

# 土壤汚染調査研究

|   |     |
|---|-----|
| 土壤汚染リスク調査 .....   | 383 |
| 土壤汚染リスクにかかる海域及び陸域の調査研究の概要.....                                    | 399 |
| マルチビーム音響測深による 2011 年 3 月 11 日に発生した津波後の<br>仙台湾の海底地形と海底ガレキの調査 ..... | 403 |
| 仙台湾陸棚域の表層堆積物：2011 年東北地方太平洋沖地震／津波の<br>浅海域海底環境への影響 .....            | 409 |
| 仙台湾における津波堆積物の輸送特性 .....   | 415 |
| 水理模型実験による松島湾の津波特性 .....   | 419 |
| 東北地方南部前弧～島弧域の地球化学的・地質学的特性調査 .....                                 | 425 |
| ルミネッセンス年代測定実験室.....   | 429 |



## 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

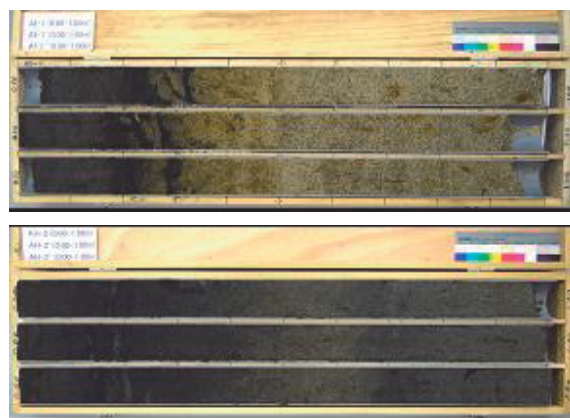
波堆積物からの長期的なヒ素、鉛の溶出挙動と土壌の酸性化および上記化学成分挙動における微生物活動の相関について検討した。

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

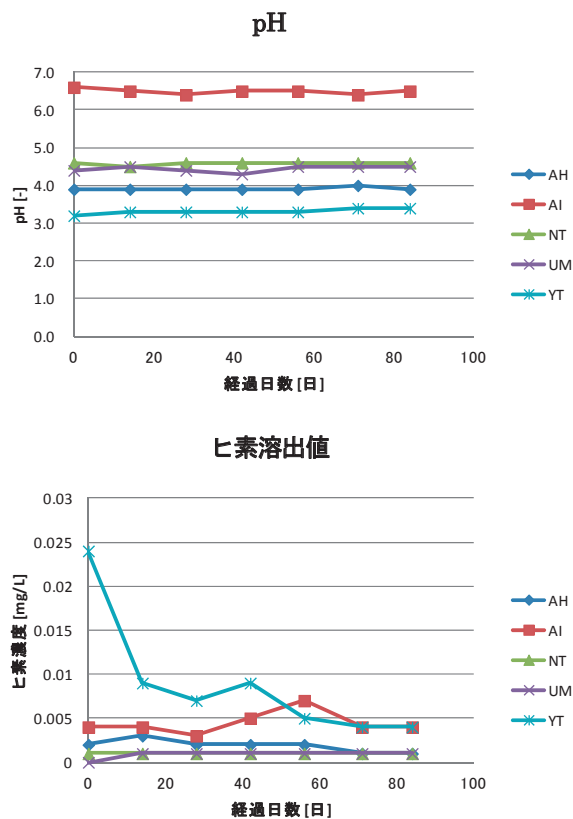
4. 1 表層堆積物の土壌汚染調査

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 | おひらせ町二丁目周辺    | S032 | 宮古市田老川河口付近     |
| S014 | おひ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 | 新地町埴木崎周辺       |
|      |               | 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 | 石巻市小淵浜周辺       |
|      |               | 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 | 旭市萩園周辺         |
|      |               | S127 | 旭市井戸野周辺        |
|      |               | S128 | 匝瑳市川辺周辺        |
|      |               | S129 | 横芝光町栗山川河口付近    |
|      |               | 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]

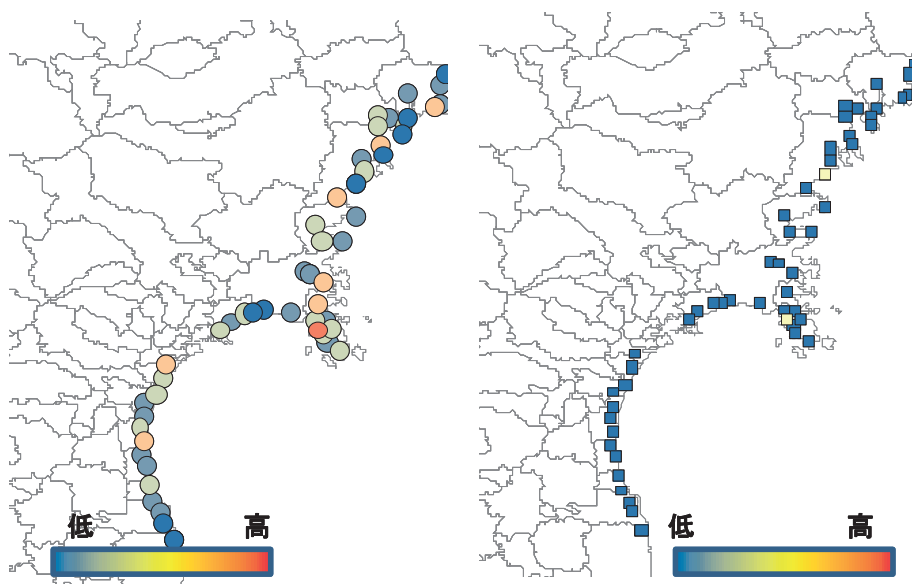
| 重金属類 | ヒ素      | 鉛      | カドミウム    | 全クロム    |
|------|---------|--------|----------|---------|
| 濃度範囲 | 0-0.059 | 0-0.14 | 0-0.0067 | 0-0.037 |
| 幾何平均 | 0.0024  | 0.0015 | 0.001    | 0.0012  |

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。

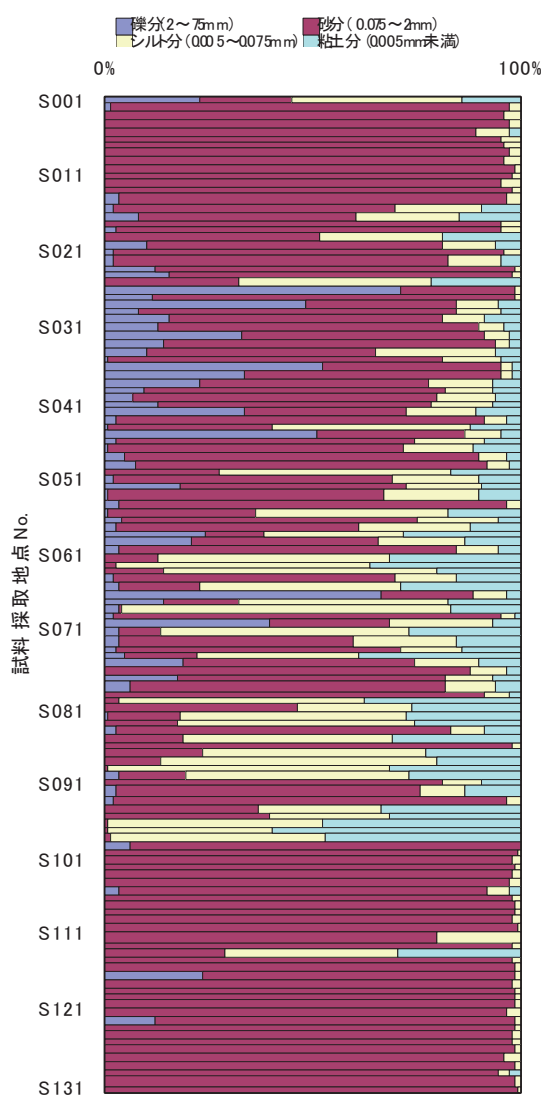
### 5. 津波堆積物の物理特性

#### 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

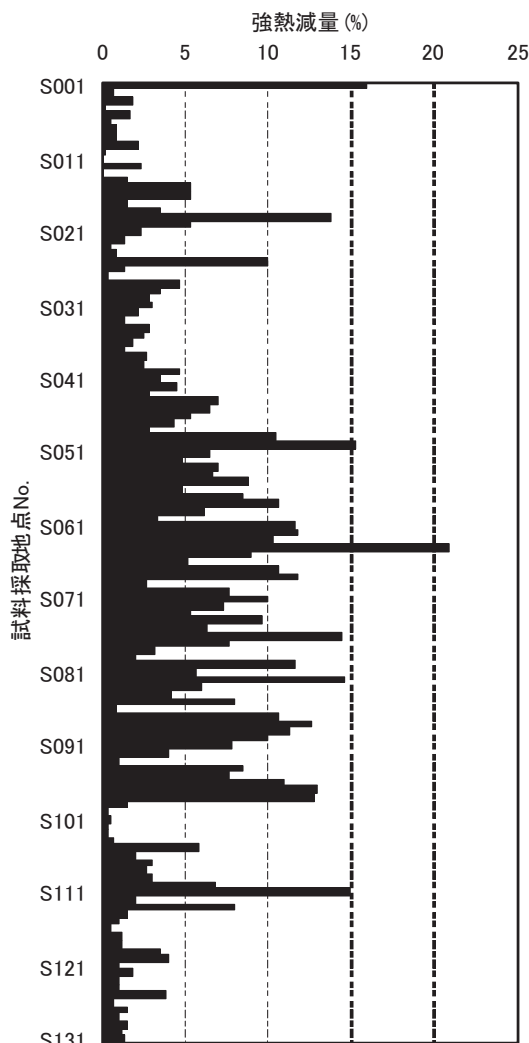
採取した津波堆積物中の高有機質土などの有機物含有量や無機質系の土の風化度合、鉍物組成の目安とするため、第1表に示した131地点より採取した津波堆積物試料について、JIS A 1226:2009に基づく土の強熱減量試験を実施した。

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

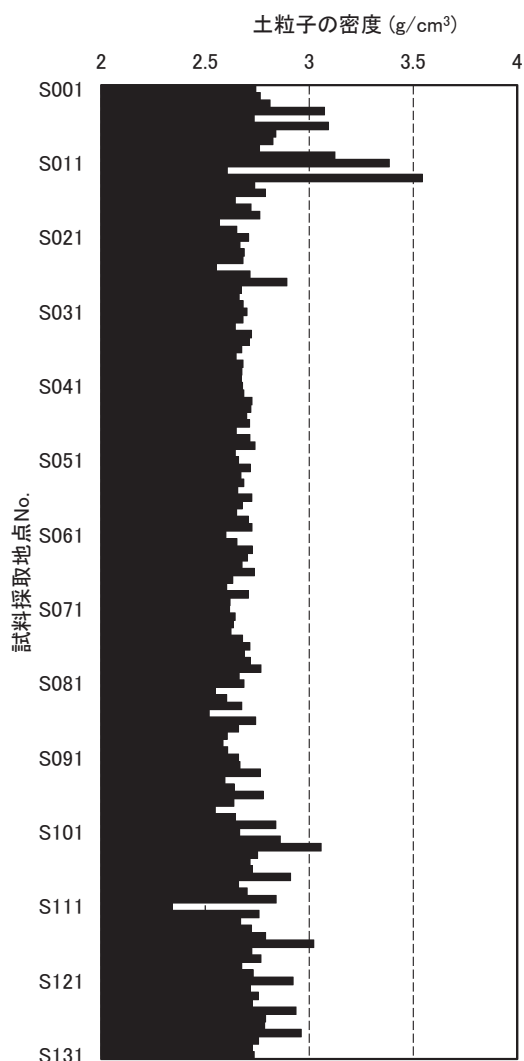
採取した津波堆積物の工学的分類の指標を与え、力学的性質の推定、建設材料としての適性の判定や掘削工・基礎工などの施工法の決定に用いる基礎的なデータを得るため、第1表に示した131地点より採取した津波堆積物試料について、JIS A 1202:2009に基づく土粒子の密度試験を実施した。

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.





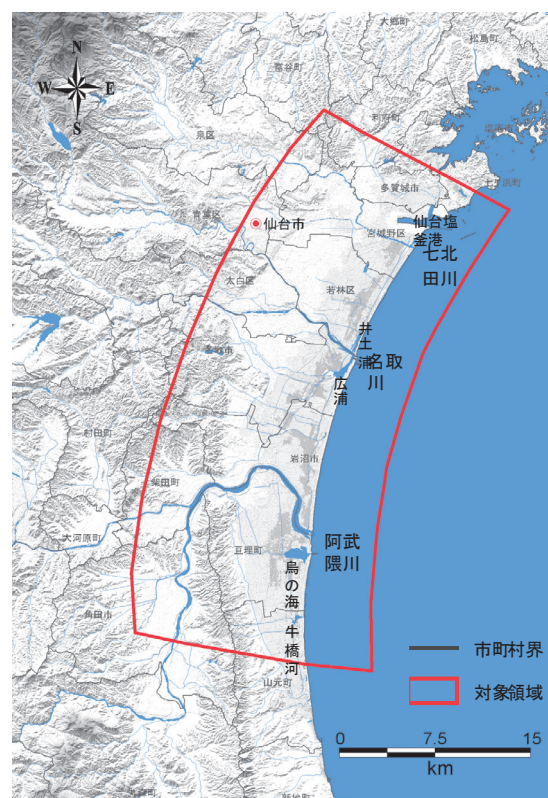
第7図 津波堆積物の土粒子密度  
Fig.7 Density of soil particles of tsunami deposit samples.

## 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

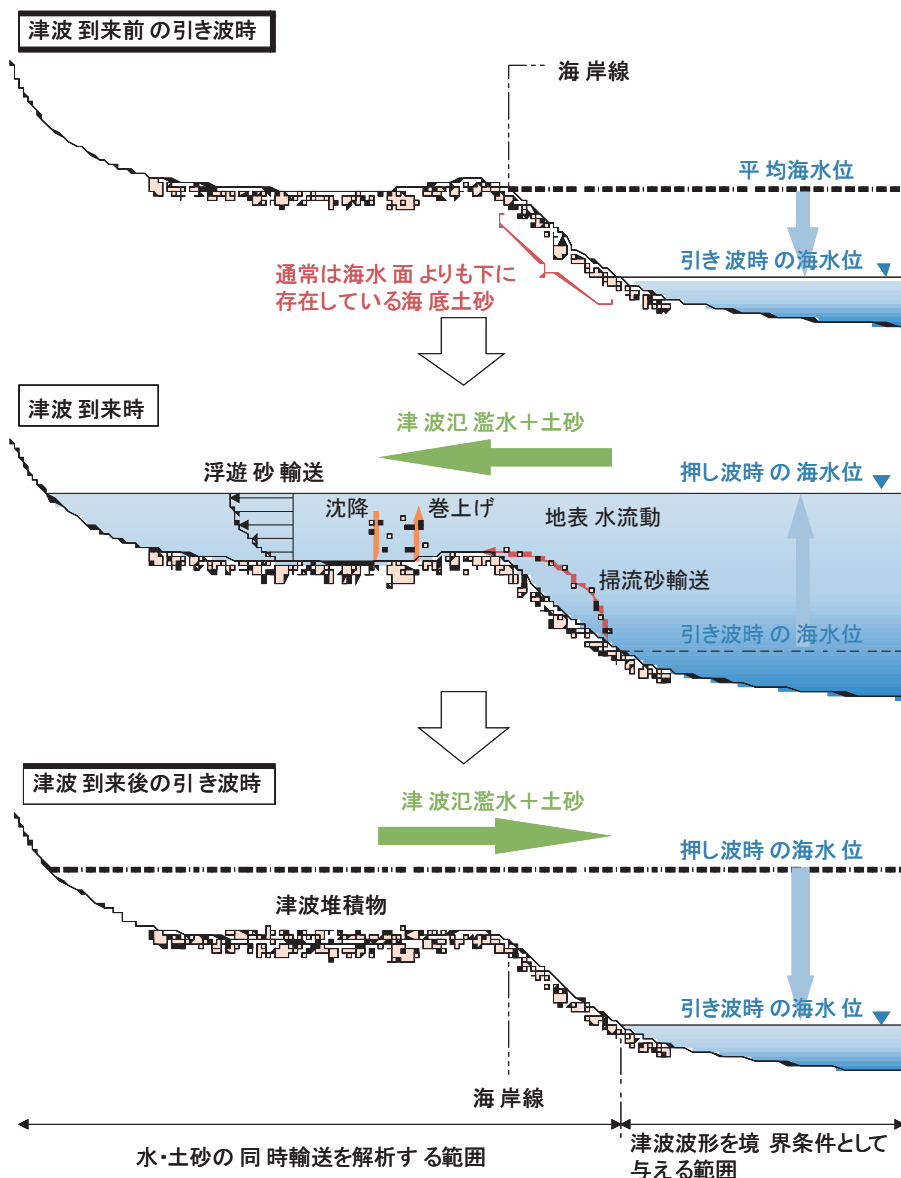


第 8 図 解析対象領域  
Fig.8 Numerical analysis area.

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<br>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<br>巻上げ量・沈降量はそれぞれ板倉・岸の式 (Itakura and Kishi, 1980) ,<br>Lane-Kalinske の濃度分布式 (Lane and Kalinske, 1941) に基づく<br>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)<br>仙台平野における地殻変動量 (国土地理院) を考慮<br>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<br>建物用地 : 0.04 幹線交通用地 : 0.04 その他の用地 : 0.025<br>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

