 mg/L)より小さく、鉛の場合でも高くても15倍程度であった。都道府県別では試料数の少ない千葉県を除いて宮城県のヒ素が8試料(21%)、岩手県のヒ素が5試料(13%)と割合が多くなっており、特に宮城県におけるヒ素の溶出量が多い傾向が認められた(第4図)。

含有量についてはほとんど全ての試料で基準値を下回っていた。なお、今回採取した津波堆積物のpHの平均値は8.3(範囲4.3-10.7)、電気伝導率の幾何平均値は1.1 mS/cm(範囲0-7.1 mS/cm)であった。

#### 4. 3 環境リスクの評価 (川辺ほか, 2012)

国土地理院(2011)によると本震災における浸水範囲の土地利用構成率は農用地や居住地など人の活動範囲に多くの津波堆積物が堆積した。これら堆積物に含まれる重金属類のリスクを適切に評価するためには、環境基準値だけではなく曝露を基にした評価が重要となっ

てくる。そこで、前述した津波堆積物中の重金属類(ヒ素、鉛、カドミウムおよびクロム)含有量と溶出量を用いて曝露量を推定し、リスク評価を行った。

リスク評価では、曝露期間を子供(0-6歳)、大人(7-70歳)までの70年間とし生涯曝露量を推定(Rikken et al., 2001)した。曝露経路については直接経路として土壌摂食および土壌吸入を、間接的経路として地下水飲用を考慮した。曝露評価においてヒトに関するパラメータについては、土壌中のダイオキシン類に関する検討会(環境省, 1999)の値に基づいた値を用いた。そして、世界保健機関(WHO)より設定されている暫定一週間耐容摂取量(PTWI)あるいは参照容量(Reference Dose: RfD)と比較することによりリスク評価を行った。

第3表に各重金属類のヒトへの生涯曝露量を示す。幾何平均値で整理すると生涯曝露量はヒ素で $1.4 \times 10^{-2}$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ 、鉛で $8.1 \times 10^{-3}$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ 、カドミウムで $4.6 \times 10^{-3}$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ 、クロムで $8.9 \times 10^{-3}$   $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ となった。

これらの生涯曝露量について世界保健機関(WHO)より設定されている暫定一週間耐容摂取量(PTWI)から耐容一日摂取量(TDI)や参照容量(RfD  $3 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ ) (U. S. EPA, 1998)と比較した。第4表にリスク値に対する全曝露量の割合およびリスク評価の結果を示す。本表より土壌摂取量など曝露評価に関するパラメータを安全側に設定して評価した場合でも、リスク値に対する全曝露量の割合の幾何平均値は1%未満であった。以上のことより、

第2表 津波堆積物中の重金属類

Table 2 Heavy metal concentration in tsunami deposits.

(a) 溶出量および含有量.

溶出値 [mg/L]

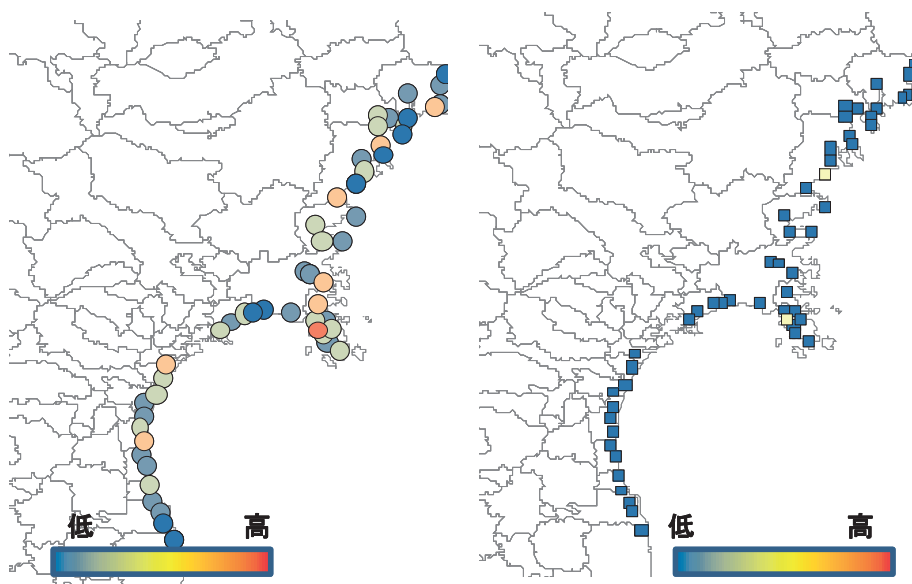
重金属類	ヒ素	鉛	カドミウム	全クロム
濃度範囲	0-0.059	0-0.14	0-0.0067	0-0.037
幾何平均	0.0024	0.0015	0.001	0.0012

含有量 [mg/kg]

重金属類	ヒ素	鉛	カドミウム	全クロム
濃度範囲	0.19-30	0.7-770	0-5.9	0-33
幾何平均	1.1	6.7	0.064	1.7

(b) 都道府県別のヒ素および鉛の溶出量.

都道府県		青森	岩手	宮城	福島	茨城	千葉	全体
重金属	検体数	19	38	38	12	20	7	134
ヒ素	濃度範囲 [mg/L]	0-0.015	0-0.059	0-0.027	0-0.0051	0-0.0048	0-0.012	0-0.059
	超過件数	1	5	8	0	0	1	15
鉛	濃度範囲 [mg/L]	0-0.14	0-0.026	0-0.011	0	0-0.089	0	0-0.14
	超過件数	1	1	1	0	1	0	4



第4図 宮城県沿岸津波堆積物におけるヒ素濃度分布 (左) とそのリスク評価 (右)

Fig.4 Arsenic concentration distribution (left) and risk evaluation (right) for the tsunami sediments in the Miyagi coastal area.

第3表 津波堆積物中の重金属類のヒトへの曝露量の推算値

Table 3 Estimation of human exposure to heavy metals from tsunami deposits.

重金属類	項目	生涯曝露量
ヒ素	曝露量 [ $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ ]	$4.8 \times 10^{-3} - 2.8 \times 10^{-1}$
	幾何平均値	$1.4 \times 10^{-2}$
鉛	曝露量 [ $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ ]	$1.8 \times 10^{-3} - 8.1 \times 10^{-1}$
	幾何平均値	$8.1 \times 10^{-3}$
カドミウム	曝露量 [ $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ ]	$3.4 \times 10^{-3} - 3.0 \times 10^{-2}$
	幾何平均値	$4.6 \times 10^{-3}$
クロム	曝露量 [ $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ ]	$4.8 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-1}$
	幾何平均値	$8.9 \times 10^{-3}$

第4表 津波堆積物中の重金属類のヒトへのリスク推定

Table 4 Estimation of human risk of heavy metals from tsunami deposits.

ヒ素	鉛	カドミウム	クロム
全曝露量 / リスク値 [%]	全曝露量 / リスク値 [%]	全曝露量 / リスク値 [%]	全曝露量 / リスク値 [%]
0.22-13	0.18-11	0.34-3.0	0.16-5.7
幾何平均	幾何平均	幾何平均	幾何平均
0.67	0.81	0.46	0.29
リスク件数	リスク件数	リスク件数	リスク件数
1	1	0	0

津波堆積物に含まれる重金属類による土壌の直接摂食および井戸水摂取によるヒトへの健康リスクはそれほど大きくないものと推測された。

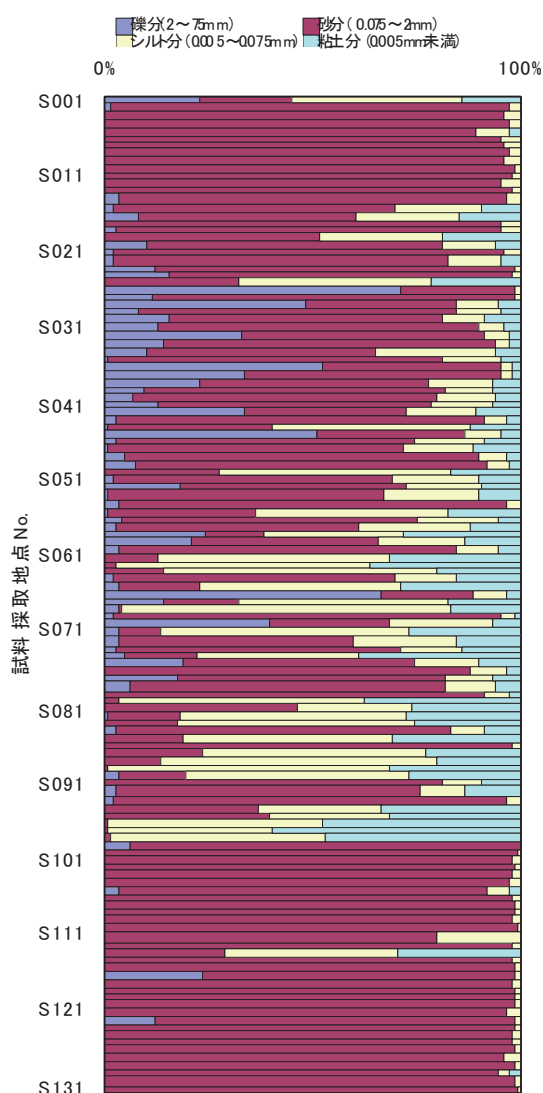
### 5. 津波堆積物の物理特性

#### 5.1 津波堆積物の粒度

採取した津波堆積物の物理的・化学的性質を把握し、土の工学的分類の指標を与えるため、第1表に示した131地点より採取した津波堆積物試料について、JIS A 1204:2009に基づく土の粒度試験(ふるい分析と沈降分析)を実施した。

第5図に粒度試験（ふるい分析と沈降分析）より得られた結果を示す。全ての試料は、石分（粒径 75 mm 以上）を含んでおらず、礫分（粒径 2 ~75 mm）、砂分（粒径 0.075~2 mm）、シルト分（粒径 0.005~0.075 mm）、粘土分（粒径 0.005 mm 未満）により構成されていた。多くの試料で砂分が多くを占めていることがわかった。詳細に見ると、礫分は地点 S014 以南 S078 以北で比較的多く含まれており、シルト分や粘土分は S050 以

南 S098 以北で比較的多く含まれることがわかった。S100 以南ではほとんどの試料で、砂分が 95%以上を占めていた。第5表に地盤材料の分類名とそれぞれに分類される試料の数を示す。全 131 試料のうち、約 3 分の 1 が「分級された砂 (SP)」に分類され、最も多かった。特に、青森県や福島県いわき市以南で採取されたほとんどの試料は、「分級された砂」に分類された。



第5図 津波堆積物の粒度

Fig.5 Particle size distribution of tsunami deposit samples.

第5表 津波堆積物試料の分類

Table 5 Classification of tsunami deposit samples.

地盤材料の分類名	分類記号	試料数	地盤材料の分類名	分類記号	試料数
分級された砂	SP	44	細粒分礫まじり砂	S-FG	3
細粒分質砂	SF	18	細粒分まじり砂質礫	GS-F	3
砂質細粒土	FS	15	細粒分まじり礫質砂	SG-F	2
礫まじり細粒分質砂	SF-G	8	砂礫質細粒土	FSG	1
細粒分まじり砂	S-F	7	粒径幅の広い砂質礫	GWS	1
細粒分質礫質砂	SFG	7	砂まじり礫質細粒土	FG-S	1
細粒土	F	7	細粒分質砂質礫	GFS	1
分級された礫まじり砂	SP-G	4	分級された砂質礫	GPS	1
砂まじり細粒土	F-S	4	礫まじり砂質細粒土	FS-G	1
分級された礫質砂	SPG	3			

5.2 津波堆積物の強熱減量

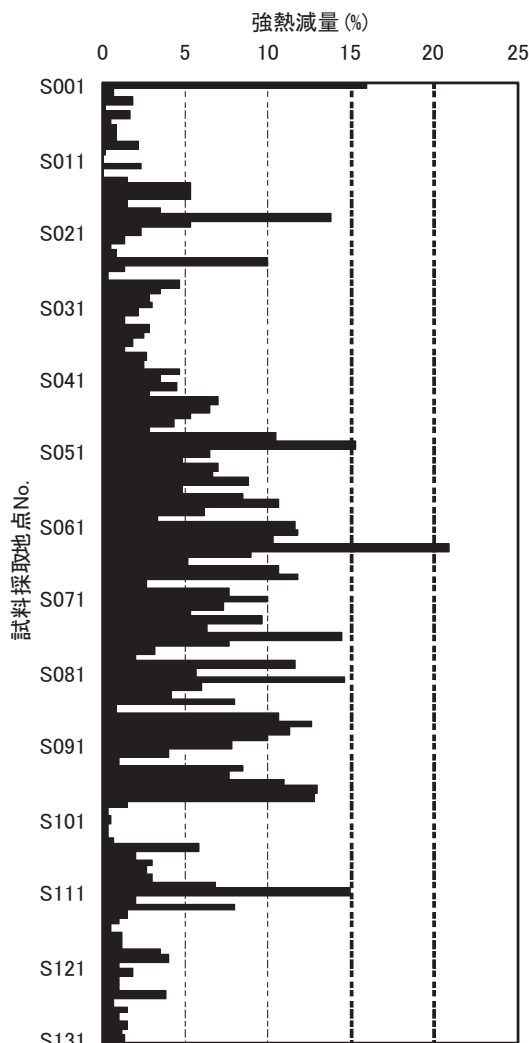
採取した津波堆積物中の高有機質土などの有機物含有量や無機質系の土の風化度合、鉍物組成の目安とするため、第1表に示した131地点より採取した津波堆積物試料について、JIS A 1226:2009に基づく土の強熱減量試験を実施した。