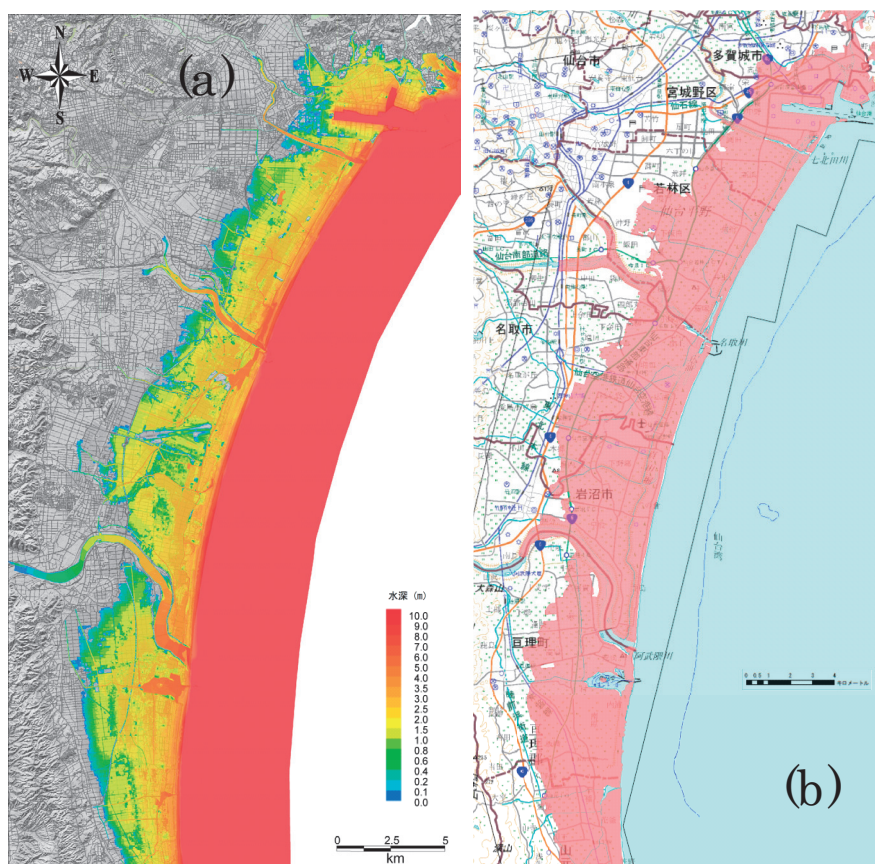
### 7.1 既存表層土壌情報と津波堆積物の比較検討

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。

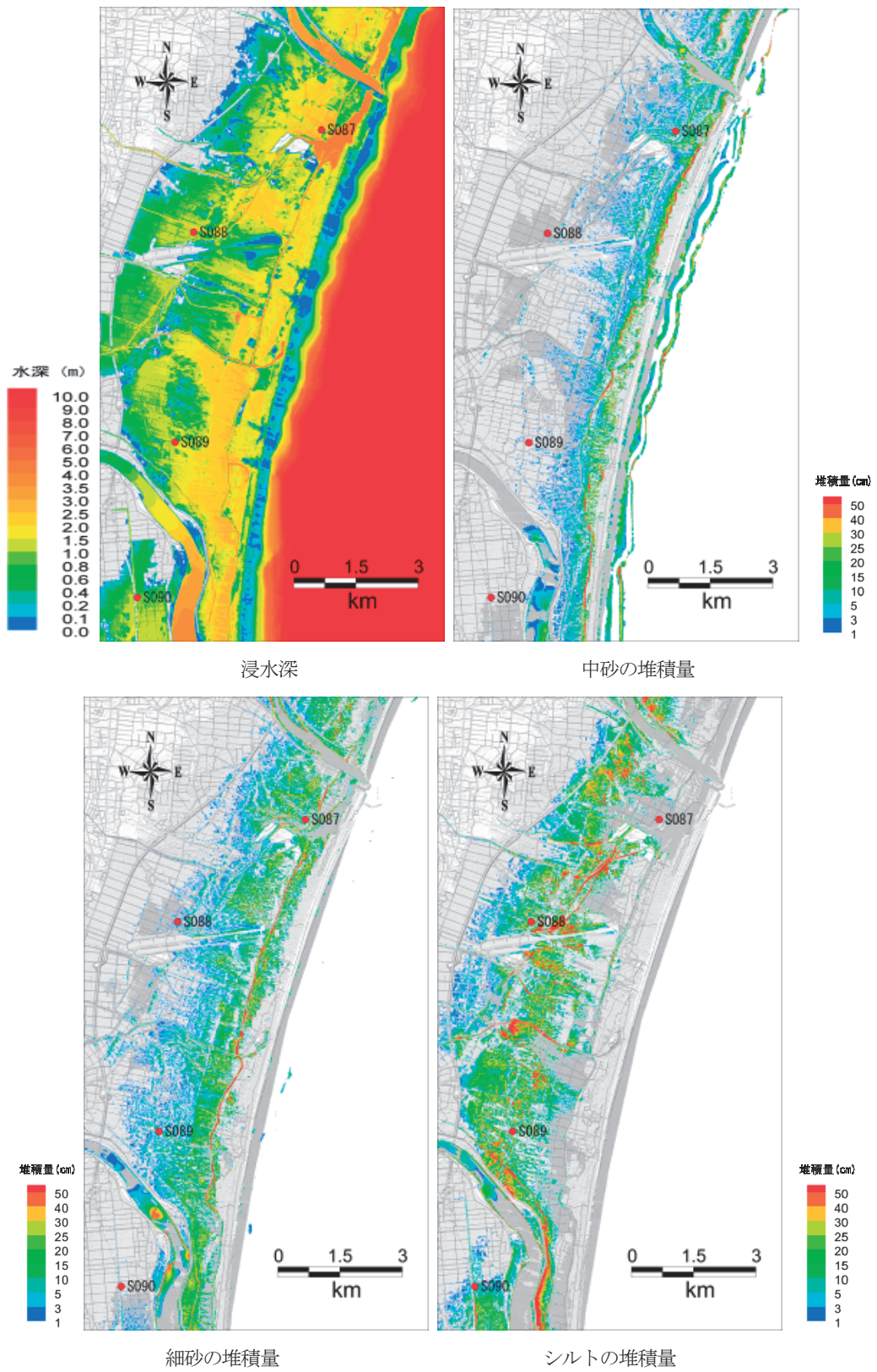
### 7.2 表層土壌評価基本図への津波堆積物への反映

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

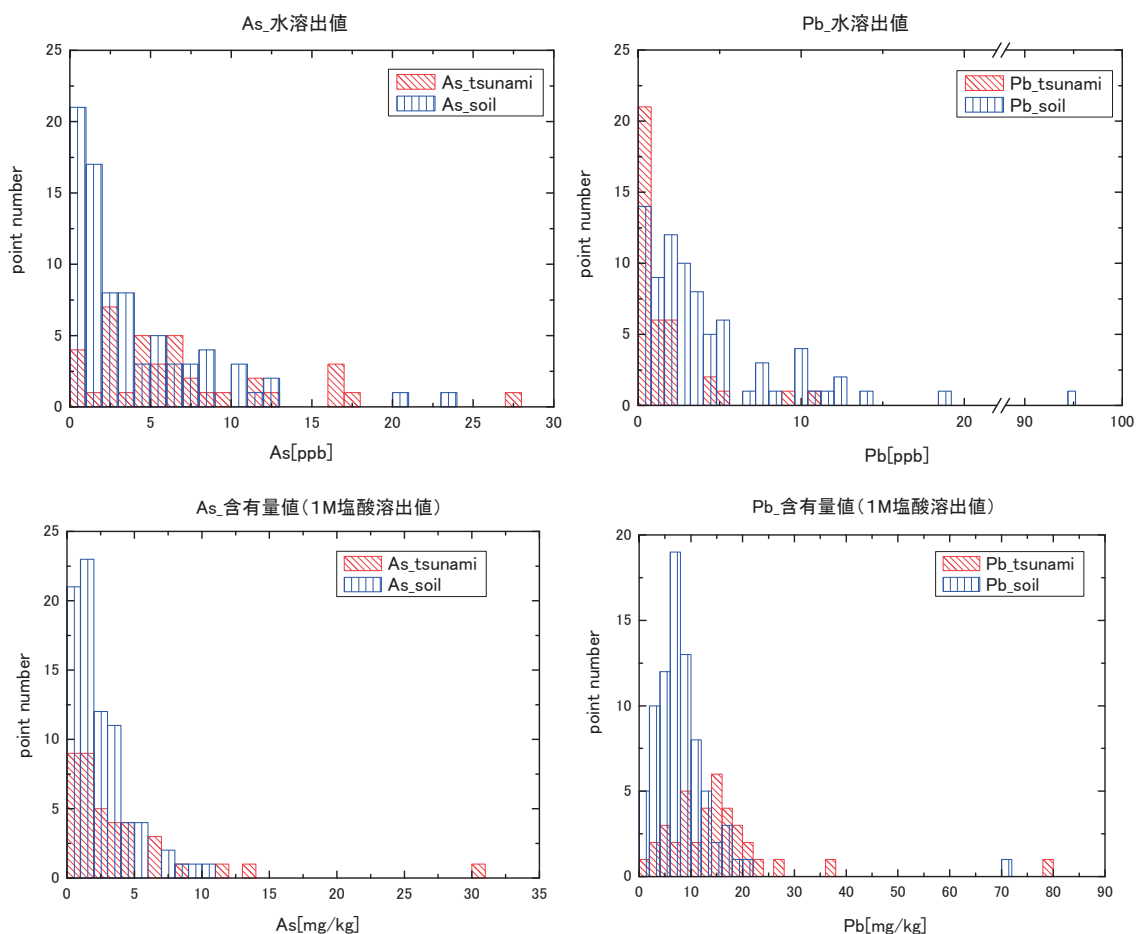


第10図 浸水範囲 (a) 解析結果 (b) 浸水範囲概況図

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.



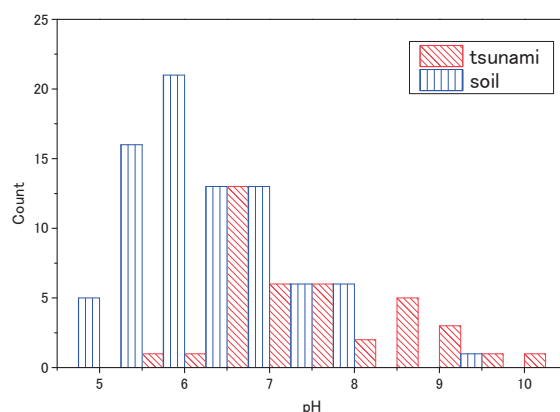
第12図 沿岸域に分布する既存土壌および津波堆積物からのヒ素・鉛に関する水溶出量, 含有量のヒストグラム  
 Fig.12 Histograms of leaching and bulk concentrations for As and Pb from tsunami deposits and subsoils distributed at coastal areas.

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。

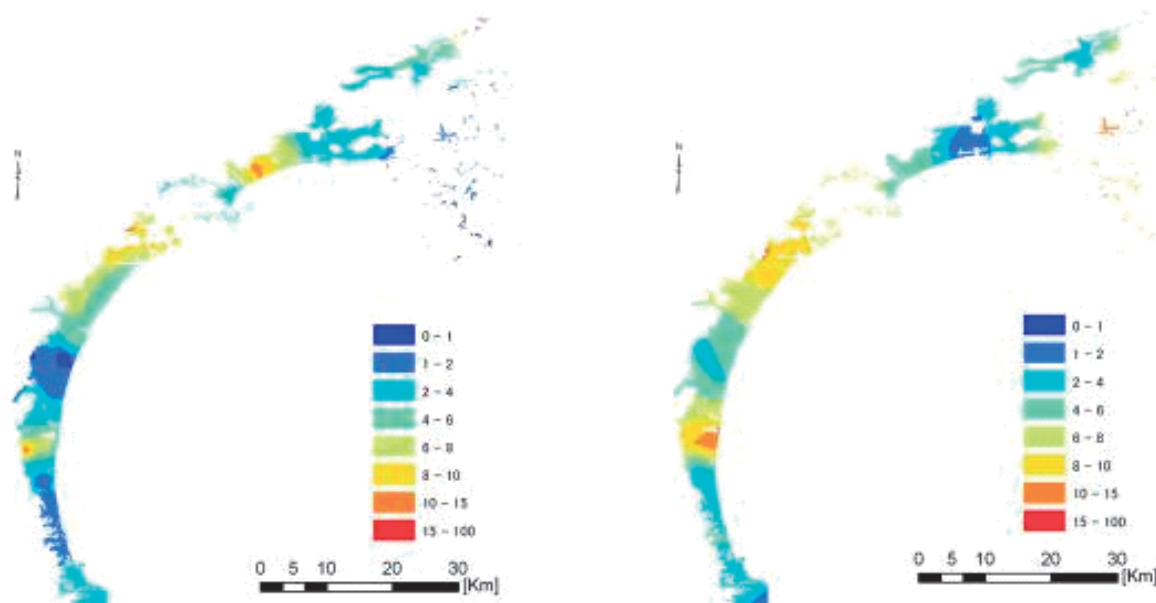
これらの性能により、今回導入した LA-ICP-MS 装置は任意のサイトから採取してくる多様な地質、または土壌・地下水試料の分析に対応でき、巨大地震・津波災害に伴う土壌汚染リスク評価や土壌・地下水汚染の評価などに幅広く活用することが可能である。

### 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.

## 土壌汚染リスクにかかる海域及び陸域の調査研究の概要 Summary on marine and onshore surveys for environmental risk caused by tsunami

池原 研<sup>1\*</sup>・長尾正之<sup>1</sup>・田村 亨<sup>1</sup>・高橋 暁<sup>1</sup>・山崎宗広<sup>1</sup>・御子柴真澄<sup>1</sup>  
Ken Ikehara<sup>1\*</sup>, Masayuki Nagao<sup>1</sup>, Toru Tamura<sup>1</sup>, Satoru Takahashi<sup>1</sup>,  
Munehiro Yamasaki<sup>1</sup> and Masumi Mikoshiba<sup>1</sup>

**Abstract:** Huge tsunami by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake inundated coastal areas of the northeastern Japan. To understand the material transport from land to sea and the influence of the tsunami on the sea floor environments, we conducted the detailed bathymetric survey, sediment sampling surveys and numerical model experiment on material transport in Sendai Bay, hydraulic model experiments on characteristics of the tsunami in Matsushima Bay, and onland geochemical and geological surveys in southern Tohoku arc-forearc areas.

**Keywords:** tsunami, marine sediment, debris, transportation, geochemistry, geology

### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波(以下、2011年東北沖津波と呼ぶ)では東日本沿岸に膨大な津波堆積物と震災瓦礫が押し寄せ、大きな被害を与えるとともに、被災地復興の障害となった。津波は陸上に遡上して被害を及ぼしただけでなく、引き波は大量の土砂と瓦礫を海へと運んだ。遡上型津波堆積物にはしばしば海底由来の粒子が混入することが知られている(例えば、内田ほか, 2004; Nanayama et al., 2006; 佐々木ほか, 2007など)が、陸から海への堆積粒子や瓦礫の供給は海底環境や海洋生態系に影響を与える恐れがある。また、浅海域に侵入した津波が海底堆積物をまき上げ、混濁流を発生させて、土砂を沖合へ長距離輸送させたこともわかってきた(Arai et al., 2013; Ikehara et al., 2014)ので、浅海域で発生した現象が浅海域のみでなく、深海域の海底環境にも影響を与えた可能性がある。さらに2011年東北沖津波後の調査結果は、仙台平野では陸上の津波堆積物に海の要素がほとんど認められない(例えば、Szczuciński et al., 2012など)一方、陸前高田では海底からの粒子供給があった(Naruse et al., 2012; Tanaka et al., 2012)ことが判明しており、海陸の粒子輸送パターンが場所によって異なることがわかってきた。すなわち、津波の海底環境への影響を評価するためには、様々な場所における海陸を統合した元素や粒子、瓦礫の堆積状況の把握が重要である。また、元素の移動・拡散を理解する上では、その供給源である基盤岩類の元素濃度分布を知ることが必要である。このため、「巨大地震・津波災害に伴う複合地質リスク評価プロジェクト」の中の「土壌汚染リスク調査」の中で海域を含めた堆積物、岩石の調査研究を行うこととした。

「土壌汚染リスク」にかかる海域及び関連陸域の調査研究では、6つの調査研究とそれに関連した一つの分析機器の整備を実施した。研究項目名と担当者は以下の通りである。1) 仙台湾沿岸海底地形・瓦礫調査<長尾>, 2) 仙台湾海域津波堆積物調査<田村>, 3) 仙台湾表層堆積物調査<池原>, 4) 仙台湾底質流動数値実験<高橋>, 5) 松島湾水理模型実験<山崎>, 6) 東北地方南部前弧～島弧域地球化学的・地質学的特性調査<御子柴>, 7) ルミネッセンス年代測定実験装置<田村>。

本論では、以上の7項目について平成24・25年度に実施した調査研究・施設整備の内容とこれまでの結果の概要について報告する。それぞれについての詳細についてはこのあとの個々の項目の報告を参照されたい。ただし、2) 仙台湾海域津波堆積物調査は、本プロジェクトの「津波災害リスク」と共同して実施したので、内容の詳細については「津波災害リスク」の方で報告することとした。また、2), 3) で採取された堆積物試料の一部は「土壌汚染リスク」の陸域の津波堆積物の研究チームにも提供され、海陸を統合した津波による元素移動・再配置の解明を目指した。

### 2. 各研究項目の目的と結果の概要

#### 2.1 仙台湾沿岸海底地形・瓦礫調査

津波で被災した船舶やコンテナなどの一部は海域に流出し、瓦礫となったと考えられるが、その全容はよく分かっていない。また、地質学的データに基づく過去の巨大津波発生履歴の解明には、津波による海底地形や底質変化の実態把握が重要である。これらの把握のため、仙台湾において、ワイドバンドマルチビーム測深システ

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. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)



ムを用いた海底地形調査を実施した。得られた高解像度海底地形データの解析から、仙台港近くの海底に多数の瓦礫が存在することが識別された。さらに、判別した瓦礫の可視化結果に基づいてその形状や反射強度などから瓦礫をタイプ分けした。これに基づけば、コンテナと推定されるものが81個確認できるなど、今回の調査データが海底瓦礫の抽出に有効であることが確認された。

## 2.2 仙台湾海域津波堆積物調査

津波では海底から陸へ、また陸から海底への粒子輸送があったと予想され、その痕跡は海底堆積物に記録されている可能性がある。海底における津波堆積物の把握を目的に、仙台湾において岸沖方向に6本の測線をもうけ、表層堆積物柱状試料の採取を行った。試料採取はスミス・マッキンタイヤー式グラブ採泥器(53地点)、グラビティコアラー(40地点)、パイプロコアラー(34地点)を用いて実施した。コアラーによる採取はグラブ採泥器による試料採取のあとに同じ地点で行った。グラビティコアラーで試料採取できなかった場合に同じ地点でパイプロコアラーによる試料採取を行っているため、グラビティコアラーとパイプロコアラーの地点数の和はグラブ採泥器の地点数よりも多くなっている。採取試料のいくつかには、津波堆積物を考えられる堆積層が認められた。その構造や堆積過程については、さらに検討中である。

## 2.3 仙台湾表層堆積物調査

仙台湾内側～中部陸棚域において50地点でスミス・マッキンタイヤー式グラブ採泥器による表層堆積物の採取を行った。これは、Saito(1989)などによって報告されている1985年に環境庁(当時)の国立研究機関公害防止等試験研究で地質調査所(当時)が行った調査地点から仙台湾の浅海域をほぼ網羅するように50地点を選定して行った。同じ地点での調査結果を比較することで津波の浅海域の海底への影響を評価するのが目的である。50地点から採取された堆積物の粒度と堆積構造を比較したところ、いくつかの地点で新たな泥の堆積や淘汰のよい細粒砂の堆積が確認された。これらは津波による堆積物の巻き上げや再移動/再堆積によるものと考えられる。また、阿武隈川河口近傍では2011年の地震・津波以降の洪水により形成されたと考えられる堆積層が確認された。これらの区別は、地震・津波の海底への影響のみならず、陸域から海域への放射性物質の動態の検討の上でも重要である。

## 2.4 仙台湾底質流動数値実験

仙台湾における津波によるヒ素や重金属類などの有害物質の挙動を把握するために、数値モデル実験を用いて底質の移動特性の解明を行うのが本項目の目的であ

る。作成された数値モデルから仙台湾の流動変動は、風による吹送流や河川からの淡水流入に伴う密度流の変動が要因であることが明らかになった。また、海底直上層の流れが変動していることから、底質の移動も時空間的に変動することが示唆された。そして、底質は等深線に沿って帯状に分布する可能性が示された。

## 2.5 松島湾水理模型実験

2011年の大津波による松島湾の被害は、他の地域に比べて軽微なものであったが、それは湾内に点在する島々が一種の防波堤となって津波の勢いを弱めたためだと考えられる。そこで本項目では、海陸を再現した松島湾の模型を製作し、水理模型実験により島の有無による津波の減勢効果を検討した。その結果、松島町では島がないと津波高が最大5.6m増加すること、浸水面積も3倍強に広がることがわかり、島が防波堤の役割をしていることがわかった。

## 2.6 東北地方南部前弧～島弧域地球化学的・地質学的特性調査

2011年の地震により、東北地方太平洋側の地域全体の地質構造の把握が重要な課題となった。元素の移動・拡散を理解する上では、その供給源である基盤岩類の元素濃度分布が必要であるので、地球化学的情報も重要な地質情報の一つとなる。そこで本項目では、地震による被害を受けた東北南部・北関東の太平洋側の地域における地質学的・地球化学的情報の整備を目指して、地質調査とともに地球化学的調査を実施した。ここまでに岩石の産状や分布の把握を行うとともに、年代測定から調査地域南部の深成岩類の貫入・冷却時期を明らかにした。構成岩石の化学分析を行い、主要な花崗岩類の地球化学的特徴と、地域・岩質に対応した元素毎の濃度の変化を明らかにした。また、これらの化学分析用として、新たにICP発光分析装置を導入した。

## 2.7 ルミネッセンス年代測定実験装置

浅海域堆積物中の歴史津波あるいはそれ以前の津波に関連した堆積物の年代を決定は津波の歴史を評価する上で重要である。ルミネッセンス年代測定は石英や長石といった堆積物に普遍的に含まれている粒子を用いた年代測定法であり、放射性炭素年代測定が使えない試料でも堆積年代を決定できる可能性を持っている。このため、新たにルミネッセンス年代測定装置を導入し、その実験室を構築した。今回、2台の測定装置を導入した。ベータ線源の校正はすでに行い、仙台平野から採取された869年貞観津波堆積物について予察的な測定を行った。その結果、誤差の範囲で一致する年代値が得られたが、年代は過小評価されていた。これは年間線量の見積りに問題がある可能性が示唆され、試料採取方法の検討な

どが必要であることがわかった。

## 文献

- Arai, K., Naruse, H., Miura, R., Kawamura, K., Hino, R., Ito, Y., Inazu, D., Yokokawa, M., Izumi, N., Murayama, M. and Kasaya, T. (2013) Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geology*, **41**, 1195–1198.
- Ikehara, K., Irino, T., Usami, K., Jenkins, R., Omura, A. and Ashi, J. (2014) Possible submarine tsunami deposits on the outer shelf of Sendai Bay, Japan resulting from the 2011 earthquake and tsunami off the Pacific coast of Tohoku. *Marine Geology*, **358**, 120-127.
- Nanayama, F. and Shigeno, K. (2006) Inflow and outflow facies from the 1993 tsunami in southwest Hokkaido. *Sedimentary Geology*, **187**, 139-158.
- Naruse, H., Arai, K., Matsumoto, D., Takahashi, H., Yamashita, S., Tanaka, G. and Murayama, M. (2012) Sedimentary features observed in the tsunami deposits at Rikuzentakata City. *Sedimentary Geology*, **282**, 199-215.
- Saito, Y. (1989) Modern storm deposits in the inner shelf and their recurrence intervals, Sendai Bay, northeast Japan. In Taira, A. and Masuda, F., eds., *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, Terra Scientific Publishing, Tokyo, pp. 331–344.
- 佐々木裕美・入月俊明・阿部恒平・内田淳一・藤原 治 (2007) 房総半島館山市巴川流域にみられる完新世津波堆積物及び静穏時内湾堆積物中の貝形虫化石群集. 第四紀研究, **46**, 517-532.
- Szczuciński, W., Kokociński, M., Rzeszewski, M., Chagué-Goff, C., Cachão, M., Goto, K. and Sugawara, D. (2012) Sediment sources and sedimentation processes of 2011 Tohoku-oki tsunami deposits on the Sendai Plain, Japan - insights from diatoms, nannoliths and grain size distribution. *Sedimentary Geology*, **282**, 40–56.
- Tanaka, G., Naruse, H., Yamashita, S. and Arai, K. (2012) Ostracodes reveal the sea-bed origin of tsunami deposits. *Geophysical Research Letters*, **39**, L05406, doi:10.1029/2012GL051320.
- 内田淳一・阿部恒平・長谷川四郎・藤原 治・鎌滝孝信 (2004) 有孔虫殻の淘汰作用からみた津波堆積物の形成過程—房総半島南部館山周辺に分布する完新統津波堆積物を例に—. 地質学論集, no.58, 87-98.