第6図に強熱減量試験より得られた結果を示す。強熱減量は平均して約5%であったが、試料採取地点によってばらつきが大きかった。詳細に見ると、S027以南S100以北において、比較的大きな強熱減量を示す地点が多いことがわかった。

5.3 津波堆積物の土粒子密度

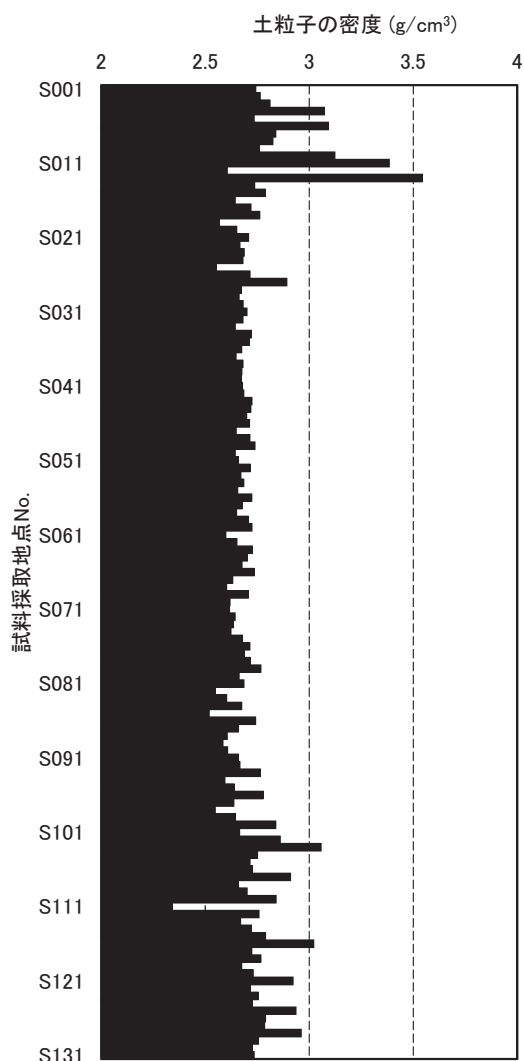
採取した津波堆積物の工学的分類の指標を与え、力学的性質の推定、建設材料としての適性の判定や掘削工・基礎工などの施工法の決定に用いる基礎的なデータを得るため、第1表に示した131地点より採取した津波堆積物試料について、JIS A 1202:2009に基づく土粒子の密度試験を実施した。

第7図に土粒子の密度試験より得られた結果を示す。土粒子の密度は、S013以北およびS103以南で3 g/cm<sup>3</sup>を超える地点がいくらか見られるものの、ほとんどの地点で2.5~2.8 g/cm<sup>3</sup>の範囲内であり、一般的な無機質の鉍物の密度と同等であった。土粒子の密度は、有機質分で構成される泥炭などでは1.4~2.3 g/cm<sup>3</sup>と低い値になることが知られている。地点S111の土粒子の密度は2.3 g/cm<sup>3</sup>と比較的低いが、これは第6図からわかるように、地点S111の強熱減量が比較的高いこと、すなわち、有機物含有量を比較的多く含んでいることに起因するものと思われる。一方、強熱減量0.1%未満であった2地点S011およびS013の土粒子の密度は、それぞれ3.4 g/cm<sup>3</sup>および3.5 g/cm<sup>3</sup>であり、比較的高くなっていた。



第6図 津波堆積物の強熱減量  
Fig.6 Ignition loss of tsunami deposit samples.





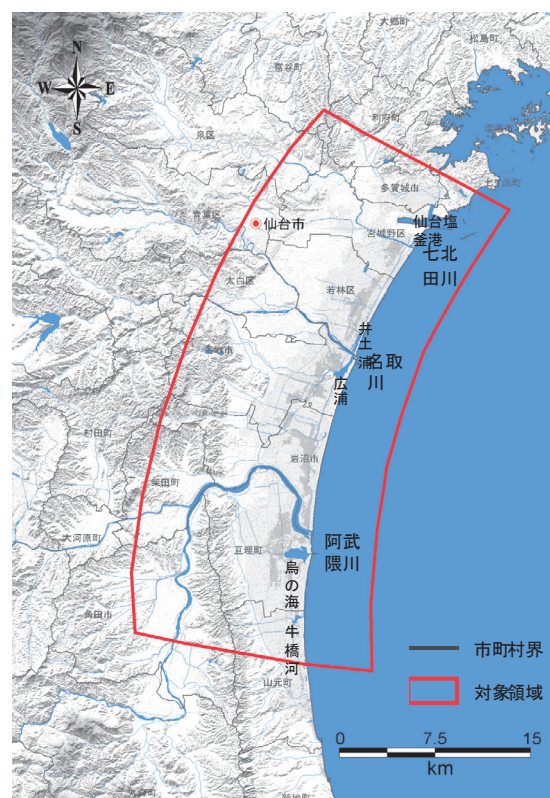
第7図 津波堆積物の土粒子密度  
Fig.7 Density of soil particles of tsunami deposit samples.

## 6. 津波堆積物の移動特性に関する解析・評価

採取した津波堆積物の物性および地形、土地利用、河川流量、津波波形などの収集情報に基づき、津波氾濫による水・土砂の輸送解析の手法および解析結果を報告する。

### 6.1 解析手法

解析対象領域は、仙台平野の津波浸水域を含む七北田川下流から阿武隈川下流域にかけての内陸域および近海域約 800km<sup>2</sup> の範囲（第 8 図）とし、構築する格子モデルを 200～300 万程度に設定した。解析には、水・混合粒径土砂の連成解析が可能な統合型水循環シミュレーションシステム GETFLOWS を用い、最大引き波時の海

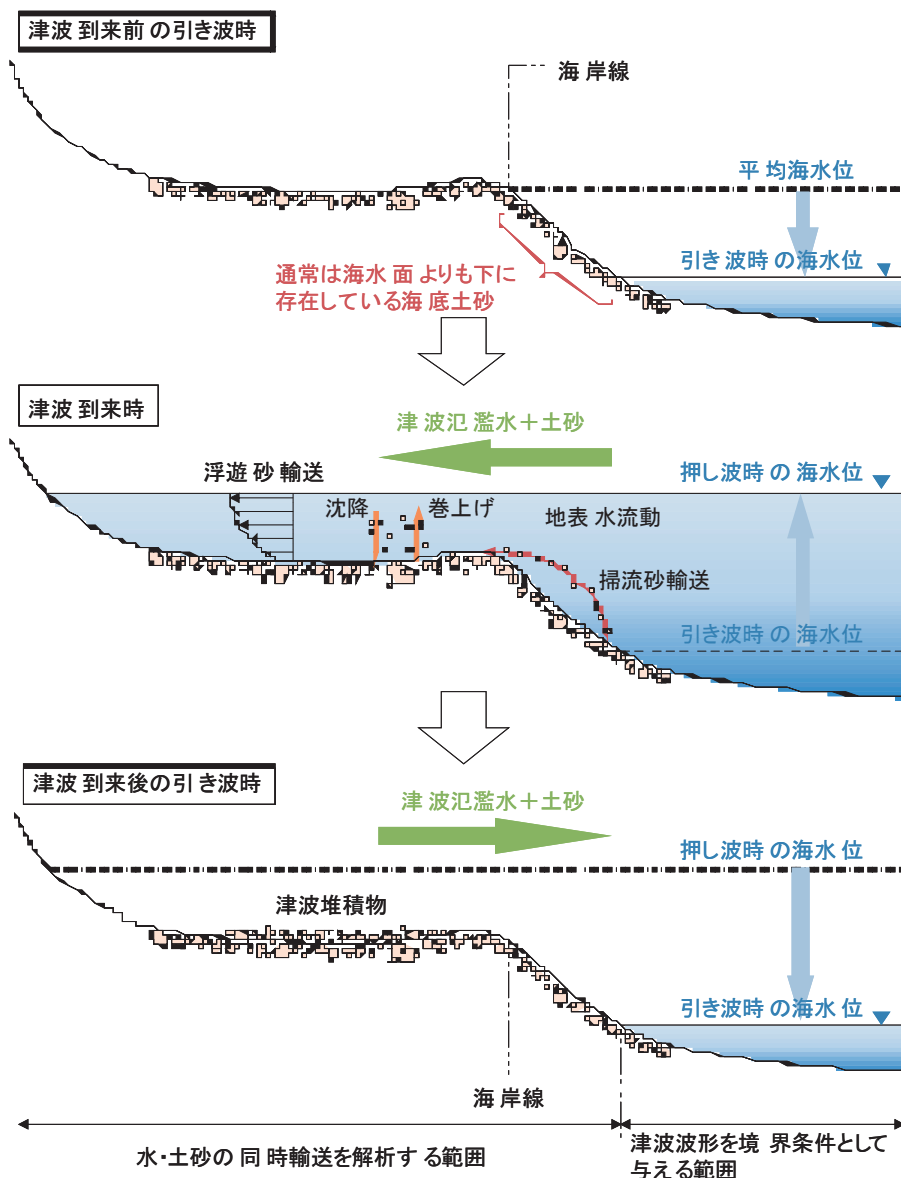


第 8 図 解析対象領域  
Fig.8 Numerical analysis area.

水位より標高の低い範囲に対して津波波形を境界条件として与え、内陸沿岸域に対する影響を解析した。本解析で考慮する土砂の輸送形態は、混合粒径砂による掃流砂および巻上げ・沈降を伴う浮遊砂とし、粘土やシルトなど粘着性物質の団粒形成・輸送は考慮しないものとした（第 9 図）。また、津波氾濫時に輸送された人工構造物との相互作用も無視した。数値解析における空間離散化には、積分型有限差分法を用い、時間離散化にはニュートン・ラプソン法を適用した。

### 6.2 解析条件

津波堆積物は、現地調査から得られた堆積物の主要粒度範囲（粘土～中砂）を考慮し、粒径は地盤工学会基準の粒度範囲の中央値を各々採用した。初期条件として領域全域の初期水位を 0m に設定し、阿武隈川、名取川、広瀬川、七北田川の上流からの流量を各々 38.8 (m<sup>3</sup>/s)、10.7 (m<sup>3</sup>/s)、7.4 (m<sup>3</sup>/s)、3.0 (m<sup>3</sup>/s) と与え、最大引き波時の海水位より標高の低い範囲に対して津波波形を境界条件として与えた。解析で与えた津波波形はいわき市小名浜における長期観測データを相馬地点の最大振幅および周期を用いてスケールリングした擬似波形とした。解析モデルの詳細条件および地形・表層被覆データ等については第 6 表に示す。



第9図 津波氾濫時の水・土砂輸送プロセス概念図

Fig.9 Migration process of water and soils during tsunami attack.

### 6.3 津波堆積物の輸送解析結果

数値解析で得られた津波氾濫による海水の浸水エリア結果を第10図に示す。国土交通省で公開している今回の解析対象範囲の浸水範囲概況図と比べ、本解析による津波の浸水範囲はほぼ一致する結果が得られており、数値解析における水輸送のモデル化が東日本大震災時の津波を的確に表現していることが確認された。この水輸送解析に土砂交換層の厚さを1m、解析領域に粒度分布を一律に与え、阿武隈川河口域でのみ一律の粒度分布から中砂/細砂/シルト/粘土比=40/40/10/10に設定し、混合粒径土砂の輸送解析を連成させた計算結果

が第11図である。解析結果は土砂が内陸に向かって細粒化する傾向や津波浸水域よりも狭い範囲で砂層が堆積する点が現地調査の結果とよい整合を示した。また、津波堆積物の性状調査結果では、数cm程度の明瞭な砂層として津波堆積物が確認されたのは海岸線から2.5km程度であるとされており、解析結果の中砂・細砂の堆積範囲と整合する結果が得られた。一方、堆積量としては現場調査結果よりも2倍程度大きい結果を示した。堆積量は、土砂交換層の厚さを変動させることで変化するが、厚く設定すると広範囲で標高0mを下回る結果になってしまう。2011年7月22日の日本経済新聞(夕刊)にお

第6表 解析モデルの詳細条件および地形・表層被覆データ参考リスト  
Table 6 Parameter set of detail models and data list of geological formation.