# マルチビーム音響測深による 2011 年 3 月 11 日に発生した津波 後の仙台湾の海底地形と海底ガレキの調査

## A multibeam survey of bottom topography and benthic marine debris in the Sendai Bay after the tsunami on March 11, 2011

長尾正之<sup>1\*</sup>  
Masayuki Nagao<sup>1\*</sup>

**Abstract:** It is expected that a huge amount of wrecked ships, containers and debris due to the tsunami on March 11, 2011 have settled on the sea bottom in and around the Sendai/Shiogama Port and the Sendai Bay. However, it is hard to know the reality of them. Understanding of intervals of gigantic tsunamis based on the geological survey also needs bathymetric change and bottom sediment transition after the tsunami. We have been conducting a multibeam survey in the Sendai Bay since September 2012 to obtain high-resolution bathymetric data and to map marine debris based on this data. Result based on the marine debris analysis successfully confirmed many tsunami-driven containers on the sea bottom in the Sendai Port.

**Keywords:** 2011 Tohoku earthquake and tsunami, bottom topography change, bathymetric chart, benthic marine debris, multibeam survey, Sendai Bay, Miyagi Prefecture

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う大津波により、宮城県仙台塩釜港やその周辺沿岸域、仙台湾内には、被災した船舶・土砂・コンテナ・ガレキがまだ大量に沈積していると考えられるが、その全容はいまだによくわかっていない。また、地形学的解釈に基づく過去の巨大津波発生履歴の解明には、今回発生した大津波による海底地形や底質変化が重要なデータとなる。そこで、音響を利用した海底探査装置を使った海底地形調査を仙台湾で実施し、高解像度海底地形データを取得する。また、この高解像度海底地形データに基づいて海底ガレキのマッピングを行う。

### 2. 方法

#### 2.1 ワイドバンドマルチビーム測深システム

音響を利用した海底探査装置として、R2 Sonic 社の Sonic 2024 とその付属システムを使用した。Sonic 2024 の艀装時の様子を第1図に、また Sonic 2024 の主な仕様を第1表にそれぞれ示した。

Sonic 2024 は、周波数を 200 kHz から 400 kHz の範囲で任意に変更できる。また、全周波数に対して 60 kHz のバンド幅を持つ。ソナーヘッドは受波器のフラットアレイと半円筒形の送波器から構成されている。音響ビームの受波角度を示すスワ幅は 10° から 160° の範囲で任意に変更できる。また、音響ビーム本数は 256 である。周波数 400 kHz の場合、音響ビームの分解能は進行

方向に対して 1°、進行方向に直交する方向に対して 0.5° である。全周波数に対する地形の鉛直方向分解能は 1.25 cm である。なお、調査に用いた Sonic 2024 は Snippets オプションを備えており、これにより高分解能サイドスキャンイメージを地形データと同時に取得できる。

付属システム(第2図)は、慣性GPSジャイロ(APPLANIX社製, POS MV Wavemaster)、表面音速度計(Veleport社, miniSVS)、鉛直方向音速度計(AML Oceanographic社, SVPS)、ソナーインタフェースモジュール(SIM)、ジャンクションボックス、パソコン、統合型水路測量ソフトウェア HYPACK 2012 (HYPACK 社) から構成される。収集した測深データのノイズ処理、潮位補正、音速度補正、キャリブレーションのためのパッチテスト結果の測深データへの適用は、HYPACK2012で行った。

R2 Sonic 社のワイドバンドマルチビームで海底人工物がどの程度識別可能かを示す一例として、Sonic 2024 の姉妹機である Sonic 2022 (ビーム幅: 1° × 1° @ 400 kHz) が捉えた防波堤周囲の被覆ブロックの研究例が挙げられる(Nagao et al., 2011)。この研究例では、不動テトラ製 X ブロック (3 トン型, 縦横 1.85m) の形状ならびに配列の様子が、Sonic 2022 により明瞭に捉えられていた。

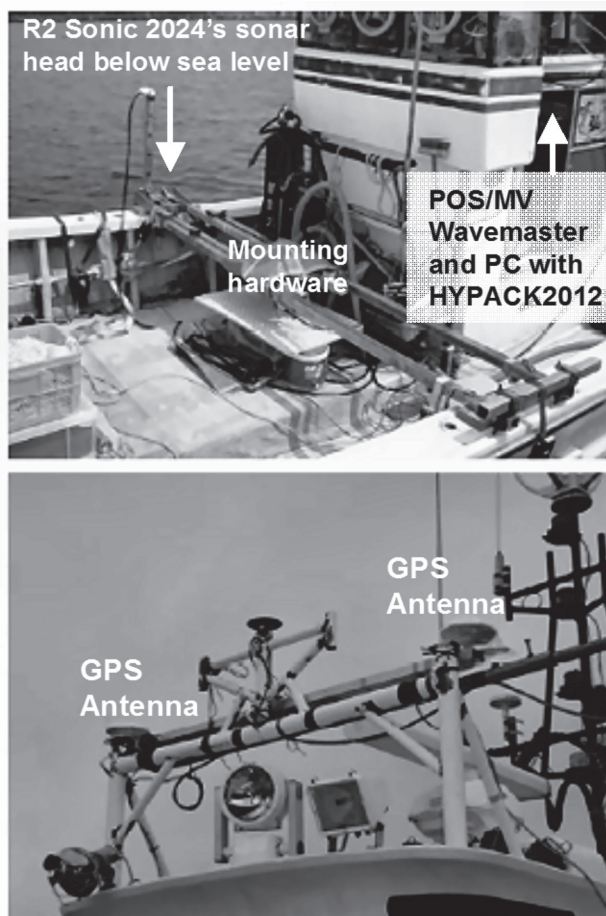
#### 2.2 ガレキ判別

高解像度海底地形データに基づいたガレキ判別は、以下の手順で行った。

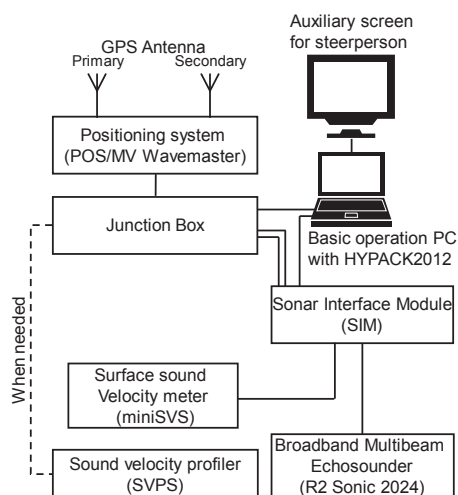
本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成 25 年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである

\*Corresponding author

1. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)



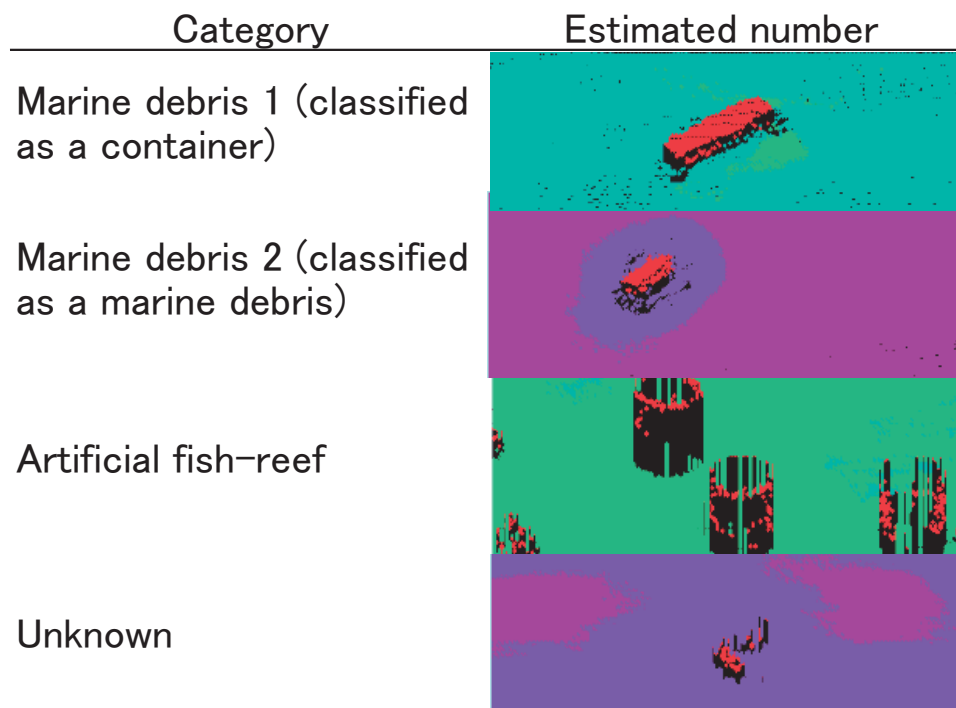
第1図 Sonic 2024 を艦装したはやぶさ丸  
Fig.1 Hayabusa Maru outfitted with Sonic 2024.



第2図 R2 Sonic 2024 とその付属システム  
Fig.2 A system of R2 Sonic 2024 and its accessory system.

第1表 Sonic 2024 システム仕様  
Table 1 Technical specification of Sonic 2024

| Feature          | Specification                    |
|------------------|----------------------------------|
| Frequency        | 200 ~ 400 kHz                    |
| Bandwidth        | 60 kHz, all frequency selections |
| Beamwidth        | 0.5° × 1° @ 400 kHz              |
| Number of beams  | 256                              |
| Swath sector     | 10° ~ 160°                       |
| System range     | 500 m                            |
| Range resolution | 1.25 cm                          |
| Pulse length     | 15 μs ~ 500 μs                   |
| Imagery output   | Snippets backscatter imagery     |



第3図 判別したガレキ（4群）の事例

Fig.3 Representative examples of marine debris classification (four categories).

1) R2 Sonic 2024で調査された測深データに基づいて、精密で正確な海底地形を、格子間隔30 cmの格子上にまず作成する。また、測深データと同時に取得した反射強度データを処理・解析し、反射強度画像を作成する。

2) 1) で作成された海底地形上に、R2 Sonic 2024 で得られた測深データ（原データ）を載せ、その形状から海底ガレキかどうか判別を行う。さらに、判別した海底ガレキに対し、1) で作成した反射強度画像も参照して再精査する。

3) その後、海底ガレキの種類・座標位置をデータベース化する。このデータベースに基づき、海底ガレキ位置を海底地形図上に種類毎にマッピングすることで、海底ガレキ分布図を作成する。

上記手順において、海底地形データ作成、反射強度画像作成、ガレキ判別の処理・解析には、東京大学生産技術研究所 浅田 昭教授と株式会社ウインディーネットワークとが共同開発した「ガレキ判別プログラム」および株式会社ウインディーネットワーク社製「TengunViewer」を使用した。また、マッピングソフトウェアとして、3D-GeoLet（ウインディーネットワーク社）を使用した。

### 2. 3 ガレキ整理

2. 2で判別したガレキを、可視化結果に基づいて下記の4つの群に分類した。なお、この分類結果は、ガレキ可視化結果に基づく推定であり、断定結果ではない。判別したガレキ（4群）の事例を第3図に示した。

「ガレキ1」： コンテナと推定されるもの  
判別基準：

- ・人工物と思われるもの
- ・形状が直方体を成しているもの
- ・各面に凹凸がなく、平面となっているもの
- ・各辺が直角となっているもの
- ・長辺距離が6mまたは12mくらいあるもの
- ・形状周辺が洗掘されていると思われるもの
- ・反射強度画像に反応があるもの

「ガレキ2」： ガレキと推定されるもの  
判別基準：

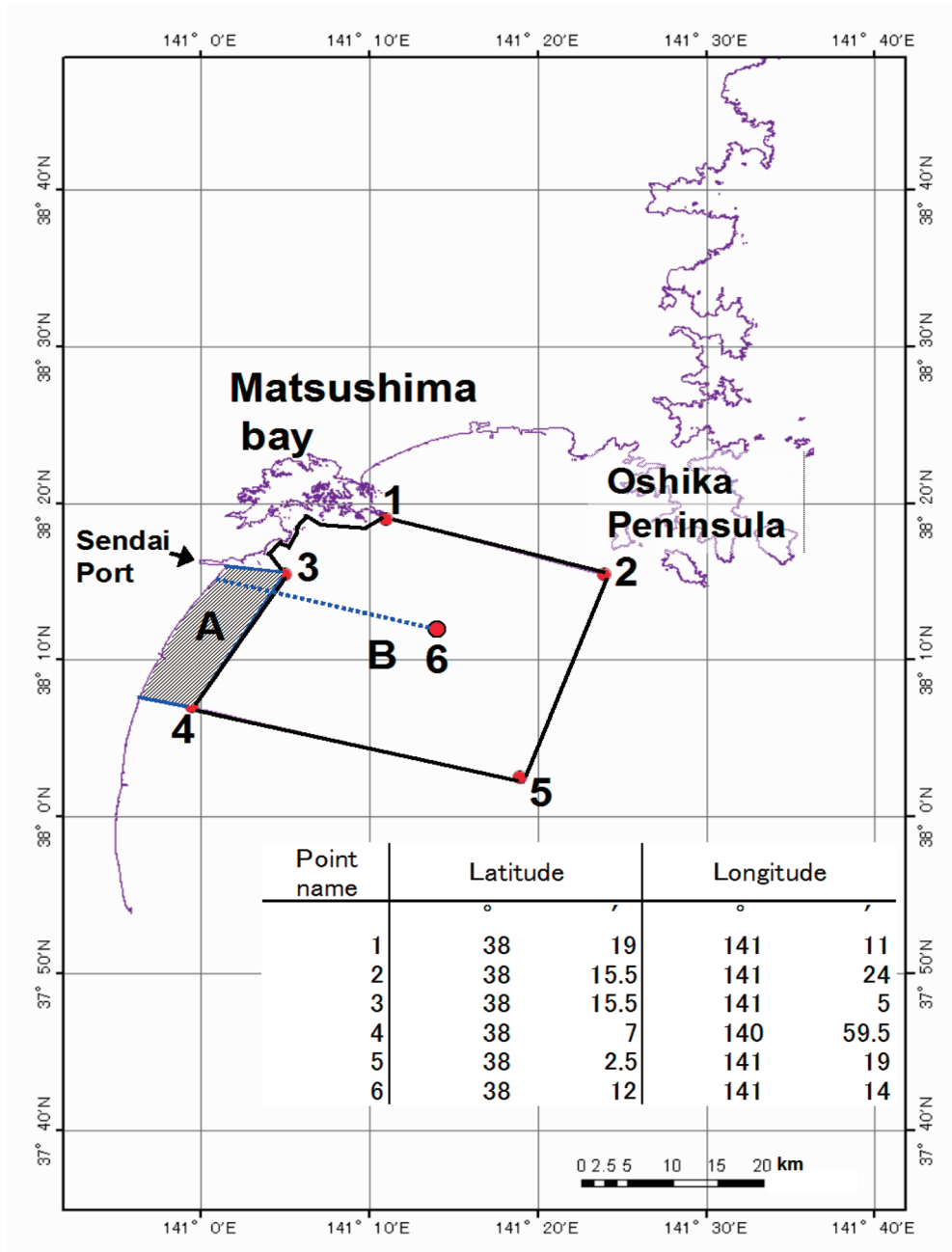
- ・さまざまな大きさがあるが人工物と思われるもの
- ・一定の大きさ以上のもの
- ・構成する点の密度が一定のもの
- ・形状周辺が洗掘されているもの
- ・反射強度画像に反応があるもの

「魚礁」：

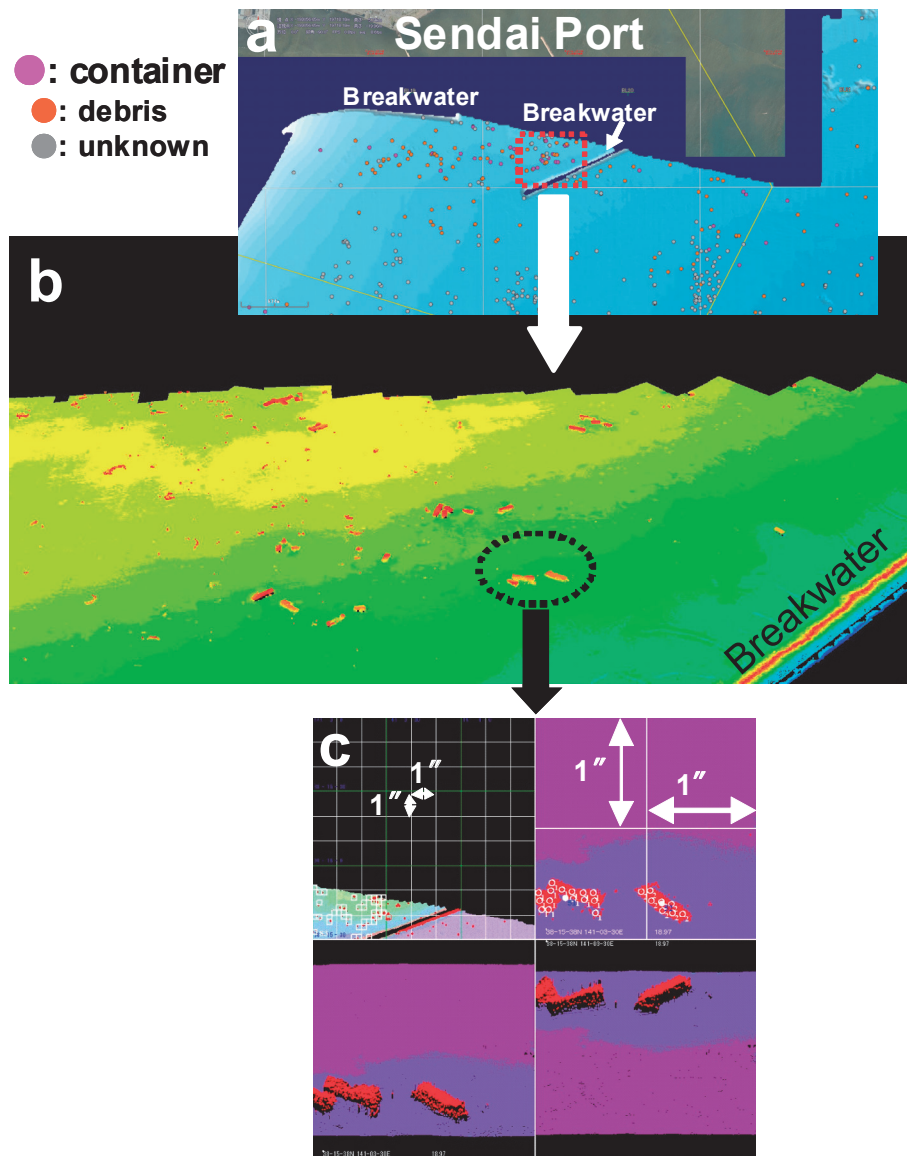
判別基準：

- ・特定の地域に形状が密集しているもの
- ・同一形状の物体が密集しているもの
- ・ある程度規則性を有して配置されているもの

- ・宮城県ホームページに掲載されている「漁場の整備について」（宮城県水産業基盤整備課，2014）の魚礁等設置位置と一致するもの
- ・反射強度画像に反応があるもの



第4図 調査海域  
Fig.4 Survey area.