項目	基本仕様	
地表水流動	マニング型の平均流速公式を適用した開水路流れ（拡散波近似）	
土砂輸送	粒度分布	0.55mm, 0.15mm, 0.05mm, 0.001mm (中砂, 細砂, シルト, 粘土)
	掃流砂	限界掃流力の評価は Egiazaroff の式 (Egiazaroff,1965) に基づく 芦田・道上の無次元掃流砂量式 (芦田・道上,1972)
	浮遊砂	乱流状態の平均的な振る舞いを記述した移流拡散方程式 巻上げ量・沈降量はそれぞれ板倉・岸の式 (Itakura and Kishi, 1980) , Lane-Kalinske の濃度分布式 (Lane and Kalinske, 1941) に基づく 沈降速度は Rubey の式 (Rubey, 1933) に基づく
地形変動	土砂輸送に伴う地盤床の標高変化を考慮	
基本条件	解析領域	約 800km <sup>2</sup> (20km×40km)
	解析格子数	2,847,240
	水平解像度	10m
地形	陸域	国土地理院基盤地図情報 5m, 10m メッシュ (標高) (国土地理院基盤地図情報) 仙台平野における地殻変動量 (国土地理院) を考慮 河川堤防, 河床標高 (国土交通省東北地方整備局, 2007 ; 国土交通省河川局, 2006 ; 国土交通省第 2 回河川津波対策検討会, 2011)
	海域	日本海洋データセンターJ-EGG500 (日本周辺 500m メッシュ海底地形データ) (日本海洋データセンター)
地表被覆	土地利用	国土数値情報土地利用細分メッシュ (国土交通省, 2009, 100m メッシュ)
	等価粗度係数	田 : 0.025 その他農用地 : 0.025 森林 : 0.06 荒地 : 0.025 建物用地 : 0.04 幹線交通用地 : 0.04 その他の用地 : 0.025 海浜 : 0.025 ゴルフ場 : 0.025 水域 : 0.025 (m <sup>-1/3</sup> s)
初期条件	初期水位 0m とし, 阿武隈川, 名取川, 広瀬川, 七北田川の上流から一定流入条件を与えた (国土交通省水文水質データベース, 国土交通省第 2 回河川津波対策検討会, 2011 ; 菊池ら, 1982)	
境界条件	最大引き波時の海水位より標高の低い範囲に対して, 津波地形を境界条件として与え, モデル上面は標準大気圧固定境界, その他は閉境界に設定	
津波波形	いわき市小名浜 (気象庁) の海水位データを, 相馬 (気象庁) の最大水位でスケーリングした擬似波形を与えた	

いて名取川河口や阿武隈川河口付近で海岸線近くの海底に周囲より 1 メートル数十センチ深くぼみがあることが確認されており, 津波に起因するものと考えられていることから, 設定した海岸線近傍の土砂交換層の厚さ 1m は現実的な値であると考えられた。そのため土砂堆積量が大きい結果を示したのは, 陸域での土砂交換層

の厚さが想定した 1m よりも薄いためと考えられた。また, 本解析では阿武隈川河口域でシルトおよび粘土の粒度分布割合を小さく設定している。粒度分布を一律とした場合, 中砂や細砂などを主体的にしている阿武隈川河口では調査結果との差異が大きく, 解析条件としてこの地域の中砂・細砂の割合を各々 40% にあげることで整合

性をあげることが出来た。これは阿武隈川河口が砂主体の粒度組成であることを示唆していた。

## 7. 表層土壌環境基本図（宮城県地域）の部分改訂

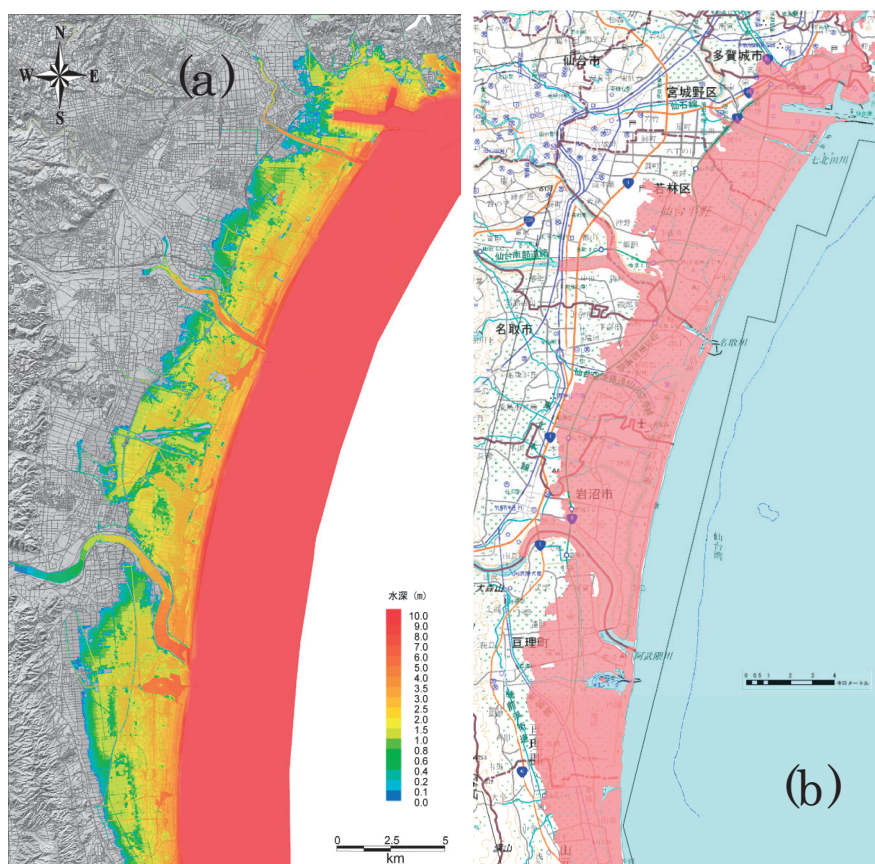
### 7.1 既存表層土壌情報と津波堆積物の比較検討

前章の津波氾濫による堆積物輸送解析によると、層厚は極薄いものの粘土、シルトなど微粒子は津波の到達した浸水域に到達し、堆積したものと推定される。そこで比較対象とする表層土壌情報は津波浸水域に分布する沿岸部の土壌に限定し、津波堆積物との化学組成の比較した。第12図に環境省告示第19号（環境省，2003b）に基づく含有量試験（1N 塩酸溶出試験）および環境省告示第18号（環境省，2003a）に基づく溶出量試験（水溶出試験）の評価手法により得られた土壌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。これらの元素は、宮城県内の土壌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壌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壌と同程度であり、鉛溶出量は、津波堆積物が既存土壌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壌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（第13図）。これらの特性は既存土壌に比べてヒ素を現位置に留め、酸化環境に移行した時に溶出しやすい特性をもつ。

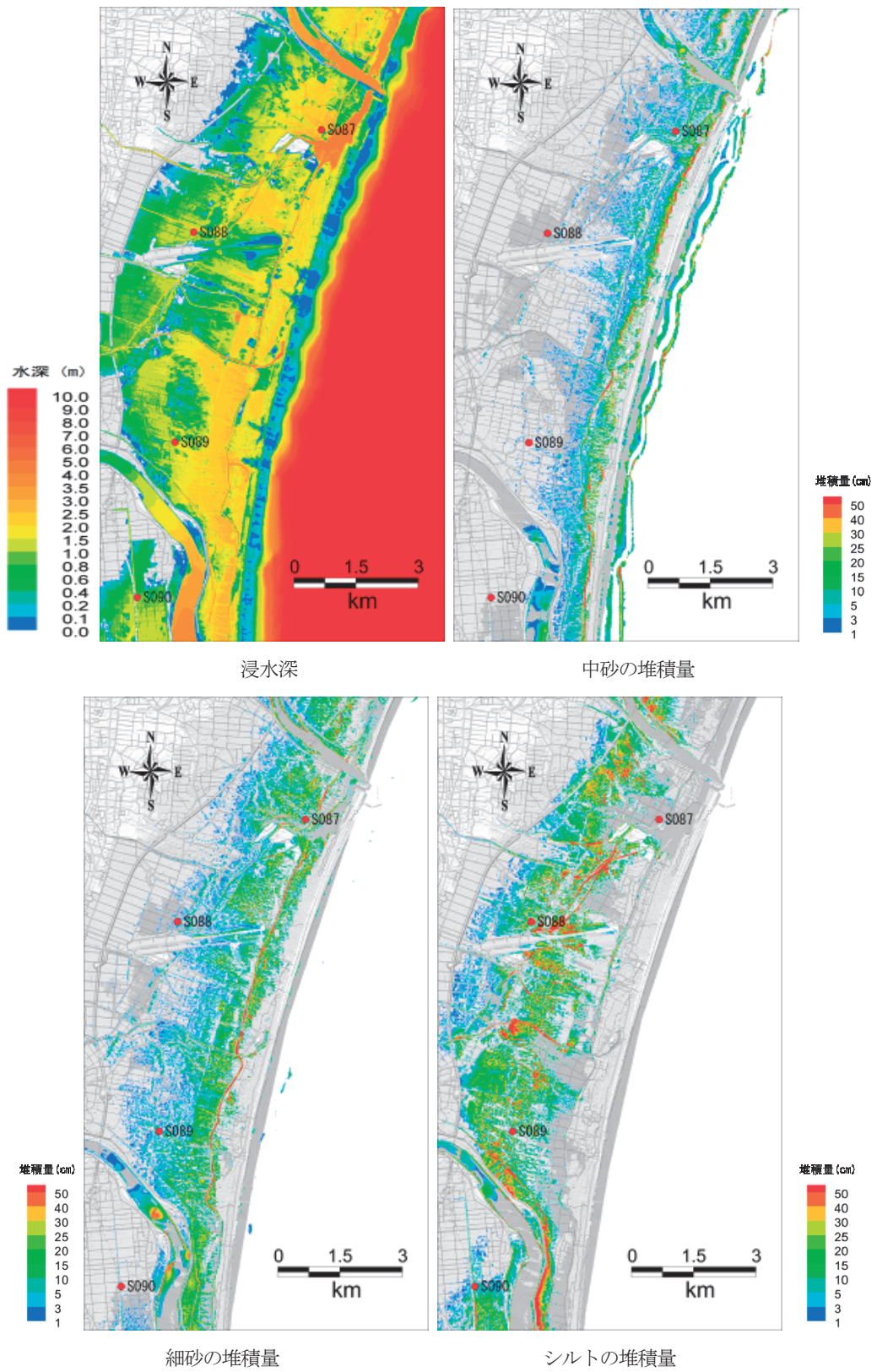
### 7.2 表層土壌評価基本図への津波堆積物への反映

環境基準を超える溶出値を示したヒ素に関して、ヒ素溶出値の分布図を第14図に示した。仙台平野部において、高溶出値を示す既存土壌および津波堆積物の分布位置はほぼ一致する傾向を示した。これは、平野部でヒ素溶出値の高い土壌が分布する沿岸部において、それに延長する海域においても同様の特徴を示す堆積物が分布しており、津波氾濫によって陸域に巻き上げられ、再堆積したことが推定される。仙台平野沿岸部では河川流域地形を反映して東北地方太平洋沖地震で津波影響の及

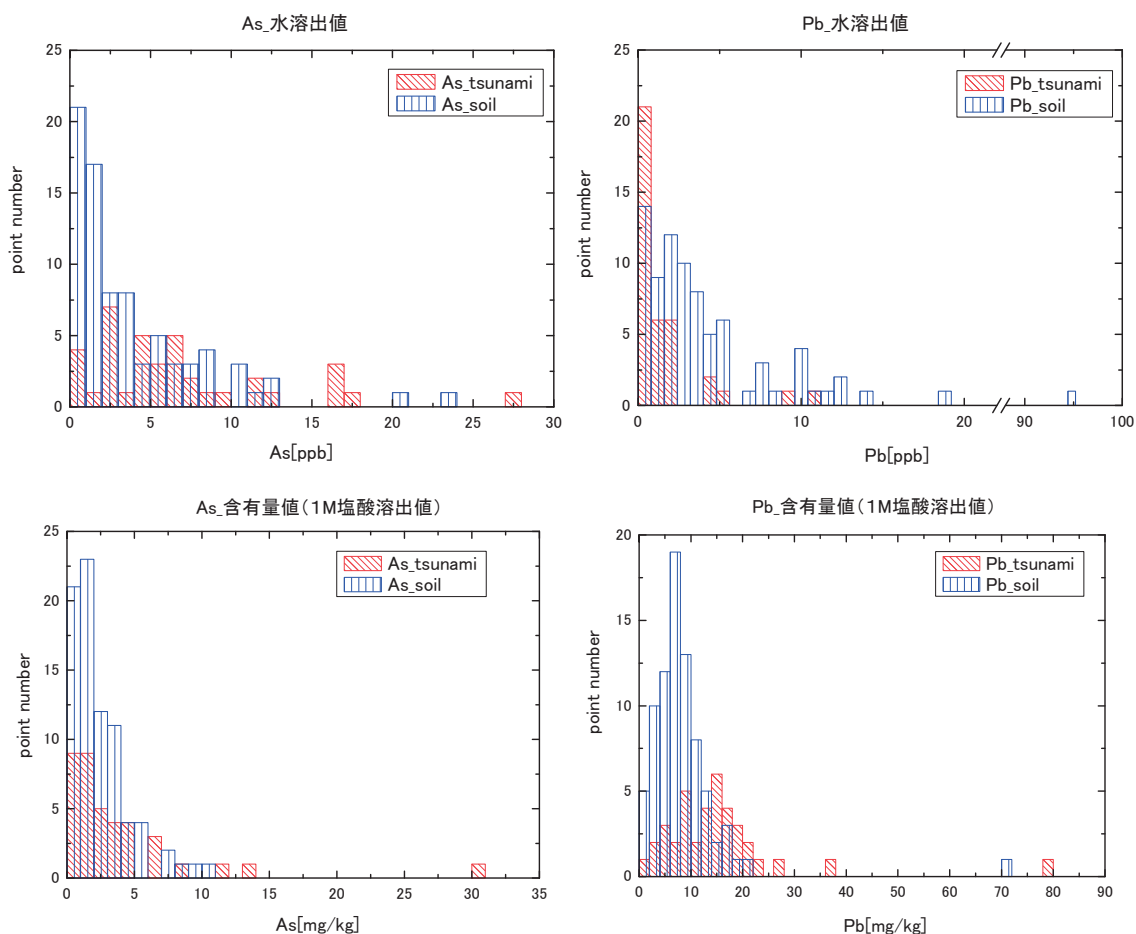


第10図 浸水範囲 (a) 解析結果 (b) 浸水範囲概況図

Fig.10 Flooding area. (a) Simulation result, (b) Observation result.