第5図 仙台湾周辺の海底ガレキ. a.ガレキ分布図, b. a.の枠線内の鳥瞰図, c. b.の枠線内の鳥瞰図 (格子サイズ: 1")

Fig.5 Benthic marine debris on the sea bottom around the Sendai Port. a: debris distribution map, b: a birds-eye view of the domain in a, c: a birds-eye view of the domain in b (grid size: 1").

「不明」:

判別基準:

- ・ガレキと判断できないもの
- ・一定の大きさ以上のもの
- ・構成する点の密度がまばらなもの
- ・点群が単なるノイズではないと思われるもの
- ・反射強度画像に反応がないもの

## 2. 4 調査範囲

調査海域は、宮城県仙台湾 (第4図) とした。2012年9月10日より調査開始し2013年5月7日に完了した。



第2表 ガレキ判別の結果

Table 2 Result of marine debris classification (four categories).

| Category  | Estimated number |
|---|------------------|
| Marine debris 1 (classified as a container)     | 81               |
| Marine debris 2 (classified as a marine debris) | 463              |
| Artificial fish-reef                            | 1,863            |
| Unknown   | 2,092            |

### 3. 結果

第5図は、仙台港近くの海底を点群で表示した海底地形である。多数のガレキが確認されており、形状から判断により、これらの大半が仙台港から津波引き波で海底に運ばれてしまった大型コンテナであると考えられる。

また、ガレキ判別結果を第2表に示した。魚礁および不明も含めると推定ガレキは4,499個だった。その内訳は、コンテナと推測される「ガレキ1」が81個(1.8%)、ガレキと推定される「ガレキ2」が463個(10.3%)、魚礁が1,863個(41.4%)、2,092個(46.5%)となっていた。

### 4. おわりに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う大津波により、宮城県仙台塩釜港やその周辺沿岸域、仙台湾内には、被災した船舶・コンテナ・ガレキがまだ大量に沈積していると考えられたが、全容がよくわかっていなかった。また地質学的解釈に基づく過去の巨大津波発生履歴の解明には、大津波により改変を受けた海底地形や底質変化の把握が重要なデータとなる。そこで、音響を利用した海底探査装置を使った海底地形調査を仙台湾で実施し、高解像度海底地形データを取得した。また、このデータに基づいて海底ガレキの判別、ガレキのマッピングを行った。この結果、多数のコンテナが仙台湾内に存在していることが確認された。

### 謝辞

宮城県漁連および県内関連漁業協同組合からは本調査へのご理解をいただいた。海上保安庁 第二管区海上保安本部、宮城海上保安部からは海底地形調査の遂行にあたり便宜をはかっていただいた。気象庁 地球環境・海洋部 海洋気象情報室 潮汐班からは、海底地形データの潮位補正のために必要な仙台新港潮位記録をご提供いただいた。

困難な冬の気象・海象のなかで、株式会社ウインディーネットワーク 松崎康治氏・杉本裕介氏・吉岡勇哉氏・杉本紀憲氏・藤木俊彦氏、はやぶさ丸 鈴木政志船長、かもめⅢ丸 我妻大船長、その他調査員の方々は、安全を確保しつつ長期にわたり精度の高い仙台湾の海底地形・ガレキ調査業務を現在も遂行中である。調査開始前の関係各所との調整に際しては、株式会社ウインディーネットワーク 松本義徳氏・小川年弘氏の多大なご協力を得た。株式会社ウインディーネットワーク 清水秀人氏には、海底地形図・海底ガレキ判別図の作成にあたって多大なご協力をいただいた。本調査を支えてくださったこれら機関と関係者のご協力に重ねて深く感謝する。

### 文献

- 宮城県水産業基盤整備課 (2014) 漁場の整備について。  
<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/suikisei/gyojyou.html> (2014年10月8日確認)
- Nagao, M., Kan, H., Nakano, K., Takada, S., Ogasawara, H., Nakamura, T., Ohashi, T. and Suzuki, A. (2011) An attempt to find small artificial objects in the shallow sea bottom using broadband multibeam echosounder. Proceedings of International Sessions in Coastal Engineering, JSCE, 2, 51-55.



## 仙台湾陸棚域の表層堆積物：2011年東北地方太平洋沖地震／津波の浅海域海底環境への影響

### Influence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its related tsunami on the shallow sea floor environments: Post-earthquake and tsunami survey results on the Sendai shelf sediments

池原 研<sup>1\*</sup>  
Ken Ikehara<sup>1\*</sup>

**Abstract:** Huge tsunami by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake inundated coastal areas of the northeastern Japan. Because friction velocity at sea floor by the tsunami wave became larger at shelf, the tsunami might agitate and resuspend the shelf sediments in the Sendai Bay. However, we have only a little knowledge on characteristics of the shallow marine tsunami-related deposit. To understand the tsunami influence on the shallow sea floor environments, a survey was carried out to collect 50 surface sediment samples from the inner-mid Sendai shelf in summer 2012. Comparison with the pre-earthquake surface sediment dataset suggested that bottom sediment changes occurred at least several locations on the shelf. Mud deposition was most characteristic change at the northern inner-mid and southern inner shelf. Resuspension and redeposition of shelf mud might occur on the shelf. On the other hand, little change on bottom sediment grain size and sedimentary structure found on the sandy shelf located central-southern mid shelf, although changes in sedimentary structures were found at some locations. Influence of post-earthquake/tsunami flood events on change of bottom sediments near the river mouth should be considered.

**Keywords:** tsunami, surface sediments, sediment resuspension, sediment transportation, Sendai Bay

#### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波は三陸沿岸域を中心に北海道から関東までの広い範囲に被害を発生させた。津波は陸上に遡上して被害をもたらすだけでなく、海底にまで影響を及ぼすと考えられる。浅海底に存在していた巨礫が津波によって陸上に打ち上げられた津波石の存在（例えば、Goto et al., 2007）や遡上型津波堆積物中に陸棚～上部斜面域に棲息する底生微化石が含まれることがあること（例えば、内田ほか, 2004; Nanayama et al., 2006; 佐々木ほか, 2007 など）は津波による浅海域での土砂移動現象の存在を示唆する。また気仙沼湾では、1960年チリ津波の際に海底地形の変化が生じたことも報告されている（高橋ほか, 1991 など）ほか、2011年東北地方太平洋沖地震による津波でも海底地形が変化したり、大型ベッドフォームが形成されている（秋元ほか, 2012; Haraguchi et al., 2013 など）。しかし、より沖合域では、津波による堆積物輸送やベッドフォームの形成が推定されている（例えば、Pickering et al., 1991）ものの、実際にある特定の津波による堆積物輸送やベッドフォーム形成の報告例は Noda et al. (2007) くらいしか知られておらず、これまではその詳細はよく分かっていなかった。2011

年の津波によって沖合の海底堆積物が巻き上げられたり、再移動／再堆積させられたことが明らかになってきた（Arai et al., 2013; Ikehara et al., 2014）が、開放型の陸棚上での実例の報告はほとんどない。一方で、仙台平野に形成された遡上型津波堆積物のほとんどには海域起源の粒子が含まれていないこともわかってきた（例えば、Szcucinski et al., 2012 など）。以上のように津波による土砂輸送現象は海域から陸域までに渡るため、その詳細の理解のためには海域と陸域を統合した解析が必要となるが、陸域に比べて海域のデータは十分とは言えない。仙台湾では1985年に環境庁（当時）の公害特研により表層堆積物の調査研究が行われた（大嶋ほか, 1986, 1987）。仙台湾陸棚域を網羅した系統的な表層堆積物の採取と分析がなされたこの調査データは地震前の仙台湾の海底環境の指標として重要であり、仙台湾は地震／津波が海底環境に与える影響を評価するのに重要な場所である（池原, 2012）。

本課題では、仙台湾において表層堆積物試料を採取し、1985年の調査データと比較することで2011年東北地方太平洋沖地震による津波が仙台湾陸棚域の海底環境に与えた影響を評価することを目標とした。具体的には1985年の調査地点の中から水深100m程度までの50地点を選定し、同じ地点でほぼ同じ方法により海底表層堆

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. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)



第1図 調査に使用した船舶 (A) と採泥器 (B)  
 Fig.1 Ship (A) and grab sampler (B) used for the survey.

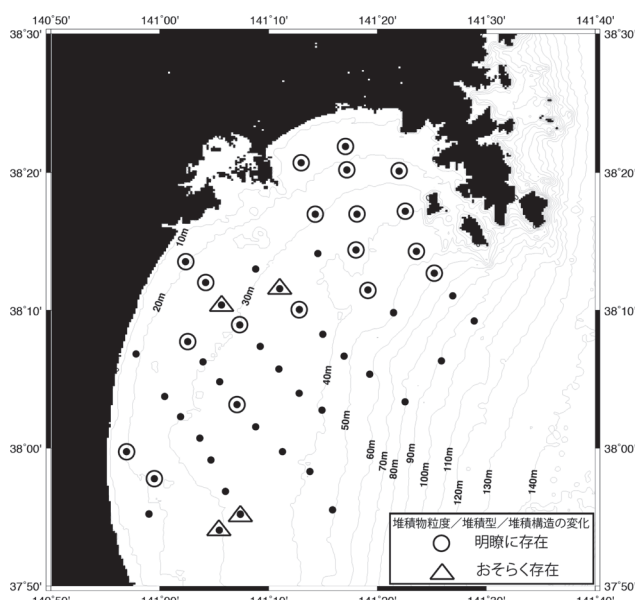
積物試料の採取と分析を行った。ここではこれまで得られている調査結果の概要について報告する。

## 2. 調査方法と分析方法

海底表層堆積物試料の採取は、第二十一えびすや丸 (10.0 トン) により、採泥面積が 33×33cm のスミス・マッキンタイヤー式グラブ採泥器 (第1図) にて行った。これにより厚さ 6-17cm 程度の試料が採取された。試料採取地点は、1985 年の調査地点から仙台湾中部陸棚までのほぼ全域を網羅できるように 50 地点を選定した (第2図)。船位は海上保安庁運用の DGPS 基準局 (金華山局 316.0kHz) の補正情報を GPS/ビーコン受信機 (Trimble SPS351) で受信して使用する D-GPS 方式とした。使用前の座標既知点 (四等三角点 鈴平山) における精度試験によれば、測位精度は誤差±1m 以内であった。採泥点における水深は千本電機製精密音響測深機 PDR-1300 の送受波器を調査作業船の舷側に取りつけて行った。水深の基準面は東京湾平均海水面とし、潮位補正は気象庁の仙台新港 (臨時) 験潮所の観測データを用いて行った。水中での音速補正に必要な水温・塩分データは海底堆積物採取作業時に水温・塩分計により取得し、水深を補正した。

船上の揚収されたグラブ採泥試料は、以下の手順で計測、記録、試料採取を行った。

- (1) 採泥器の船上への揚収
- (2) 採泥器のふたを開け、試料表面から 1cm 及び 5cm 位置での実効線量の測定と記録
- (3) 試料表面の写真撮影と記録
- (4) サブコア試料 (2 本)、表層試料、亜表層試料の採取・保管
- (5) 陸上での二枚貝分析用試料の採取・保管 (10



第2図 試料採取地点と表層堆積物に変化がみられた場所  
 Fig.2 Sampling locations. Remarkable (○) and slight change (△) on bottom sediments were found at sampling sites on Sendai Bay.

地点)

以上の現場における試料採取作業は、三洋テクノマリン株式会社が 2012 年 8 月 27 日～9 月 8 日の期間に実施した。

採取されたサブコア試料は産総研において以下の手順で処理、分析を行った。

- (1) 包丁による軟X線構造解析用試料と粒度・組成分析用試料との切り離し
- (2) 試料断面の観察と記載
- (3) 粒度・組成分析用試料から粒度分析用試料の分取

(4) 一部試料については同じ試料から放射能測定用試料の1cmあるいは0.5cm厚での分取

(5) 軟X線構造解析用試料を用いた軟X線透過画像の撮影

(6) 試料断面の観察結果と軟X線透過画像の1985年の調査結果との比較

### 3. 結果と考察

予定していた50地点すべてから表層堆積物試料を採取できた。採泥点108では予定地点で3回の採取を試行したが試料がほとんど採取できなかったため、船を東へ10mほど移動させて試料採取を行った。採取された堆積物試料の概要は第1表にまとめた。第1表には大嶋ほか(1986)に記載されている1985年の調査時の含泥率と堆積構造型もあわせて示した。この概要が示す表層堆積物の粒度の分布状況は、仙台湾北部の内側～中部陸棚上

と沖浜斜面の基底の沖合並びに金華山南方の中部陸棚には泥が、仙台湾中部～南部の陸棚上には広く砂質～砂礫質堆積物が分布することを示す。この概要は、大嶋ほか(1986)のそれと数地点を除いて大きく変わるものではなく、仙台湾陸棚域において大規模な底質の変化はなかったことを示している。特に、仙台湾の中部～南部の内側～中部陸棚上に広く分布する砂質堆積物にはその粒径や堆積構造に顕著な変化は認められない。しかし、金華山南西沖や岩沼東方沖中部陸棚では1985年当時よりも細粒な砂が表層に認められ、名取東方沖中部陸棚では1985年には泥質堆積物が分布していた場所の表面に砂が存在する。これらは1985年以降に細粒な砂が移動した現象があったことを示す。Sugawara and Goto (2012)は仙台湾陸棚域で砂質堆積物を動かすに十分な海水の流動があったことを数値計算から示した。今後実施予定の堆積物の詳細な粒度分析などによるより詳細な検討が必要である。

一方、数地点では表面に明らかな泥の堆積が認められ

第1表 仙台湾の1985年と2012年の堆積物の比較

Table 1 Comparison of Sendai shelf sediments collected in 1985 and 2012.

| 地点番号 | 水深2012年 | 2012年の堆積物型 | 1985年の堆積物型 | 1985年の含泥率 | 底質／堆積型／堆積構造の変化の有無 | 地点番号 | 水深2012年 | 2012年の堆積物型 | 1985年の堆積物型 | 1985年の含泥率 | 底質／堆積型／堆積構造の変化の有無 |
|------|---------|------------|------------|-----------|-------------------|------|---------|------------|------------|-----------|-------------------|
| 2    | 20.55   | R          | R          | 94.80     | ○                 | 84   | 47.60   | H          | H          | 0.03      | ×                 |
| 4    | 19.71   | H          | I          | 82.96     | ○                 | 86   | 99.04   | I          | I          | 68.40     | ×                 |
| 6    | 27.13   | R          | R          | 98.22     | ○                 | 94   | 22.50   | H          | H          | 0.05      | ×                 |
| 8    | 29.34   | R          | I          | 99.28     | ○                 | 96   | 30.86   | H          | H          | 0.03      | ×                 |
| 12   | 33.22   | R          | R          | 92.44     | ○                 | 98   | 38.68   | H          | H          | 0.17      | ×                 |
| 13   | 39.73   | R          | R          | 61.10     | ○                 | 108  | 57.04   | I          | I          | 8.31      | ×                 |
| 14   | 42.45   | R          | I          | 98.94     | ○                 | 110  | 33.78   | H          | H          | 0.04      | ×                 |
| 19   | 41.95   | R          | R          | 98.06     | ×                 | 112  | 41.22   | I          | I          | 10.06     | ×                 |
| 20   | 41.37   | V(H)       | V          | 0.47      | ○                 | 120  | 82.34   | H          | H          | 0.06      | ×                 |
| 21   | 51.23   | V(H)       | V          | 0.05      | ○                 | 122  | 28.59   | H          | H          | 0.01      | ○                 |
| 22   | 22.34   | R          | I          | 96.71     | ○                 | 124  | 36.65   | H          | H          | 0.02      | ×                 |
| 24   | 32.11   | I          | I          | 41.87     | ×                 | 134  | 45.11   | H          | H          | 0.02      | ×                 |
| 28   | 65.22   | R          | I          | 95.96     | ○                 | 136  | 31.27   | H          | H          | 0.18      | ×                 |
| 37   | 26.79   | R          | I          | 80.64     | ○                 | 147  | 38.70   | H          | H          | 0.05      | ×                 |
| 39   | 37.35   | I          | I          | 80.69     | △                 | 149  | 33.04   | H          | H          | 0.04      | ×                 |
| 41   | 45.60   | H          | H          | 0.09      | ×                 | 159  | 39.68   | H          | H          | 0.05      | ×                 |
| 43   | 82.40   | I          | I          | 97.15     | ×                 | 161  | 22.90   | H          | H          | 0.06      | ×                 |
| 52   | 30.92   | I          | I          | 53.71     | △                 | 168  | 33.75   | R          | H          | 0.05      | ○                 |
| 54   | 39.55   | H          | I          | 77.96     | ○                 | 170  | 47.45   | H          | H          | 0.06      | ×                 |
| 56   | 56.28   | V(H)       | V          | 2.07      | ○                 | 172  | 26.27   | H          | H          | 1.85      | ×                 |
| 58   | 103.13  | I          | I          | 43.22     | ×                 | 181  | 32.36   | H          | H          | 0.02      | △                 |
| 67   | 34.00   | H          | I          | 38.05     | ○                 | 188  | 52.27   | H          | V          |           | ?                 |
| 69   | 42.20   | H          | H          | 0.03      | ×                 | 190  | 33.44   | H          | H          | 0.06      | △                 |
| 80   | 29.03   | R          | I          | 35.88     | ○                 | 224  | 19.22   | I          | I          | 11.98     | ×                 |
| 82   | 35.67   | H          | I          | 16.18     | ×                 | 234  | 30.85   | R          | I          | 16.77     | ○                 |

堆積物型：R:規則型, I:不規則型, H:均一型, V:薄層型 (分類は、大嶋ほか(1986)による)

底質／堆積型／堆積構造の変化の有無：○ 明瞭に存在, △ おそらく存在, × なし, ? 不明



る。泥の堆積が認められたのは、金華山西方沖の中部陸棚域と山元東方沖の内側陸棚域に位置する（第2図）。また、仙台湾北部の内側～中部陸棚上の泥は、生物擾乱に乏しい構造に変化していたり、上方に細粒化する級化構造がみられるものもあった。これらの底質や堆積構造の変化が2011年の地震／津波によるものかは今後実施予定の放射能測定結果を踏まえて判断されるべきであるが、より沖合の仙台湾外側陸棚でも同様な変化が認められていて、放射能測定の結果はこれが2011年の地震／津波によるものであると認定されていること（Ikehara et al., 2014）から、今回仙台湾内側～中部陸棚で認められた泥の堆積も2011年の地震／津波によるものである可能性が高い。仙台湾北部～中部の内側～中部陸棚に広く分布する泥質堆積物（大嶋ほか, 1986；Saito et al., 1989）が、地震と引き続く津波の強い営力（Sugawara and Goto, 2012）により再懸濁、再移動して最表層に堆積したものであると考えられる。

これに対して亙理沖の内側陸棚域での新たな泥の堆積は、仙台湾北部の泥分布域からは離れており、その間に新たな泥の堆積場所が認められないことから、阿武隈川河口沖から供給された可能性がある。この堆積物は、下部の砂質部分が上方粗粒化するハイパーピクナイトの特徴（Mulder et al., 2003）を有しており、2011年の地震／津波によるというよりも、その後の洪水時に阿武隈川から排出された土砂による洪水堆積物の可能性を示唆する。洪水時には放射性物質を含んだ土壌も排出されると考えられる上、放射性セシウムが粘土鉱物に吸着して運ばれる過程も想定される（例えば、Otosaka and Kobayashi, 2013）ので、陸域から海域を含めた放射性物質の動態の把握のためにも、その起源の評価が重要である。阿武隈川河口周辺域を含めた河川から海域にわたる詳細な調査観測が必要である。

今回得られた表層堆積物試料には1985年よりは小さいものの、生物擾乱が広く確認できた。Sugawara and Goto (2012)の計算結果やIkehara et al. (2014)の仙台湾外側陸棚のイベント堆積物の堆積機構の考察を考慮すれば、仙台湾内側～中部陸棚の表層堆積物は再移動あるいは再懸濁された可能性が高い。物理的な再移動／再懸濁後に堆積したイベント堆積物は生物擾乱を受けていない。今回の観察事実は、今回の調査が行われた地震後の約1.5年程度の間にも底生生物は陸棚域に戻ってきて活動していることを示している。

## 謝辞

調査の実施にあたって、宮城県、宮城県漁連、地元各漁業協同組合の方々には大変お世話になった。また、現場での採泥作業は三洋テクノマリン株式会社を実施し

ていただいた。特に、同社の島崎哲也氏、菅原憲博氏には調査作業自体はもとより、調査実施前の打ち合わせ、地元漁協との調整など含め、大変お世話になった。最後に、今回得られた表層堆積物試料は、産総研内の共同研究者である田村 亨氏、澤井祐紀氏、中島 礼氏、原 淳子氏らのほか、外部の研究者の協力も得て分析を進めていることを記しておく。

## 文献

- 秋元和實・滝川 清・矢北孝一・外村隆臣・滝野義幸 (2012) 気仙沼湾における20110311津波の地形・底質への影響. 日本地球惑星科学連合2012年大会講演要旨, MIS25-04.
- Arai, K., Naruse, H., Miura, R., Kawamura, K., Hino, R., Inazu, D., Yokokawa, M., Izumi, N., Murayama, M. and Kasaya, T. (2013) Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Geology*, **41**, 1195-1198.
- Goto, K., Chavanich, S.A., Imamura, F., Kunthasap, P., Matsui, T., Minoura, K., Sugawara, D. and Yanagisawa, H. (2007) Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. *Sedimentary Geology*, **202**, 821-837.
- Haraguchi, T., Goto, K., Sato, M., Yoshinaga, Y., Yamaguchi, N. and Takahashi, T. (2013) Large bedform generated by the 2011 Tohoku-oki tsunami at Kesenuma Bay, Japan. *Marine Geology*, **335**, 200-205.
- 池原 研 (2012) 地震／津波による浅海域での粒子輸送・堆積現象：過去の地震／津波イベントの理解のための海底堆積物の現状と課題. 堆積学研究, **71**, 141-147.
- Ikehara, K., Irino, T., Usami, K., Jenkins, R., Omura, A. and Ashi, J. (2014) Possible submarine tsunami on the outer shelf of Sendai Bay, Japan resulting from the 2011 earthquake and tsunami off the Pacific Coast of Tohoku. *Marine Geology*, **358**, 120-127.
- Mulder, T., Syvitski, J.P.M., Migeon, S., Faugeres, J.-C. and Savoye, B. (2003) Hyperpycnal turbidity currents: Initiation, behavior and related deposits: A review. *Marine and Petroleum Geology*, **20**, 861-882.
- Nanayama, F. and Shigeno, K. (2006) Inflow and outflow facies from the 1993 tsunami in southwest Hokkaido. *Sedimentary Geology*, **187**, 139-158.

- Noda, A., Katayama, H., Sagayama, T., Suga, K., Uchida, Y., Satake, K., Abe, K. and Okamura, Y. (2007) Evaluation of tsunami impacts on shallow marine sediments: An example from the tsunami caused by the 2003 Tokachi-oki earthquake, northern Japan. *Sedimentary Geology*, **200**, 314-327.
- 大嶋和雄・横田節哉・斎藤文紀・鈴木泰輔・松本英二・池田国昭・村瀬正・羽坂俊一 (1986) 開口性沿岸海域開発に伴う底質汚染予測技術に関する研究. 昭和60年度国立機関公害防止等試験研究成果報告書, 54-1-54-28.
- 大嶋和雄・横田節哉・斎藤文紀・鈴木泰輔・松本英二・池田国昭・羽坂俊一・村瀬正 (1987) 開口性沿岸海域開発に伴う底質汚染予測技術に関する研究. 昭和61年度国立機関公害防止等試験研究成果報告書, 54-1-54-34.
- Otosaka, S. and Kobayashi, T. (2013) Sedimentation and remobilization of radiocesium in the coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Environmental Monitoring and Assessment*, **185**, 5419-5433.
- Pickering, K.T., Soh, W. and Taira, A. (1991) Scale of tsunami-generated sedimentary structures in deep water. *Journal of the Geological Society*, London, **148**, 211-214.
- Saito, Y. (1989) Modern storm deposits in the inner shelf and their recurrence intervals, Sendai Bay, northeast Japan. In Taira, A. and Masuda, F., eds., *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, 331-344 Terra Scientific Publishing, Tokyo.
- 佐々木裕美・入月俊明・阿部恒平・内田淳一・藤原治 (2007) 房総半島館山市巴川流域にみられる完新世津波堆積物及び静穏時内湾堆積物中の貝形虫化石群集. 第四紀研究, **46**, 517-532.
- Szczucinski, W., Kokocinski, M., Rzeszewski, M., Chague-Goff, C., Cacho, M., Goto, K. and Sugawara, D. (2012) Sediment sources and sedimentation processes of 2011 Tohoku-oki tsunami deposits on the Sendai Plain, Japan – Insights from diatoms, nannoliths and grain size distribution. *Sedimentary Geology*, **282**, 40-56.
- Sugawara, D. and Goto, K. (2012) Numerical modeling of the 2011 Tohoku-oki tsunami in the offshore and onshore of Sendai Plain, Japan. *Sedimentary Geology*, **282**, 110-123.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1991) 津波による流れと海底変動に関する研究-1960年チリ津波の気仙沼湾での場合-. 海岸工学論文集, **38**, 161-165.
- 内田淳一・阿部恒平・長谷川四郎・藤原治・鎌滝孝信 (2004) 有孔虫殻の淘汰作用からみた津波堆積物の形成過程-房総半島南部館山周辺に分布する完新統津波堆積物を例に-. 地質学論集, no.58, 87-98.





# 仙台湾における津波堆積物の輸送特性 Transportation of tsunami deposit in Sendai Bay, Japan

高橋 暁<sup>1\*</sup>  
Satoru Takahashi<sup>1\*</sup>

**Abstract:** The tsunami generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake caused catastrophic damage to the Sanriku area (north east part of Japan). On the other hand, risks of the arsenic and heavy metals are known to be high in the plains part of Miyagi Prefecture (a part of Sanriku area) where the deposit exists in the mountainous district. And, these materials are discharged to Sendai Bay. That is, it is expected that an environmental risk related to the arsenic and heavy metals exists at the bottom of Sendai bay. Therefore, we aimed at the clarification of the characteristics of the sediment transport in Sendai bay, to evaluate environmental risks that relate to the arsenic and heavy metals. As a first, water flow in Sendai bay was calculated by using the numerical model due to the clarification of the characteristics of the sediment transport. In this paper, the yearly fluctuation of the residual current is mainly introduced (calculation period is one year from March 5, 2011 to March 10, 2012).

As a result model experiment, phenomena in the open ocean are predominant in the area that is deeper than 200m (outside of continental sloop). On the other hand, the residual current in Sendai bay fluctuates through the year, and it is revealed that river discharge and wind strongly influence the fluctuation of the residual current in Sendai bay. Furthermore, the residual current in bottom level fluctuates through the year, too. This fact suggests that, sediment transport on the sea bed fluctuates through the year.

**Keywords:** tsunami deposit, sediment transport, Sendai Bay, numerical model experiment

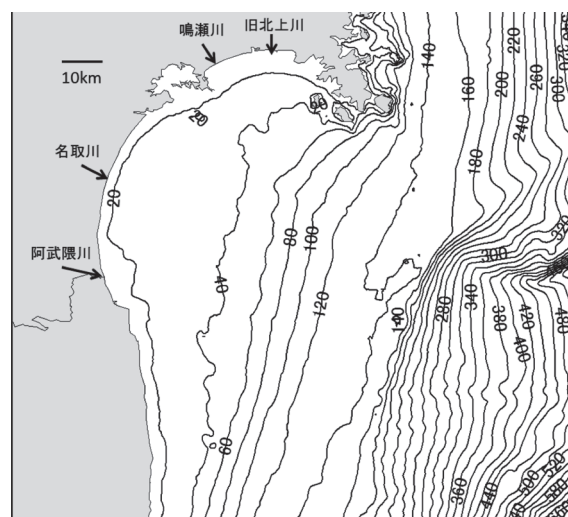
## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波は、三陸海岸に壊滅的な被害をもたらした。一方、山間部等に鉱床が存在する宮城県の下野部等ではヒ素や重金属類のリスクが高いことが判明している。また、これら物質が流入する宮城県沖、三陸沿岸の海洋底にはヒ素や重金属類に関わる環境リスクを内包する海洋底堆積物があることも予想されている(土屋, 2011)。これらのことから、津波により、海底に堆積していたヒ素や重金属類が陸上に運ばれたと同時に、陸上にあったヒ素や重金属類が海域に流出したと考えられ、環境への影響が懸念されている。そこで、これら有害物質による土壌や底質の汚染リスクの評価を目的に、仙台湾内におけるヒ素や重金属類の挙動を把握するために、数値モデル実験を通じて、底質の移動特性を解明する。

## 2. 数値モデル実験

流況再現に用いた数値モデルはレベルモデルで、水平500m×500m、鉛直12層(層厚3, 3, 4, 5, 5, 10, 10, 20, 40, 100, 150, 150m)の空間解像度である。開境界では水位変動を国立天文台のNAO.99bにより与えた。水温・

塩分・平均海面の初期値および開境界値は JAMSTEC の JCOPE2 (2009) を、海面風応力は気象庁の MSM を、海面熱収支に関しては仙台気象台のデータを使用した。仙台湾に流入する旧北上川・鳴瀬川・名取川・阿武隈川の河



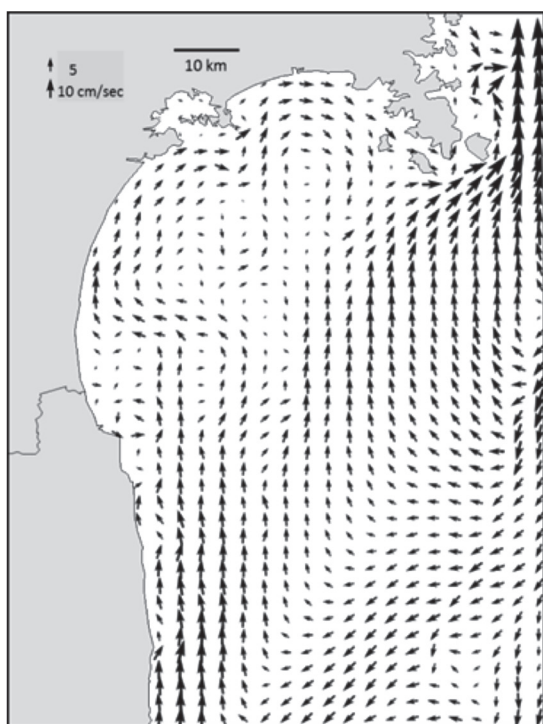
第1図 モデル海域と水深分布。図中の数値は水深(m)を示す。

Fig.1 Model domain. Numeric shows water depth in (m).

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

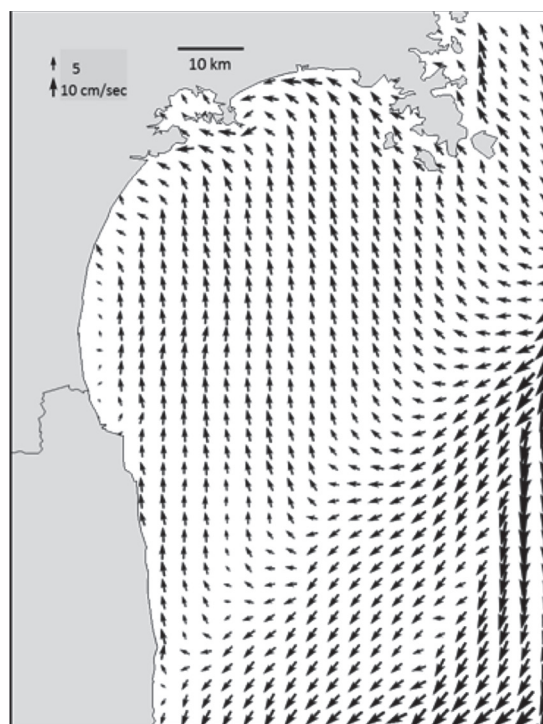
\*Corresponding author

1. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)



第2図 2011年8月1日の日平均流(表層). ベクトルは3km 毎に表示.

Fig.2 Daily mean current vector at surface level on August 1, 2011.



第3図 2012年1月1日の日平均流(表層). ベクトルは3km 毎に表示.

Fig.3 Daily mean current vector at surface level on January 1, 2012.

川流入を流量年表から入手可能な最新5カ年(2003-2007)を用い、日平均値として与えた。第1図に示した計算領域において、計算は2011年3月1日から開始し、2012年3月10日まで行った。計算結果は、宮城県水産試験場による水温・塩分の観測データや、験潮所での水位等と比較され、その再現性が確かめられた。

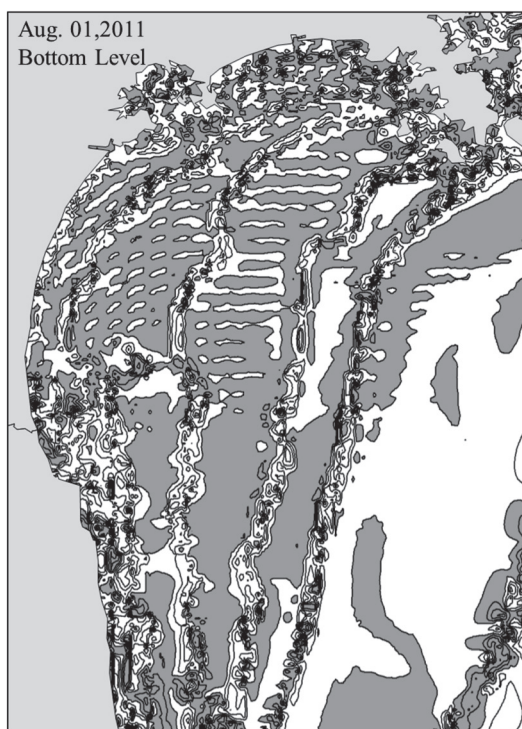
### 3. 流況変動

第1図の水深分布を見ると、仙台湾内の海底は水深20mから40m付近まで比較的なだらかであり、水深約200mで陸棚斜面となり湾の南東側(上が北)で急激に水深が深くなっている様子がうかがえる。第2図と第3図にそれぞれ示した2011年8月1日と2012年1月1日における表層の日平均流を見ると、夏(8月)冬(1月)ともに、水深に沿うように沖合で南西向きに流れ、仙台湾奥に行くに従い北へ流向を変え湾奥に流入している。夏は松島湾周辺で岸に沿って西向きへと流向を変えているが、冬は岸に沿って北上し、湾外へと流出している。また、仙台湾内に反時計回りの循環流も見られる。水深に沿った流れは、開境界で与えた水位変動が流れの駆動力となっていることが確かめられた。この水位変動は外洋域の変動がその由来であるので、水深に沿った流れの変

動は、外洋域の変動によって引き起こされていると考えられる。一方、湾内の流れについても、風や河川からの淡水流入に伴う吹送流や密度流はあまり卓越せず、外洋域の流れの補流的な流れが卓越しているようである。なお、図は示さないが、底質移動特性解明に重要な海底直上層の流れも時間的な変動を示していた。このことは、底質の移動も時間的に変動することを示唆している。

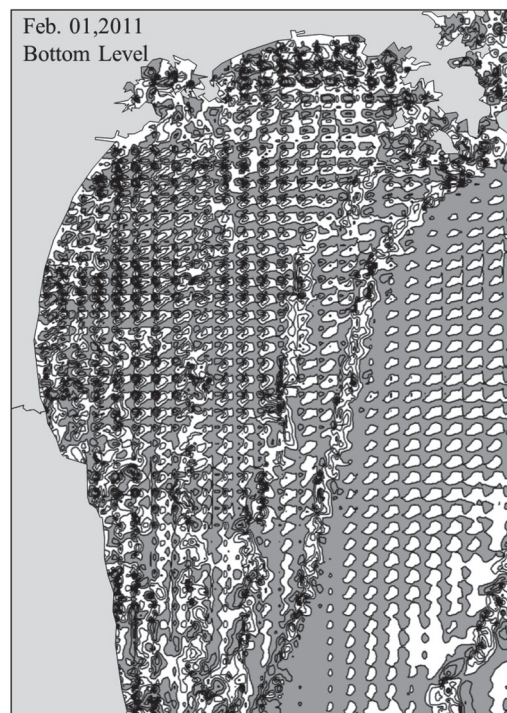
### 4. 底質の移動特性

底質の集まりやすさの指標となる底層残差流の収束域と発散域を求めた(高橋・村上, 2002)。2011年8月1日の結果を第4図に、2012年2月1日の結果を第5図にそれぞれ示す。両図を見比べると、時間的にも空間的にも収束と発散の分布域が変動していることがわかる。しかしながら、収束域と発散域の分布はシステムティックではなく、小規模な収束域と発散域が交互に分布している様子が窺える。このことは、底層残差流は収束・発散を起こさない、シア無しの流れであることを示している。つまり、仙台湾で卓越する流れは、シアのほとんど無い外洋起源の流れに支配されていることを示唆している。



第4図 2011年8月1日の底層残差流の収束域(ハッチ部)と発散域(白抜き部)

Fig.4 Convergence area (hatched area) and divergence area of residual current at bottom level on August 1, 2011.



第5図 2012年2月1日の底層残差流の収束域(ハッチ部)と発散域(白抜き部).