第 11 図 仙台平野中央部における津波氾濫後の浸水域と土砂堆積量  
 Fig.11 Flooding area and amount of deposits after tsunami attack at central Sendai.



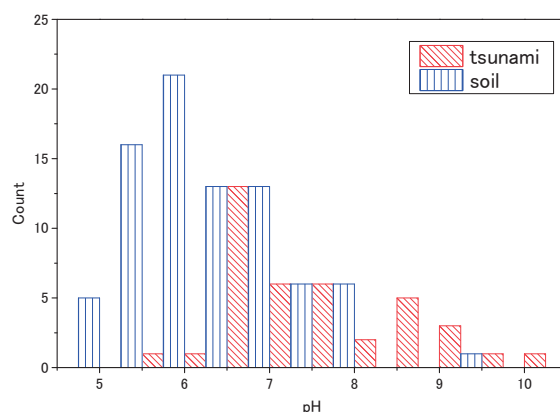
第12図 沿岸域に分布する既存土壌および津波堆積物からのヒ素・鉛に関する水溶出量, 含有量のヒストグラム  
 Fig.12 Histograms of leaching and bulk concentrations for As and Pb from tsunami deposits and subsoils distributed at coastal areas.

んだ領域よりもさらに内陸部からヒ素溶出値の高い地域がみられるが, 沿岸域に特に高いヒ素溶出値を示す傾向があり, これらの土壌の特徴には過去から現在に至る津波氾濫による堆積物の付加影響があったと考えられる。

このように津波堆積物は沿岸域の表層土壌に有害重金属を付加したことが懸念されるが, 表層土壌評価基本図と同様のリスク評価手法を用いて人体への健康影響を算出したところ, いずれの元素の関しても今回の調査結果の濃度レベルでは人体リスクはなく, 土壌・地下水へ及ぼす鉛・ヒ素の汚染の影響はないと判断された。

### 8. 導入機器の概要と活用

津波堆積物や土壌試料の組成を正確に測定・分析し, 有害・有毒汚染物質の有無や汚染原因の推定, 各種化学物質間の相互作用ならびに化学物質などによる健康リスクを適切に評価することが極めて重要である。現場から採取してくる幅広く変動する可能性のある地質試料



第13図 沿岸域表層土壌と津波堆積物の pH 分布  
 Fig.13 pH distribution of tsunami deposits and subsoils distributed at coastal areas.

の組成を高感度かつ高精度に測定・分析するために、本研究では固体及び液体試料微小領域での定量・定性分析が可能なレーザーアブレーション誘導結合プラズマ励起質量分析装置（通称 LA-ICP-MS）及び炭素・窒素・硫黄・水素ならびに酸素といった有機微量元素の分析が可能な全元素分析装置を導入した。

以下、装置の主要仕様と性能・特徴を紹介する。

### 8.1 LA-ICP-MS

今回導入した LA-ICP-MS 装置は大きく分けて、レーザーアブレーションシステム (LA) 部と高周波誘導結合プラズマ励起質量分析 (ICP-MS) 装置部に構成されている。

LA 部のレーザーの波長は 213nm であり、ビーム径が 4μm から 100μm まで広範囲に調整することが可能である。レーザービームの径を変えても、エネルギー密度が変化しないこと、エネルギーは試料表面で 20J/cm<sup>2</sup> 以上あることが特徴としている。また、粒径の異なる地質試料を分析するために、試料セルは、縦横 100mm、深さ 30mm 以上の空間を有することも特徴の一つとして挙げられる。

ICP-MS 部の主要性能として、検出限界が Be 1ppt 以下であること、また、酸化物イオン生成比が CeO/Ce 1% 以下であることが挙げられ、多元素を同時かつ高感度に分析することが可能である。固体試料の分析においては、レーザーの照射位置を倍率 10 倍以上の顕微鏡観察システムで確認することが可能である。また、液体試料の分析に関しては、容易に取り付け取り外しが可能なオートサンプラーを用い、100μL 程度の微量サンプルでもすべての液量を確実に吸引できるという優れた性能を

持っている。

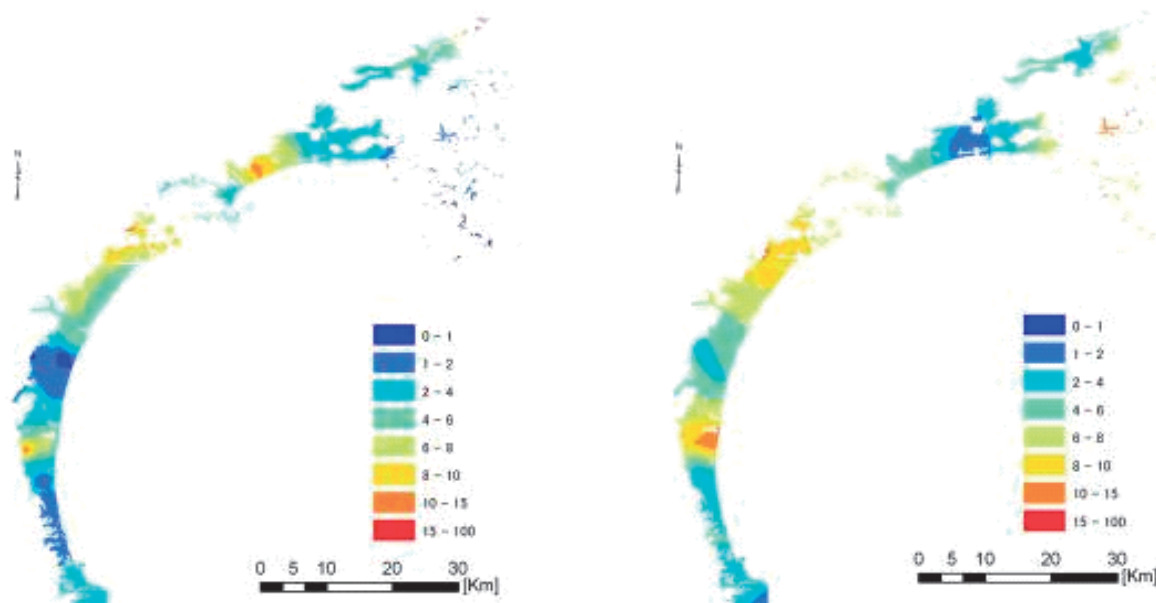
これらの性能により、今回導入した LA-ICP-MS 装置は任意のサイトから採取してくる多様な地質、または土壌・地下水試料の分析に対応でき、巨大地震・津波災害に伴う土壌汚染リスク評価や土壌・地下水汚染の評価などに幅広く活用することが可能である。