Fig.5 Convergence area (hatched area) and divergence area of residual current at bottom level on January 1, 2012

ここで、外洋起源の流れであっても、水深が浅くなると水柱が短くなるため、渦度が生じシアが発生する、つまり流れに収束と発散が生まれるはずである。このことを踏まえて、再度第4図と第5図を見ると強い収束域が水深に沿って細長く走っている様子が見られる。今回使用した数値モデルはレベルモデルであるため、水深変化は階段状になっており、この収束域の線は水深が変化する狭間に走っている。このことは、水深が階段状ではなく、なだらかに変化した場合、収束域と発散域は水深に沿って帯状に分布する可能性が高いことを示している。ただし、これを確かめるためには、水深がなだらかに変化するシグマ座標を採用したモデルを新たに構築する必要があるため、今後の課題としたい。

## 文献

- Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J.-S., Okuno, A., Yoshinari, H., Setou, T. and Komatsu, K. (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanogr.*, **65**, 737-756.
- 高橋 暁・村上和男 (2002) 瀬戸内海忠海沖における海砂利採取の影響—底質移動特性—. 海岸工学論文集, **49**, 1356-1360.
- 土屋範芳 (2011) 北上山地と仙台平野の地質環境と津波堆積物. 地圏資源環境研究部門成果報告書 2011 (GREEN REPORT 2011), 6-9.





# 水理模型実験による松島湾の津波特性

## Hydraulic model experiments on characteristics of tsunami in Matsushima Bay

山崎宗広<sup>1\*</sup>  
Munehiro Yamasaki<sup>1\*</sup>

**Abstract:** Matsushima Bay incurred slightly less damage than other areas because of the tsunami that struck after the Tohoku earthquake. I think that this is because the islands of Matsushima Bay weakened the force of the tsunami. In this study, we carried out hydraulic model experiments on tsunami mitigation by islands in Matsushima Bay. In the experiment in which the island was not present, the flooded area increased by three times and tsunami was increased to 5.6 m in Matsushima-machi. Our experimental results indicate that islands play the role of a breakwater.

**Keywords:** hydraulic model experiment, tsunami, Tohoku Earthquake, Matsushima Bay

### 1. はじめに

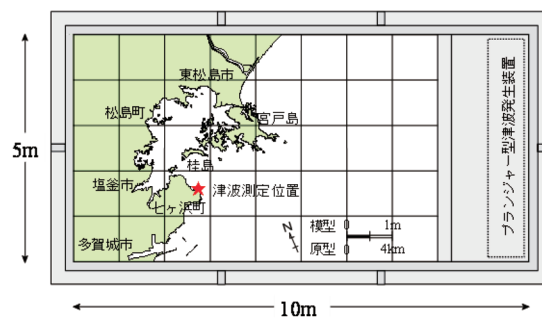
2011年東北地方太平洋沖地震により大津波が各市町村に破滅的な被害をもたらした。小荒井ほか(2011)がまとめた県別の浸水面積をみると、宮城県が327km<sup>2</sup>と圧倒的に大きい。その浸水面積の大きい宮城県東松島市から仙台市宮城野区までの各市町村における浸水率(浸水率は浸水面積と各市町村面積の比)は、松島町と利府町を除いてどの区域も31~36%ほどあり街のほぼ3分の1が浸水した。松島町は浸水率の高い東松島市と塩釜市の間にあるが浸水率は5%と非常に低く、また津波による建物崩壊等の被害(土木学会東日本大震災特別委員会, 2012)も軽微なものであった。これは松島湾の入り口に宮戸島や桂島などの浦戸諸島が一種の防波堤となって津波の勢いを弱めたためだと考えられる。この島による津波減勢効果を明らかにすれば、今後の津波対策や瀬戸内海等の多島を抱える内湾域での津波リスク評価の資料となる。

津波の研究は数値実験で数多くなされているが、水理模型実験は細かい地形が再現でき、津波を具体的に視覚で確認できる。そこで本研究では、水理模型で類をみない海陸域を再現した松島湾の水理模型により、3.11大震災による津波の振る舞いと島嶼部の有無による津波減勢効果を実験的に検討した。

### 2. 水槽実験装置と津波実験の内容

#### 2.1 松島湾の地形と松島湾水理模型

松島湾は東西12km、南北8kmほどの小湾である。湾内の水深は浚渫された航路部分を除くと2~4m、島々の間を通る水道部の水深は10~15mほどあり、松島湾には264の島々が点在している。



第1図 松島湾水理模型

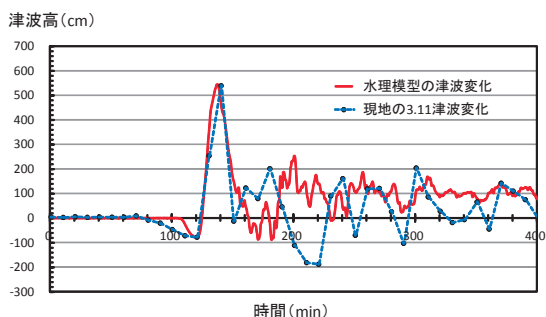
Fig.1 Matsushima Bay hydraulic model.

実験装置である水理模型は、これら松島湾の地形を再現した。松島湾水理模型の平面図を第1図に示す。松島湾水理模型の範囲は、水藤ほか(2011)が示した地震時の地殻変動より津波の進入方向を考慮して決め、縦5m、横10mの平面水槽内に製作した。この水理模型は、津波浸水や津波高を評価するために「海域-海岸線-陸

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. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST) (現所属: 中国センター-中国産学官連携センター (Chugoku Collaboration Center, AIST Chugoku))



第2図 七ヶ浜町沖における津波の比較

Fig.2 Temporal change of the tsunami height in Shichigahama-machi offing.

域」を連続で水平方向 1/4000、鉛直方向 1/200 に縮小したモルタル製の三次元模型となっている。松島湾に点在する島は、島の周囲 400m 以上の 40 島を再現して着脱可能とし、陸域の地形は標高 50m までを再現した。また松島湾内にある防波堤は規模が小さいことから再現せず、仙台港沖の 3 カ所のみ再現した。水理模型の縮尺はフルードの相似則によっており、時間縮尺は 1/283 となる。なお水理模型の陸上地形の再現には国土地理院発行の 5 万分 1 地形図（松島、吉岡、塩釜）を、海底地形の再現には海上保安庁発行の海図（海図番号 W1098）と国土地理院発行の 2 万 5 千分 1 沿岸海域地形図（松島）を利用した。津波の発生方法は、模型水を静止させた状態から水槽端に設置したプランジャーの昇降によって行った。

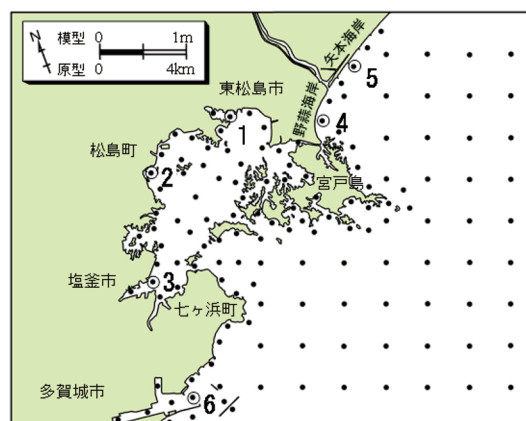
## 2. 2 境界条件の設定と 3.11 大津波の再現性

水理模型の境界にあたるプランジャーの位置において 3.11 大津波現象を与えて津波を再現しなければならないが、この場所での津波観測データがないため水理実験では筧 (2011) が得た七ヶ浜町沖の津波観測データを境界条件として与えることにした。

プランジャーの調整の結果、第 2 図に示すように津波観測記録のある七ヶ浜町沖の現地と同じ地点（測定位置は第 1 図の★印）において初期の引き波現象、最大引き波の高さ（-0.8m）、第 1 波の最大津波高（5.4m）、津波周期 40 分を水理模型内に再現することができた。なお水理模型実験での津波高の変化は測定精度  $\pm 0.2\text{mm}$ （現地換算  $\pm 0.04\text{m}$ ）のサーボ式水位計（ケネック製 SW-201 型）を用い、データサンプリング 10Hz で測定した。

## 2. 3 津波実験の内容

島嶼部の有無による津波浸水域と津波減勢効果の測定実験を行った。実験ケースは次の 3 ケースとした。Case0 は現況地形の場合、Case1 は松島湾で最大の面積



第3図 津波高の測定位置（図中の数字は代表地点）

Fig.3 Sampling station of the tsunami height. (Numbers in the figure representative point.)

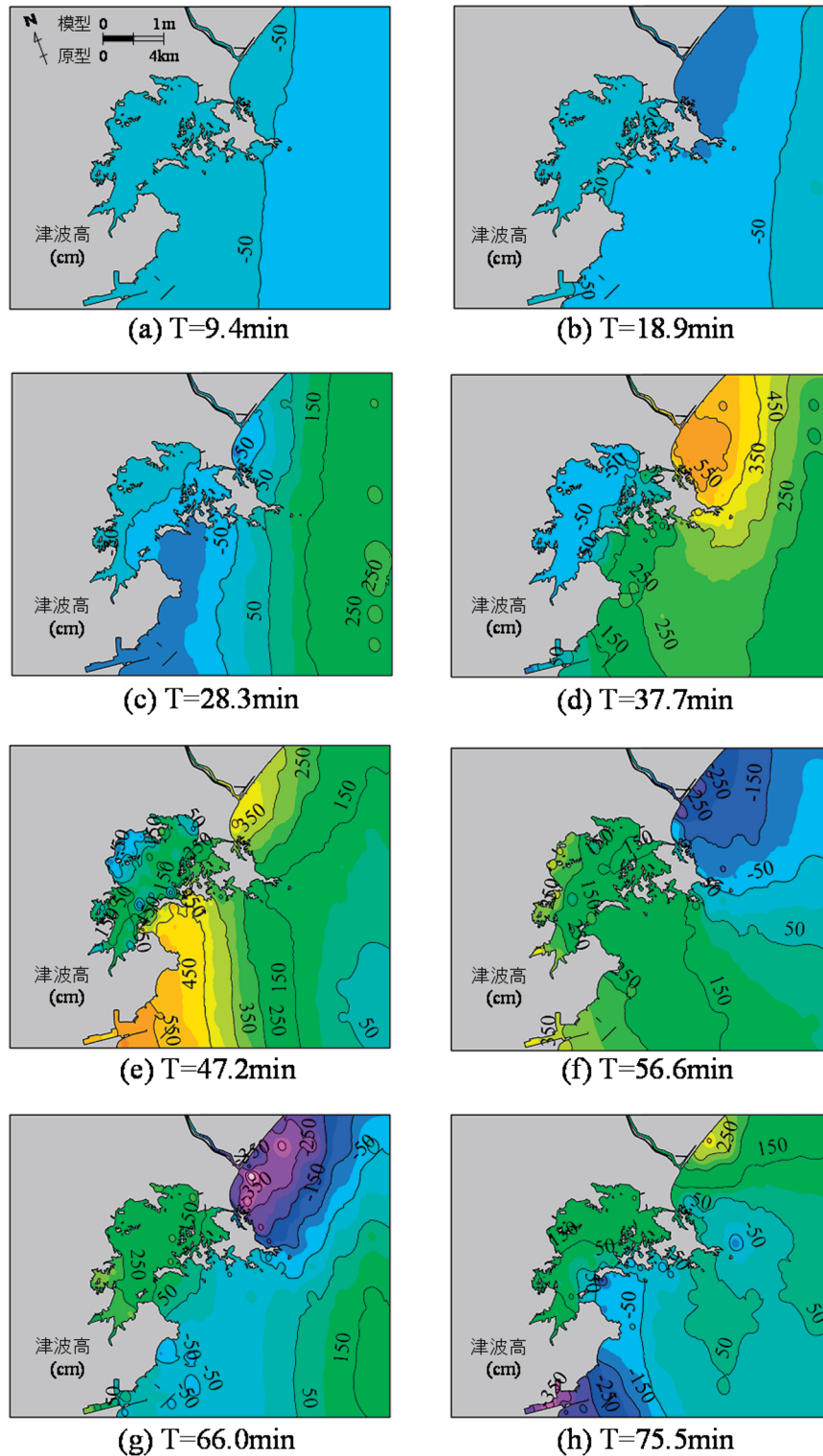
を持つ宮戸島を撤去した地形の場合、Case2 は松島湾の島を全部撤去した地形の場合である。津波浸水域の変化は模型上面に設置したビデオカメラの画像を解析することによって行った。津波高の測定位置は、第 3 図の黒丸で示す 140 地点において行い、実験データの整理、解析には GIS（地理情報システム）を活用した。

## 3. 島嶼部の有無による津波測定実験の結果

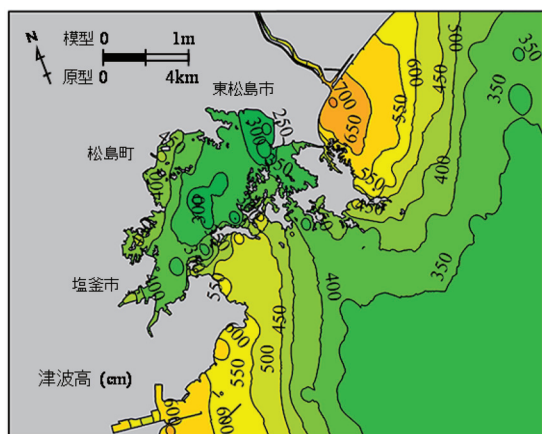
### 3. 1 現況地形による津波の振る舞い

第 4 図は現況地形 Case0 における津波の伝播状況を示したものである。図はプランジャー型津波発生装置での津波発生時を  $T=0\text{min}$  として整理し、約 9.4 分毎の津波分布を示した。図をみると島の存在により津波の伝播は複雑になっている。まず引き波現象により松島湾外で水位が  $-0.5 \sim -1.5\text{m}$  ほど下がり、それが松島湾内へ伝播している様子が良く分かる。この時の第 3 図に示した代表地点 Stn. 1~Stn. 6 における最大引き波の高さ求めると、野蒜海岸沖 Stn. 4 では  $-1.5\text{m}$ 、矢本海岸沖 Stn. 5 では  $-1.3\text{m}$ 、東松島市沖 Stn. 1 では  $-0.5\text{m}$ 、松島町沖 Stn. 2 では  $-0.7\text{m}$ 、塩釜市沖 Stn. 3 では  $-0.8\text{m}$ 、多賀城市沖 Stn. 6 では  $-1.2\text{m}$  であった。津波発生から 37.7 分後の津波高は、野蒜海岸沖で 5m 強、松島湾の湾口部周辺で 1.5~2m であるが、松島湾内の水位はまだマイナスの値である。その後、津波が伝播して約 20 分後には松島湾内での津波高は数 m ほどになるが湾外の野蒜海岸沖や多賀城市沖に比べて小さい。津波発生から 56.6 分後の松島湾内での津波高は、東松島市沖 Stn. 1 で 2.0m、松島町沖 Stn. 2 で 3.0m、塩釜市沖 Stn. 3 で 3.0m ほどである。

第 5 図は現況地形 Case0 における最大津波高の分布



第4図 現況地形 Case0における津波の伝播状況  
Fig.4 Tsunami wave propagation in Case0.



第5図 Case0における最大津波高の分布図

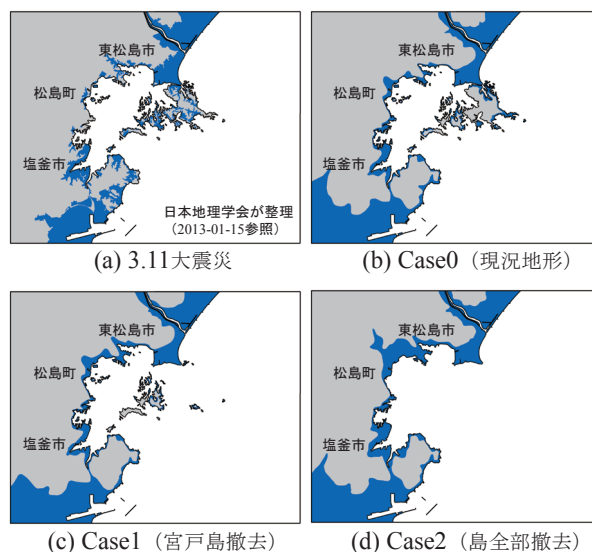
Fig.5 Distribution of the maximum tsunami height in Case0.

を示したものである。各地点における最大津波高は、測定期間中の最大値としたが殆どの地点において第1波目の津波が最大値であった。最大津波高は、野蒜海岸沖が最も高く7.1m、松島湾内は2.5~4.5mほどである。代表地点での最大津波高の値を示すと、東松島市沖 Stn.1では3.4m、松島町沖 Stn.2では4.1m、塩釜市沖 Stn.3では4.5mである。3.11大震災時の松島町では津波高3.8mが記録されており（宮城県松島町役場，2012）、水理模型実験でも同等の津波高が得られた。

### 3.2 島嶼部の有無による津波浸水域の違い

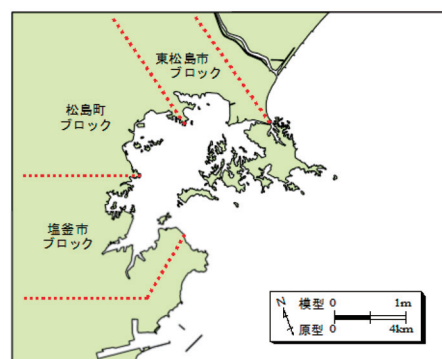
これまでの水理模型は海岸形状や陸域を再現していないために津波浸水実験はできなかったが（例えば山崎・上嶋，2006）、松島湾水理模型は津波浸水実験を可能とした。

第6図は各実験ケースにおける津波浸水の範囲を示したものである。青色で塗り潰した部分が津波浸水域であり、第6図(a)には日本地理学会(2011)がまとめた3.11津波浸水範囲を示す。浸水は標高5m以下の低地を中心に広がっている。第6図(a)と第6図(b)を比べてみると、広い範囲で浸水がみられる矢本、野蒜の両海岸や東松島市から塩釜市にかけての浸水範囲が非常に良い対応を示している。なお多賀城市周辺の浸水範囲は水理模型の方が大きい、これは実験水槽の側壁の影響が出ているものと考えられる。宮戸島を撤去したCase1では、東松島市周辺においてCase0より浸水範囲が広がっている。また島を全部撤去したCase2では、松島湾沿岸部全体においてCase0より浸水範囲が広がっており、特に松島町においては標高15m付近まで大きく広がっている。



第6図 各実験ケースにおける津波浸水の範囲図

Fig.6 Tsunami flooded area in each experimental case.



第7図 浸水評価領域のブロック分割図

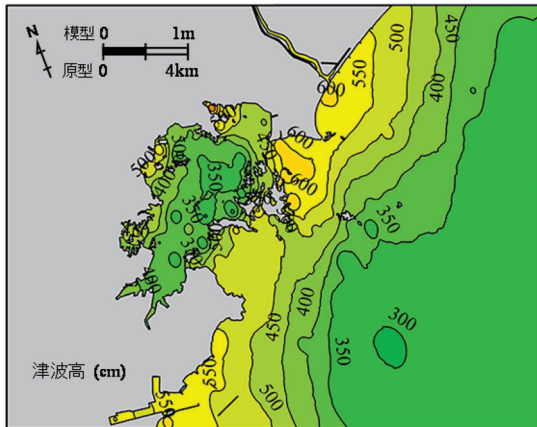
Fig.7 Evaluation block of tsunami flooded.

第1表 各ブロックにおける浸水面積 (単位: ha)  
Table 1 Tsunami flooded area of the evaluation block.

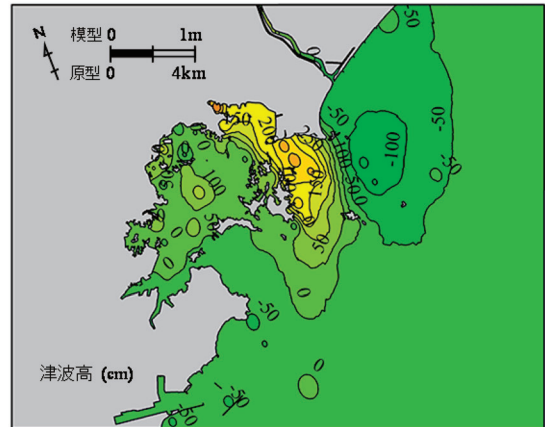
|          | Case0<br>(現況地形) | Case1<br>(宮戸島撤去) | Case2<br>(島全部撤去) |
|----------|-----------------|------------------|------------------|
| 東松島市ブロック | 336             | 420              | 462              |
| 松島町ブロック  | 216             | 280              | 704              |
| 塩釜市ブロック  | 526             | 461              | 728              |

島嶼部の有無による津波の浸水領域を評価するために、松島湾内を3つのブロックに分割して浸水面積を求めた。ブロックの分割範囲を第7図に、各ブロックの浸水面積を第1表に示す。宮戸島が無いと東松島市ブロックと松島町ブロックにおいて浸水面積は広がり、その大

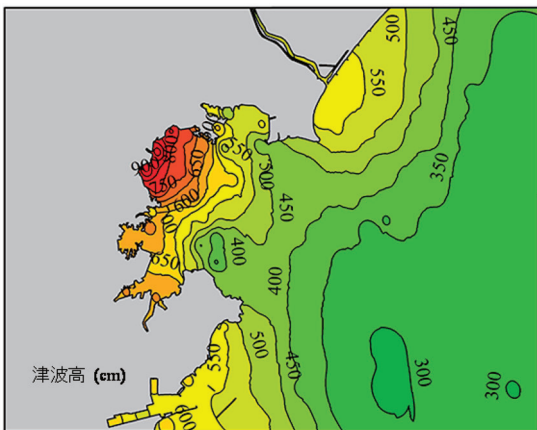




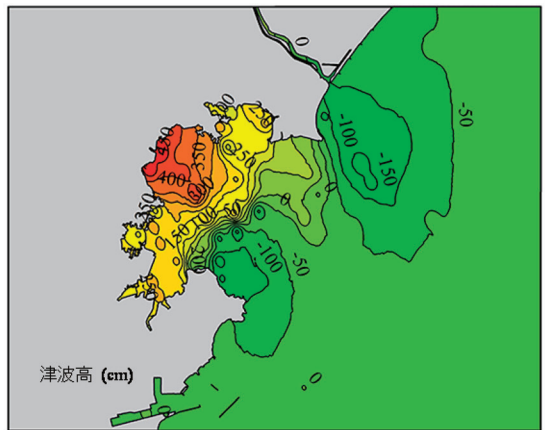
(a) Case1



(a) Case1-Case0



(b) Case2



(b) Case2-Case0

第8図 島撤去時における最大津波高の分布図

Fig.8 Distribution of the maximum tsunami height of the island removal case.

きさは現況地形の1.3倍ほどになる。島が全部無くなると全てのブロックにおいて浸水面積は広がり、特に松島町ブロックでは現況地形の3倍強の広がりとなる。以上のことから、松島湾に点在する島々は津波浸水を小さくする防波堤の役割をしていることが分かる。

### 3.3 島嶼部の有無による津波減勢効果

第8図は島を撤去した実験ケースにおける最大津波高の分布を示したものである。代表地点における最大津波高の値をCase1, 2の順に示すと、野蒜海岸沖 Stn.4では6.2m, 6.0m, 矢本海岸沖 Stn.5では5.7m, 5.5m, 東松島市沖 Stn.1では6.4m, 5.8m, 松島町沖 Stn.2では5.8m, 10.2m, 塩釜市沖 Stn.3では4.5m, 7.0mである。最大津波高は、宮戸島の撤去から残りの島を全部撤去すると松島町沖から塩釜市沖にかけての海域において急激に大きくなる。しかし、湾外にあたる矢本、野蒜

第9図 島嶼部の有無による津波減勢効果

Fig.9 Change due to the presence of the island of tsunami.

の両海岸沖では反対に少し小さくなっている。

第9図は島嶼部の有無による津波減勢効果を評価するために、第5図に示した現況地形Case0における最大津波高の値を差し引いて示したものである。まず、第9図(a)をみると宮戸島が無いことで津波は減衰することなく東松島市沖に進入するため、津波高は湾口部の東松島市沖で最大3.0mほど増加している。松島町沖でも1.0mほど増加領域がみられるが、塩釜市沖周辺では津波高の変化はみられず桂島などの浦戸諸島の影響が示唆される。次に、第9図(b)の島を全部撤去したケースをみると松島湾全体で津波高が増加しているのが分かる。津波高の増加は、東松島市沖で2.0~3.2m, 松島町沖で3.5~5.6m, 塩釜市沖で2.0~3.1mである。松島湾に点在する島々は、ここで示した津波高の増加分の減勢効果を有している。



#### 4. おわりに

本研究では、海陸域を再現した松島湾の水理模型により、島嶼部の有無による津波減勢効果について実験的に検討した。水理模型実験のメリットは、津波を具体的に視覚で確認し、全体の現象を把握できることである。ここで得られた成果は数値実験による津波再現の検証や数値モデルの高度化のために活用することができる。

水理模型実験の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 現況地形における最大津波高は、野蒜海岸沖が最も高く 7.1m、松島湾内は 2.5~4.5m ほどである。
- (2) 浸水は標高 5m 以下の低地を中心に広がった。3.11 津波浸水と比べてみると、広い範囲で浸水がみられる矢本、野蒜の両海岸や東松島市から塩釜市にかけて非常に良い対応を示した。
- (3) 島を全部撤去すると松島町ブロックにおいて浸水面積は 3 倍強の広がりとなる。松島湾内に点在する島々は津波浸水を小さくする防波堤の役割をしている。
- (4) 宮戸島が無いケースでは、津波高は湾口部の東松島市沖で最大 3.0m ほど増加するが、その影響は塩釜市沖まで届かない。
- (5) 島を全部撤去したケースでは、松島湾全体で津波高が増加する。津波高の増加は、東松島市沖で 2.0~3.2m、松島町沖で 3.5~5.6m、塩釜市沖で 2.0~3.1m である。松島湾に点在する島々は、津波高の増加分の減勢効果を有している。

#### 文献

- 土木学会東日本大震災特別委員会 (2012) 震災特集(2) 東日本大震災—宮城県における復興に向けた取り組み—。土木学会誌, **97**, 53-93.
- 筧 茂穂 (2011) 東日本大震災により宮城県七ヶ浜町を襲った津波の波高計データによる解析。海の研究, **20**, 51-57.
- 小荒井 衛・岡谷隆基・中埜貴元・神谷 泉 (2011) 東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴。国土地理院時報, no.122, 97-111.
- 宮城県松島町役場 (2011) 震災特集号。広報まつしま, no.436, 1-7.
- 日本地理学会災害対応本部津波被災マップ作成チーム (2011) 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震に伴う津波被災マップ。  
<http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/20110311/> (2014 年 10 月 8 日確認)
- 水藤 尚・西村卓也・小沢慎三郎・小林知勝・飛田幹男・今給黎哲郎・原 慎一郎・矢来博司・矢萩智裕・木村久夫・川元智司 (2011) GEONET による平成 23 年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル。国土地理院時報, no.122, 29-37.
- 山崎宗広・上嶋英機 (2006) 瀬戸内海大型水理模型による津波の影響評価実験について。日本沿岸域学会研究討論会講演概要集, no.19, 246-249.

## 東北地方南部前弧～島弧域の地球化学的・地質学的特性調査

### Geochemical and geological surveys in southern Tohoku arc-forearc area

御子柴真澄<sup>1\*</sup>・高橋 浩<sup>1</sup>・岡井貴司<sup>1</sup>・金井 豊<sup>1</sup>

Masumi Mikoshiba<sup>1\*</sup>, Yutaka Takahashi<sup>1</sup>, Takashi Okai<sup>1</sup> and Yutaka Kanai<sup>1</sup>

**Abstract:** Geochemical and geological surveys in southeast Tohoku and northeast Kanto areas have been carried out to obtain substantial geochemical data for environmental risk studies as well as geological studies. Ages of intrusion and cooling of the representative plutons from south part of the studied area were obtained. More than 40 elements were determined in the representative rocks from north and south parts of the studied area. Chemical characteristics of the main granitic rocks were clarified.

**Keywords:** geochemistry, environment, risk, geology, Tohoku, earthquake

#### 1. 調査目的

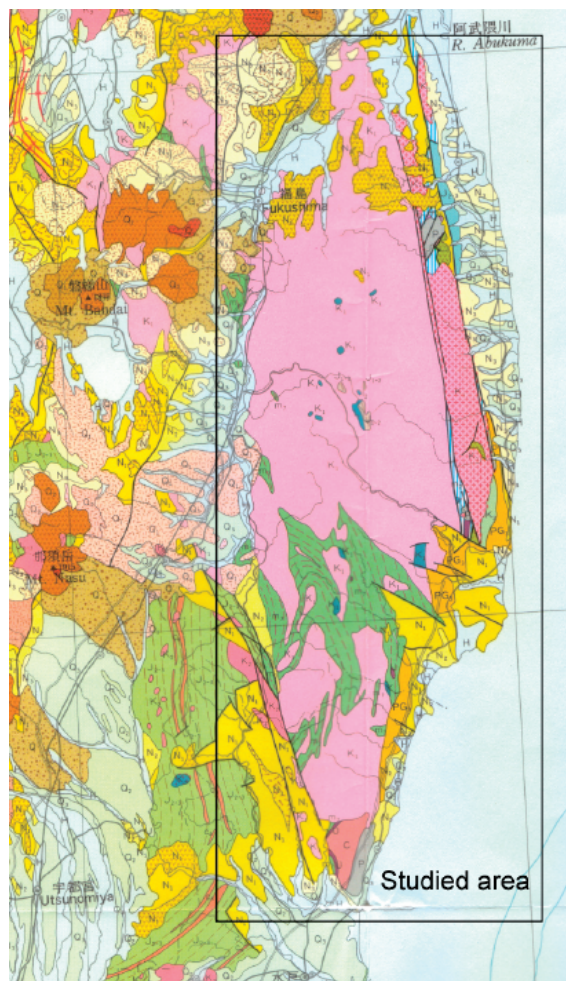
2011年の地震以降、東日本の太平洋側の地域全体の地質構造の把握の重要性が著しく増大した。また、東北地方南部の海岸沿い一帯においては、地震・津波に起因する土壌・地下水汚染等のリスクが存在する。元素の移動や拡散を理解する上で、その供給源である基盤岩類の元素分布や地球化学的・地質学的特性の把握が必要である。

そこで、東北地方南部と北関東の太平洋側の地域において、地球化学的・地質学的情報の整備をめざして、地質調査とともに地球化学的調査を重点的に実施した。

#### 2. 対象地域と実施方法

対象地域は、東北地方南部と北関東の太平洋沿岸～内陸部で、阿武隈山地とその周辺を調査範囲とした(第1図)。本地域については地質調査総合センターにより20万分の1地質図幅が出版されている。

ここでは、主に基盤岩類の分布地域において地質調査と試料採取を行う。なるべく対象地域全体をカバーするため、今回の地質調査で採取した試料に既存の岩石試料も加えて試料リストを作成し、岩石薄片の作成と観察を行う。風化・変質の影響が小さい代表的な岩石を選んで、粉砕作業を行う。多数の岩石粉末試料について、主・微量成分元素濃度の測定を行い、広域における元素濃度分布や岩石の地球化学的・地質学的特性を明らかにする。さらに、主に深成岩類を対象として年代測定を行う。以上により得られた結果を、既存の調査研究結果と合わせて、総合的な解析を行うこととする。



第1図 調査地域の位置と地質概略図

Fig.1 Simplified geologic map of the studied area.

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 地質と岩石の分布

2012年に、阿武隈山地南部において地質調査を行った。2013年には、阿武隈山地の中央部から北部において地質調査を行った。これらの調査において、深成岩を中心とした、代表的な岩石試料を採取した。

阿武隈山地には先新第三紀の基盤岩類が広く分布する(第2図)。そのうち北部から中央部にかけては主に白亜紀の花崗岩類が広く分布し、多数の貫入体からなるバソリスを構成している(久保ほか, 2007など)。山地の南部には、変成岩類が比較的広く分布し、その中に径数km~10数kmの花崗岩質岩体が多数貫入している。花崗岩類は、比較的優黒質な花崗岩類(花崗閃緑岩・トーナール岩)と、優白質な花崗岩類(狭義の花崗岩・花崗閃緑岩)の2つのグループに大別され、一般に後者が前者に貫入している。阿武隈山地の東縁において、先新生代基盤岩類は北北西-南南東方向にのびる破碎帯によって分断され、そのうち畑川破碎帯の東はいわゆる北上帯に、西は阿武隈帯に対比されている(久保ほか, 2003など)。

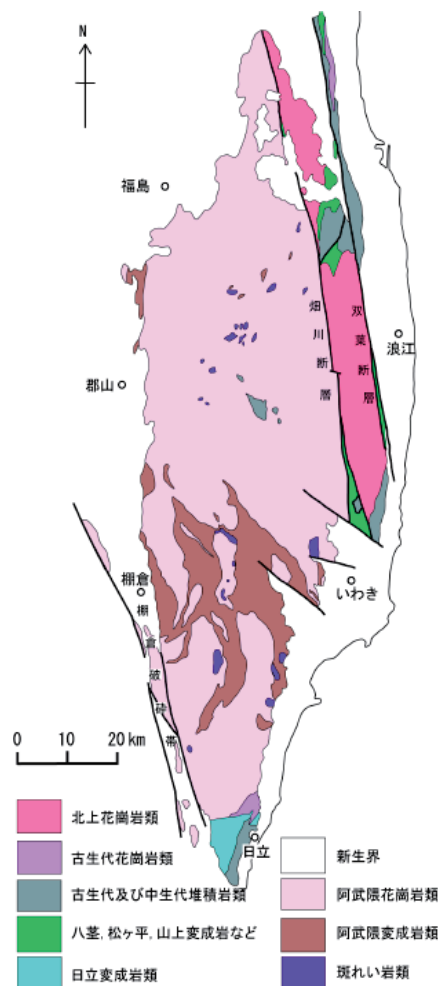
#### 3. 2 年代測定結果

阿武隈山地に分布する先新生代基盤岩類の形成史や冷却史を明らかにするために、複数の方法を用いて構成鉱物の年代測定を行った。

深成岩類の貫入固結時期を明らかにすることを主な目的として、ジルコンのU-Pb年代測定を行った。測定は、株式会社京都フィッシュントラックに依頼した。

阿武隈山地の深成岩類は、貫入関係に基づいて、古い順に、斑れい岩及び閃緑岩、細粒閃緑岩、角閃石黒雲母花崗閃緑岩、(角閃石含有)黒雲母花崗閃緑岩、黒雲母花崗岩及び細粒優白質花崗岩である。南部阿武隈山地の主要な深成岩体の斑れい岩、角閃石黒雲母花崗閃緑岩、黒雲母花崗岩、細粒優白質花崗岩および阿武隈山地東部の花崗岩類について測定を行った結果、おおむね115Maから100Maの範囲内のジルコンU-Pb年代値が得られた。また、斑れい岩と周辺の花崗岩類との年代差は小さいことが明らかになった。

さらに、冷却史を明らかにするため、同一試料中のフィッシュントラック年代や黒雲母のK-Ar年代の測定を行った。その結果、細粒優白質花崗岩、黒雲母花崗岩、角閃石黒雲母花崗閃緑岩、細粒閃緑岩の同一試料から分離したジルコンのU-Pb年代と黒雲母のK-Ar年代の差は1~10Ma程で、ジルコンのU-Pb年代とフィッシュントラック年代では20~30Ma程の差が認められた。このことは、黒雲母のAr閉止温度である350℃程度までの冷却が急激に進みその後緩やかに冷却したことを示している。



第2図 阿武隈山地に分布する先新生代基盤岩類の地質図

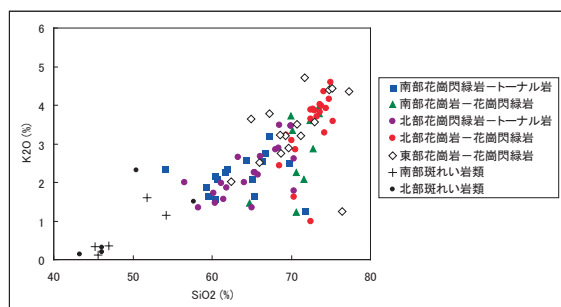
Fig.2 Geological map of pre-Cenozoic basement rocks in the Abukuma Mountains.

#### 3. 3 岩石の化学組成と地球化学的特徴

今回の野外調査で採取した岩石を中心に、阿武隈山地周辺で採取した約200個の岩石について岩質の検討を行い、その多くについて全岩化学分析用の粉末試料を作成した。これらの試料について主成分元素の分析を行った。また、地域全体をカバーするように試料を選んで微量元素の分析を行った。全岩化学分析には、蛍光X線分析法、ICP質量分析法、ICP発光分光分析法を用いた。

阿武隈山地の深成岩の主成分元素については、花崗岩類の場合ほとんどの試料のSiO<sub>2</sub>が58~78%の範囲に入り、組成範囲は広いが、横軸にSiO<sub>2</sub>を表示した各酸化物図では比較的狭いトレンドを形成することが多い。ここではそのうちSiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O図を示す(第3図)。第3図においては、阿武隈帯の深成岩類を、変成岩が比較的多





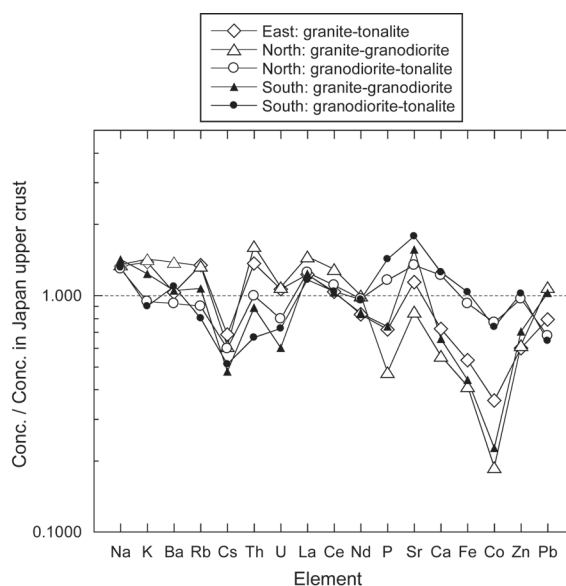
第3図 深成岩類のSiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O図

Fig.3 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram for the plutonic rocks.

く分布する南部と、花崗岩類が広く分布する北部とに区別して表示し、さらに北部と南部において、岩質により、それぞれ比較的優黒質な花崗岩類（花崗閃緑岩・トータル岩）と、優白質な花崗岩類（狭義の花崗岩・花崗閃緑岩）の2つのグループに区分して表示した。また、畑川破砕帯以東の花崗岩類は区別して表示した。多くの主成分元素の組成変化は日本の花崗岩類の平均組成変化（Aramaki et al., 1972）に近く、SiO<sub>2</sub>の増加にしたがってK<sub>2</sub>Oが増加しNa<sub>2</sub>Oが若干増加する傾向を示すが、そのトレンドとかけはなれたK<sub>2</sub>Oに乏しい優白質岩も見いだされた（第3図）。少量分布する斑れい岩類は、SiO<sub>2</sub>が44—54%の組成範囲を示し、単一のトレンドを形成しない。

微量元素については、組成変化が大きいが、南部の花崗岩類が北部の花崗岩類に比較してThやUに乏しくSrに富む傾向を示す。畑川破砕帯の東側の花崗岩類の化学組成は、北部の花崗岩類に類似する点が多い。

阿武隈山地の岩石試料の化学分析を行い、40種類以上の元素について定量値を得た。そのうち主要な白亜紀花崗岩類の元素濃度を第4図に示す。この地域の花崗岩類の全体的な傾向を把握するため、横軸に代表的な元素、縦軸に花崗岩類の元素濃度を日本の上部地殻の平均組成（Togashi et al., 2000）で割った値を表示した。第4図では、北部と南部の阿武隈帯花崗岩類を岩質によりそれぞれ2グループに区分して、その元素濃度の平均値を表示した。また畑川破砕帯以東の花崗岩類については全体の平均値を表示した。第4図のうち、K、Rb、Th、Uなどは一般に珪長質岩に多く含まれる元素である。そのうちKやRbは比較的日本の上部地殻の平均値に近い。ThやUについては本地域の花崗岩類において濃度の変化が大きい。南部地域の花崗岩類は、優白質なものも含めて特徴的にThやUに乏しく、Srに富む傾向を示す。一方、北部の比較的優白質な花崗岩類は、畑川破砕帯以東のものも含めて、Rb、Th、Kなどに富み、Ca、Fe、Coなどに乏しく、分化した花崗岩の典型的な特徴を示した。また、ZnやPbの濃度は岩質に対応して変化し、特にPb



第4図 主要な花崗岩類の元素濃度の平均値. 日本の上部地殻の平均組成（Togashi et al., 2000）で割った値を表示している。

Fig.4 Chemical compositions of the granitic rocks normalized to the Japan arc crust (Togashi et al., 2000).