### 8.2 全元素分析装置

導入した全元素分析装置は Thermo Fisher Scientific 社製 FLASH2000 NC ORG+MAS200R であり、窒素・炭素・水素・硫黄及び酸素の検出限界はいずれも 1μg 以下である。測定モードの選択によって、窒素・炭素 (NC) 同時分析、炭素・水素・窒素・硫黄 (CHNS) 同時分析及びオプション機能による酸素の分析が可能である。測定時間は測定モードによるものの、最大でも 10 分以内である。また、オートサンプラー附属のため、30 試料以上の自動分析も可能である。調査現場から採取してきた有機物質含有量の極めて少ない砂質試料から、有機物質含有量の高い泥炭質土壌まで、様々な土壌試料を分析して見た結果、いずれも 10mg 程度の試料で分析可能であることが確認され、今後も有効に活用していく所存である。

### 9. まとめ

今回の津波により形成された津波堆積物の多くは、塩分や有機物を多く含有するため、海洋の底泥や堆積物が津波により巻き上がったものと考えられる。また、津波の浸水域は沿岸から数 km にも達しているため、一部の堆積物には海岸線に近い陸上の土壌や瓦礫の成分も含ま



第 14 図 (a)既存表層土壌からのヒ素溶出値, (b) 津波堆積物からのヒ素溶出値.

Fig.14 Comparison of As leaching concentration between (a) subsoils and (b) tsunami deposits.

れている。したがって、津波堆積物の性状や組成は、海域や陸域の土壌や堆積物の特徴を強く反映したものとなることが考えられる。津波堆積物の平均の堆積厚さは5～10cm程度であり、最大では40cm以上に及ぶ地点もあった。津波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粗く、泥質は細かい粒子が大半を占めていた。化学分析の結果では、一部の堆積物にヒ素および鉛の含有量および溶出量が通常の土壌と比べて高い地域がみられたが、リスク評価の結果ヒトへの健康リスクは大きくないことが明らかになった。また、粒径分布や強熱減量などの物理分析の結果から、多くの津波堆積物が建設資材などに再利用可能であることが分かった。

今後は今回集積された各種データを、自治体や関係機関との協議を行った後に一般に広く公開していきたい。また、得られたデータや解析結果が、津波堆積物の処理や有効利用ならびに今後の防災指針に役立てられることを期待したい。

## 文 献

芦田和男・道上正規 (1972) 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究. 土木学会論文報告集, **206**, 56-69.

Egiazaroff, I. V. (1965) Calculation of nonuniform sediment concentration. Proceeding of ASCE, *Journal of Hydraulic Division*, **91**, HY4, 225-246.

Itakura, T. and Kishi, T. (1980) Open channel flow with suspended sediments. ASCE, *Journal of Hydraulic Division*, **106**, HY8, 1325-2343.

環境省 (1999) 土壌中のダイオキシン類に関する検討会 第一次報告.

環境省 (2003a) 土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件 (平成15年3月6日環境省告示第18号). <http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kokuji/03.pdf> (2014年10月8日確認)

環境省 (2003b) 土壌含有量調査に係る測定方法を定める件 (平成15年3月6日環境省告示第19号). <http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kokuji/04.pdf> (2014年10月8日確認)

川辺能成, 原 淳子, 保高徹生, 坂本靖英, 張 銘, 駒井 武 (2012) 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, **68**, 195-202.

菊池永祐, 杉本隆成, 栗原 康, 花輪公雄 (1982) 仙台市七北田川河口域の水質分布と河川流量. 水産海洋研究会報, **40**, 47-53.

国土地理院 基盤地図情報サイト.

<http://www.gsi.go.jp/kiban/> (2014年10月8日確認)

国土地理院 (2011a) GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動. <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html> (2014年10月8日確認)

国土地理院 (2011b) 津波浸水範囲の土地利用別面積について. <http://www.gsi.go.jp/common/000060371.pdf> (2014年10月8日確認)

国土交通省 国土数値情報ダウンロードサービス. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2014年10月8日確認)

国土交通省 水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp/> (2014年10月8日確認)

国土交通省 (2011a) 第2回河川津波対策検討会 資料1-(1) 河川遡上津波のシミュレーション結果. [http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/kasentsunamitaisaku/dai02kai/dai2kai\\_siryou1-1.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasentsunamitaisaku/dai02kai/dai2kai_siryou1-1.pdf) (2014年10月8日確認)

国土交通省 (2011b) 第2回河川津波対策検討会 参考資料5 直轄河川堤防の広域沈降. [http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/kasentsunamitaisaku/dai02kai/dai2kai\\_ref5.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasentsunamitaisaku/dai02kai/dai2kai_ref5.pdf) (2014年10月8日確認)

国土交通省河川局 (2006) 名取川水系河川整備基本方針 土砂管理等に関する資料 (案).

国土交通省東北地方整備局 (2007) 阿武隈川水系河川整備計画 [大臣管理区間].

Lane E. W. and Kalinske, A. A. (1941) Engineering calculations of suspended sediment. *Trans. AGU*, **22**, 307~603.

日本海洋データセンター J-EGG500. [http://www.jodc.go.jp/data\\_set/jodc/jegg\\_intro\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html) (2014年10月8日確認)

Rikken, M. G. J., Lijzen, J. P. A. and Cornelese, A. A. (2001) Evaluation of model concepts on human exposure, RIVM Report 711701022.

Rubey, W. W. (1933) Settling velocities of gravels, sand and silt particles. *American Journal of Sci.* **25**, 325-338.

澤井祐紀・宍倉正展・小松原純子 (2008) ハンドコアラーを用いた宮城県仙台平野 (仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町) における古津波痕跡調査. 活断層・古地震研究報告, no.8, 17-70.

U. S. Environmental Protection Agency (1998) Toxicological review of Hexavalent Chromium, in support of summary information on the Integrated Risk Information System (IRIS). Office of Research and Development, U. S. EPA, Washington, DC.