の平均濃度は日本の上部地殻の平均値に近いことが判明した。

#### 4. 分析機器の導入

化学分析用として、新たに、ICP発光分光分析装置の導入を行った。装置名はiCAP 6300Duo（サーモフィッシャーサイエンティフィック社製）である。この装置は、CID検出器を装備し多元素同時定量が可能であるとともに、DuoタイプであることからICP発光分光分析法で用いられる、微量元素の定量に適した高感度の軸方向測光及び、主成分の定量に適した放射光測光の両方による定量分析を一連の操作で可能で、溶液化した地質試料中の幅広い濃度範囲の多くの元素を迅速かつ同時に定量分析可能である。地球化学標準物質を用いて装置の調整を行い、現在分析に使用している。

#### 5. おわりに

地震による被害を受けた東北地方南部から北関東の太平洋側の地域において、地質調査とともに地球化学的調査を重点的に実施した。対象地域とした阿武隈山地周辺における岩石の産状や分布を把握するとともに、複数的手法による年代測定を行って、深成岩類の貫入・冷却

時期を明らかにした。また、多数の岩石の化学分析を行い、主要な深成岩類の元素濃度と地球化学的特徴を明らかにした。今後、さらに調査と化学分析等を行い、広域的な元素分布と地球化学的特性の解析を行う予定である。

## 文献

- Aramaki, S., Hirayama, K. and Nozawa, T. (1972) Chemical composition of Japanese granites, part 2. Variation trends and average composition of 1200 analyses. *J. Geol. Soc. Jpn.*, **78**, 39-49.
- 久保和也・柳沢幸夫・山元孝広・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久 (2003) 20 万分の 1 地質図幅「福島」。産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 久保和也・柳沢幸夫・山元孝広・中江 訓・高橋 浩・利光誠一・坂野靖行・宮地良典・高橋雅紀・駒澤正夫・大野哲二 (2007) 20 万分の 1 地質図幅「白河」。産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- Togashi, S., Imai, N., Okuyama-Kusunose, Y., Tanaka, T., Okai, T., Koma, T. and Murata, Y. (2000) Young upper crustal chemical composition of the orogenic Japan Arc. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **1**, Paper number 2000GC000083.



## ルミネッセンス年代測定実験室 Luminescence dating laboratory

田村 亨<sup>1\*</sup>  
Toru Tamura<sup>1\*</sup>

**Abstract:** A luminescence-dating laboratory was built to determine depositional ages of historic or pre-historic tsunami deposits. This dating method has an advantage to directly date sediment grains. The laboratory was divided into a chemical room for sample preparation and a machine room that accommodates luminescence readers. Two luminescence readers were installed, and each of them has a beta source. Necessary procedures were thus taken to deal with radioactive materials in the machine room. Calibration of the beta sources has been practiced. Preliminary results of dating sediment samples from AD869 Jogan tsunami deposits were obtained.

**Keywords:** dating, tsunami deposit, historic earthquake

### 1. 目的

ルミネッセンス年代測定実験室は、2011年3月11日に起きた東日本大震災に伴う津波の堆積物を探査する中で、採取した堆積物の年代を決定する目的から構築した。この堆積物探査は、「土壌汚染リスク」と「津波リスク」の2つのWGの共同課題で、今回の津波による海底および陸域での土砂移動の実態を明らかにし、また過去の津波でも今回と同様の堆積物が残されたかどうかを検証している。この研究を進める上で、例えば、西暦869年貞観地震など、歴史地震に対応した津波堆積物を認定するために、堆積物の年代測定が必須である。過去数千年間の堆積物については、放射性炭素年代が最適な年代測定法の1つだが、年代測定適用可能な試料がない場合や、過去300年程度の新しい堆積物については問題も多い。ルミネッセンス年代では、放射性炭素年代のように生物遺骸が必要なく、石英粒子や長石粒子といった堆積物そのものの堆積年代の決定が可能であることが最大の長所である。

### 2. 方法

光ルミネッセンス年代測定とは、石英や長石といった鉱物粒子のルミネッセンス特性を利用した年代測定の方法である。ここでいう光ルミネッセンスは、鉱物粒子に光を照射した後に、粒子から生じる微弱な光のことをいう。鉱物粒子は、地中に埋没すると、地中に自然に含まれるウラン、トリウム、カリウムに代表される微量な放射性核種から放射線を浴びる。放射線を浴びると、鉱物格子中の電子が自由電子となり格子欠陥に捕獲され、不対電子となっていく。長時間地中に埋没した後の粒子に光をあてると、この不対電子が励起されてより高いエ

ネルギーバンドに上がった後、低いバンドへ落ちる際に余剰エネルギーとして光（ルミネッセンス）を発する。不対電子は埋没時間に応じて増えていくため、結果的にルミネッセンスの強度は、鉱物粒子が最後に光を浴びてから地中に埋没した時間の長さの指標になる。

ルミネッセンス年代測定の作業は主に、年代測定装置室（第1図）、および測定試料の準備室（第2図、第3図）、との2つで行う。粒子に蓄積されたルミネッセンス信号は、一度白色光に当たるとリセットされてしまうため、測定試料の処理と測定試料の装置への充填は、ルミネッセンス信号に影響を与えない赤色光のもと、暗室内で行うことが必要である。既存の1スパン51m<sup>2</sup>の実験室をパーティションで装置室、準備室、および残りスペースの3つに区切り、まとめてルミネッセンス年代測定実験室とした。



第1図 ルミネッセンス実験室。試料装填は赤色灯下で行う。

Fig.1 The luminescence dating laboratory. Sample are mounted on the luminescence reader under the subdued red light.

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. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)



第2図 ルミネッセンス年代測定試料準備室. 試料処理作業は赤色灯下で行う. 左から, 試料保管庫, 薬品庫, 遠心分離器, 乾燥器, 流し台, ドラフト.

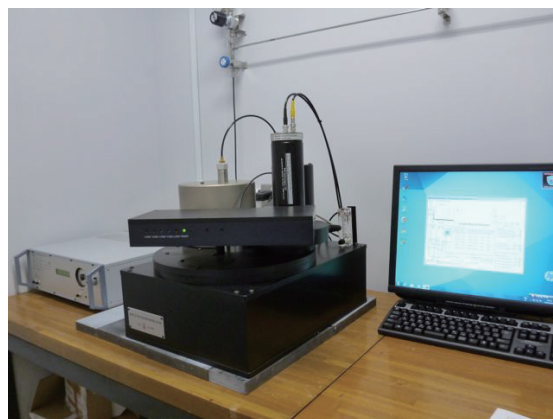
Fig.2 The sample preparation room. Preparation is practiced under the subdued red light. From the left to right, we see a sample storage, chemical storage, centrifuge, dryer, sink, and fume cover.



第3図 ルミネッセンス年代測定試料準備室. ドラフトには薬品処理で用いるシェーカーを備える. 机上に設置されているのは篩振盪器.

Fig.3 The sample preparation room. The fume cover is equipped with a shaker. Two sieve shakers are on the desk.

ルミネッセンス年代測定装置(第4図)は, ルミネッセンス強度測定と, 放射線照射との, 2つの主な機能を持つ. ルミネッセンス測定には, 光励起のためのレーザー光照射装置と微弱な光を検出するための光電子増倍管が使われる. 放射線照射は, 鉱物粒子のルミネッセンス強度と鉱物が暴露した放射線の蓄積量との関係を明らかにするために必要で, Sr-90/Y-90 ベータ線源を用いる. このベータ線源は密封型だが, 1.48 GBqと強い放射能を有するため, 年代測定装置室は, 放射線管理区域とした. 装置本体は, 現在世界的に最も主



第4図 ルミネッセンス年代測定装置. 接続したPCで実験プログラムを走らせて動作させる. 左が制御装置で, 中央のものが本体. 2本の円柱のうち左の太いものがベータ線源格納容器で, 右の柱はルミネッセンスを検出するための光電子増倍管である. 手前の平たい箱は, 単粒子ごとにルミネッセンスを測定するためのアタッチメントである.

Fig.4 The luminescence reader is operated by a program running on the PC. The left is the controller, and the reader is in the center. Left and right columns on the reader are the beta source storage and photo-multiplier, respectively. The box in front of the beta storage is the single-grain OSL attachment.

流な機種である, デンマーク Risoe 研究所製 TL/OSL reader model DA-20 C/Dを2台導入した.

測定試料の処理では, ルミネッセンス年代測定の精度を高めるため, 粒子の鉱物種と粒度をそろえる. 野外から持ち帰った試料では, まず有機物と炭酸塩を過酸化水素水と塩酸により除去する. 次に篩い分けにより特定の粒度に揃え, 重液分離とフッ酸処理, または重液分離のみで, 石英, または長石を抽出する. 測定試料準備室は, このための薬品庫, 篩振盪器, 遠心分離器, 真空ポンプ, 乾燥器, ドラフトなどを備える.

年代測定では, まず試料が採取された状態で発する自然のルミネッセンス強度を測定し, 次に, 放射線照射とそれによるルミネッセンス強度の測定を繰り返し, 内挿により試料が採取時までには浴びた放射線の蓄積量(蓄積線量)を定量する. 一方で, 試料が埋積時に浴びていた放射線の強さ(年間線量)は, 質量分析器によるウラン, トリウム, カリウムの定量や, ガンマ線スペクトロメトリにより, 堆積物を分析することで求める. 蓄積線量(単位: Gy)を年間線量(単位: Gy/year)で割ることにより, 埋積時間の長さを求める.

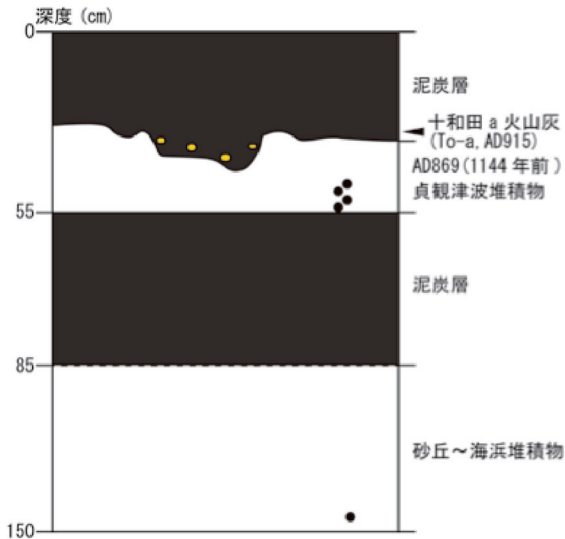
### 3. 貞観津波堆積物の OSL 年代測定

仙台市若林区からジオスライサー（第5図）により採取された貞観津波堆積物（gsj13009～13012の4試料）とその下位の海浜～砂丘堆積物（gsj13006の1試料）の石英砂に対して、OSL年代測定を予察的に行った。OSL年代測定は、標準的な石英 SAR 法（Single Aliquot Regeneration protocol, 再生曲線法; Murray and Wintle, 2000）により行った。石英のOSL信号は、青色レーザー光の照射により測定した。OSL信号の減衰曲線の例を第6図に示す。また、蓄積線量算定のための再生曲線の例を第7図に示す。得られた等価線量の分布にはばらつきがあるが、測定値の対数正規分布を仮定した Central Age Model (Galbraith et al., 1999; Roberts et al., 2000) により平均を求め、その試料の等価線量とした。

各試料を採取した点の年間線量は、放射性核種の濃度と宇宙線量の両方から算出した。放射線核種からの線量は、ICP-MSにより求めたカリウム、ウラン、トリウム、ルビジウム濃度(表1)から Adamiec and Aitken (1998) と Marsh et al. (2002) に基づき算出した。宇宙線量の寄与は、Prescott and Hutton (1994)により求めた。年間線量は水分含量にも影響を受けるが、過去の変動については不確実性があるため、測定値に加えて±5%の変動幅を考慮している。

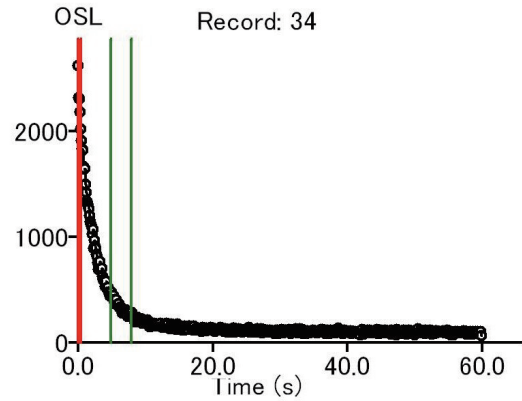
以上より得られた等価線量を、年間線量で割ることで、OSL年代を求めた(表2)。年代値はすべて試料を採取した2013年を基準に表す。

結果は、貞観津波堆積物より下位の海浜～砂丘堆積物で  $874 \pm 47$  年前、津波堆積物の4試料については、638



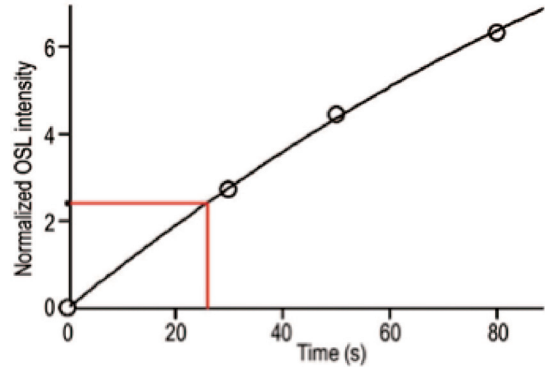
第5図 仙台市若林区で採取された貞観津波堆積物のジオスライサー試料断面のスケッチ。黒丸がOSL年代試料採取位置を示す。

Fig.5 A sketch of the Geoslicer sample of Jogan tsunami deposits. Black dots show locations of OSL samples.



第6図 貞観津波堆積物試料（gsj13009）のOSL信号の例。赤および緑の線は、それぞれ信号とバックグラウンドの測定を行う区間を示す。

Fig.6 An example of OSL decay curve of sample gsj13009. Red and green lines show the integration interval of initial signal and background.



第7図 貞観津波堆積物試料（gsj13009）のOSL再生曲線の例。OSL強度と放射線照射時間との関係を表す。赤の線は、標準試料のOSL強度と、それに対応する放射線照射時間を示す。

Fig.7 An example of the growth curve of the OSL intensity in relation to the time of irradiation for sample gsj13009. The red rectangular shows the OSL intensity of the standard and its equivalent time of irradiation.

±31 年前～604±29 年前と、誤差範囲で一致する年代値が得られた。しかし、貞観津波は、西暦869年(1144年前)に発生したため、5試料全ての年代値に相当な過小評価がある。OSL信号には年代測定に必要な fast component がよく発達しており、試料ごとの蓄積線量のばらつき(OD: オーバーディスページョン, 表2)も小さく、また、津波堆積物において得られた蓄積線量は4試料ではほぼ一致している。

年代値の過小評価の原因として有力なのは、ルミネッセンス年代測定よりも、年間線量の見積りである。上



第1表 測定試料の採取深度, 粒度, カリウム, ウラン, トリウム, ルビジウム濃度, 含水率.

Table 1 Depth, grain size, concentrations of K, U, Th, and Rb, and moisture of OSL samples.

| サンプル名    | ラボコード    | 深度 (cm) | 粒度 (μm) | K (%) | U (ppm) | Th (ppm) | Rb (ppm) | 含水率 (%) |
|----------|----------|---------|---------|-------|---------|----------|----------|---------|
| SND-2-01 | gsj13006 | 135     | 180-250 | 1.1   | 0.4     | 1.54     | 30       | 17      |
| SND-2-04 | gsj13009 | 53      | 180-250 | 0.943 | 0.5     | 2.15     | 25.9     | 18      |
| SND-2-05 | gsj13010 | 50      | 180-250 | 0.94  | 0.5     | 2.2      | 25.7     | 16      |
| SND-2-06 | gsj13011 | 47      | 180-250 | 1.02  | 0.44    | 1.87     | 27.9     | 17      |
| SND-2-07 | gsj13012 | 44      | 180-250 | 0.972 | 0.52    | 2.46     | 26       | 20      |

第2表 試料の等価線量, 年間線量, および OSL 年代. n1, n2 は, それぞれ測定したアリコット (小分け試料) の数, そのうち年代決定に用いたアリコットの数を示す.

Table 2 Equivalent dose, annual dose rate, and OSL age of samples. n1 and n2 are numbers of aliquots measured and used for age determination, respectively.

| サンプル名    | ラボコード    | n1 | n2 | OD (%) | 等価線量 (mGy) | 年間線量 (mGy/年)  | 年代 (年前)         |
|----------|----------|----|----|--------|------------|---------------|-----------------|
| SND-2-01 | gsj13006 | 24 | 20 | 22     | 1052 ± 23  | 1.203 ± 0.058 | <b>874 ± 47</b> |
| SND-2-04 | gsj13009 | 24 | 22 | 13     | 726 ± 15   | 1.138 ± 0.050 | <b>638 ± 31</b> |
| SND-2-05 | gsj13010 | 24 | 21 | 15     | 728 ± 18   | 1.158 ± 0.051 | <b>628 ± 31</b> |
| SND-2-06 | gsj13011 | 24 | 19 | 22     | 717 ± 20   | 1.178 ± 0.054 | <b>609 ± 33</b> |
| SND-2-07 | gsj13012 | 24 | 22 | 12     | 695 ± 15   | 1.151 ± 0.050 | <b>604 ± 29</b> |

述の通り, 年間線量の見積りは, 放射性核種濃度と宇宙線量, さらには含水率に基づくが, 試料採取時の含水率が, 実際の含水率から大きくかけ離れていた可能性がある. 実際, ジオスライサー採取時には, 試料から多量の地下水が漏れ出る様子が観察されている. 水分の含有量が大きいと, 放射線の減衰, さらには含まれる放射性核種の濃度そのものが低くなる. このため, 含水率の効果だけでも年間線量が数十%程度低くなる可能性がある. さらに, 放射線のγ線については透過が良く, 試料近傍の異なる堆積層からの寄与についても考慮しなくてはならない. 今回測定を行った貞観津波堆積物の上下は含水率の高い泥炭層で, これらの層からのγ線の寄与はほとんどないと考えられる. このように含水率と泥炭層の考慮により, 年間線量がより低く抑えられ, 結果として得られる年代値は, 実際の年代に近づく可能性がある. 泥炭層と互層し地下水面より下に存在することが多い津波堆積物の年代測定については, 含水率の精度良い測定のための試料採取方法等を検討していく必要がある.

文献

Adamiec, G., and Aitken, M. (1998) Dose-rate conversion factors: update. *Ancient TL*, **16**, 37-50.

Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H., and Olley, J.M. (1999) Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry*, **41**, 339-364.

Marsh, R.E., Prestwich, W.V., Rink, W.J., and Brennan, B.J. (2002) Monte Carlo determinations of the beta dose rate to tooth enamel. *Radiation Measurements*, **35**, 609-616.

Murray, A.S., and Wintle, A.G. (2000) Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, **32**, 57-73.

Prescott, J.R., and Hutton, J.T. (1994) Cosmic ray contribution to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements*, **23**, 497-500.

Roberts, R.G., Galbraith, R.F., Yoshida, H., Laslett, G.M., and Olley, J.M. (2000) Distinguishing dose populations in sediment mixtures: a test of single-grain optical dating procedures using mixtures of laboratory-dosed quartz. *Radiation Measurements*, **32**, 459-465.