

# 津波浸水直後に土壌に残される化学成分の特徴

## Chemical properties of tsunami-inundated soil and tsunami deposits

吉井 匠<sup>1</sup>・佐々木俊法<sup>2</sup>・今村正裕<sup>3</sup>・榊山 勉<sup>4</sup>・庄司 学<sup>5</sup>・楳田真也<sup>6</sup>

Takumi YOSHII, Toshinori SASAKI, Masahiro IMAMURA, Tsutomu SAKAKIYAMA  
Gaku SHOUJI and Shinya UMEDA

Chemical properties of tsunami-inundated soil and tsunami deposits were investigated using the samples obtained in Tohoku after the 2011 Tohoku-oki tsunami. The relative composition of water-soluble ions in the inundated samples obtained from Tohoku was similar to that of seawater and no significant difference was found between the tsunami deposits and the tsunami-inundated soils. Some soil samples show that the water-soluble ions in the surface may have been removed by rainfall, indicating that the layers of the tsunami-inundated soil and tsunami deposits could not be correspond to the layers containing rich chemicals.

### 1. はじめに

従来、工学における津波評価は、文献に記録された津波（以下、歴史津波）の中で最大の津波を対象に実施されてきた。しかし、巨大津波を引き起こした東北地方太平洋沖地震程度の地震の発生間隔は600年とも言われており（地震調査委員会，2011），低頻度（数百年～）の津波について，歴史津波のみを考慮する津波評価手法には限界がある。

このような低頻度の巨大津波を評価するにあたり，津波堆積物の地学的調査が重要となっている。地層中の津波堆積物を用いた古津波の調査結果では，869年の貞観津波が仙台平野内陸に達する程の巨大津波であったことを明らかにしている（宍倉ら，2007；菅原ら，2010）。ただし，津波堆積物調査にはその認定方法に課題が残されている（後藤・藤野，2008）と共に，津波堆積物の分布範囲が浸水域よりも小さくなる場合もある（例えば，Shiら，1995）。このような特徴により，津波堆積物を用いた古津波の評価では津波の規模が過小評価されうる（宍倉ら，2011；Gotoら，2011）ことが津波堆積物を工学的利用する際の重要な課題となっている。

この問題を解決する方法の一つとして，津波堆積物等の物理的痕跡以外の化学的痕跡を利用した調査があげられる。津波の陸上遡上の際，陸上には津波堆積物だけで

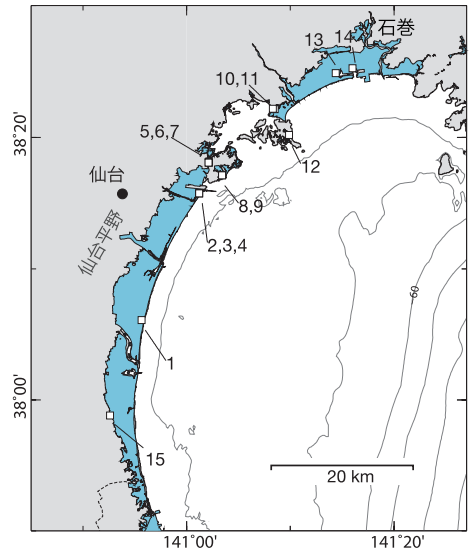


図-1 土壌および津波堆積物の採取位置。津波の浸水範囲は原口 (2011) による

なく，土壌中に多量の化学物質が残される（中矢ら，2005）。この化学物質は津波堆積物が存在しない遡上限界まで分布しており，津波の発生直後であれば，この土壌中に残留する化学成分を用いることで津波浸水域を特定することができる（吉井ら，2011a）。土壌の化学分析は古津波の堆積物認定に適用できる可能性がある（Minoura・Nakaya，1991）だけでなく，津波堆積物が存在しない地点における古津波の調査手法としても期待される。

そこで，本研究では化学分析の津波調査への適用性を検討するために，東北地方太平洋沖地震津波（以下，3.11津波）発生後の浸水域内の土壌を採取・分析し，初期に残留する化学成分などの基礎的な特徴を把握した。

- |       |      |                             |
|-------|------|-----------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | (一財)電力中央研究所環境科学研究所<br>主任研究員 |
| 2 非会員 | 博(環) | (一財)電力中央研究所地球工学研究所<br>主任研究員 |
| 3 正会員 | 博(工) | (一財)電力中央研究所環境科学研究所<br>主任研究員 |
| 4 正会員 | 工博   | (一財)電力中央研究所地球工学研究所<br>上席研究員 |
| 5 正会員 | 博(工) | 筑波大学大学院システム情報工学研究科<br>准教授   |
| 6 正会員 | 博(工) | 金沢大学理工研究域准教授                |

表-1 取得したサンプルの概要.中央粒径 ( $D_{50}$ )において, \*は3mm以上の粒径を含んでいたサンプルを示す. 津波高の調査データ (東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2012) は調査地点の付近で計測されたものであり, rは遡上高を, iは浸水深を示す

地点	深さ (cm)	$D_{50}$ (mm)	遡上距離 (m)	津波高 (m)
1	0-3	0.34*	300	5.4i
	3-10	0.39		6.8i
2	0-5	0.28	70	6.8i
3	0-5	0.32	70	6.8i
4	0-5	0.27	70	6.8i
5	0-7	0.023	10	4.7i
6	0-6	0.15	40	4.7i
7	0-5	0.025	70	4.7i
8	0-3	0.033	450	11.9i
9	0-2	0.042	470	11.9i
10	0-5	0.32	380	3.4i
11	5-10	0.029	120	4.1i
	0-8	0.16		4.1i
12	0-2	0.045	300	8.5i
13	0-4	0.053	540	2.6-3.8i
14	0-1.5	0.026	160	4.8i
15	1.5-6.0	0.4	3400	2.5r
	0-5	0.012		
	5-10	0.012		
	10-15	0.013		
	15-20	0.059		
	20-25	0.017		
	25-30	0.015		
30-35	0.019			

2. 現地調査および分析方法

3.11津波発生後の2011年4月1~5日に, 仙台周辺の計15地点 (図-1) において浸水域内の表層土壌および津波堆積物を採取した (計24サンプル). 土壌のサンプリングはシャベルを用いて行い, Point15でのサンプリングでは長谷川式大型検土杖 (長さは35cm, 径は17mm) を用いて行った. AMeDAS仙台地点における津波発生から現地調査までの雨量は42.5mmであり, 降雪量は16cmであった. 現地調査期間中の降雨はなかった.

化学分析は, 得られた土壌中の間隙水に含まれる水溶性イオン量の計測を対象とし, 土壌を脱イオン水で攪拌した水溶液を分析した. 分析方法は吉井ら (2011a) と同様の手順で行い, 電気伝導度 (1:10) および主要な水溶性イオン量を計測した. 粒径分析においては, 1サンプルを除きシルト~粗砂で構成されていたことから, レーザ回折式粒子径分布測定装置 (Shimazu SALD-3100) を用いて, 3mm以下の粒径分布を計測した (表-1).

3. 結果

(1) 残留する化学成分量

3.11津波遡上域の津波堆積物, 土壌, および2010チリ津波遡上域周辺の津波堆積物, 土壌 (吉井ら, 2011a) それぞれの電気伝導度を比較した (図-2). 2010チリ津

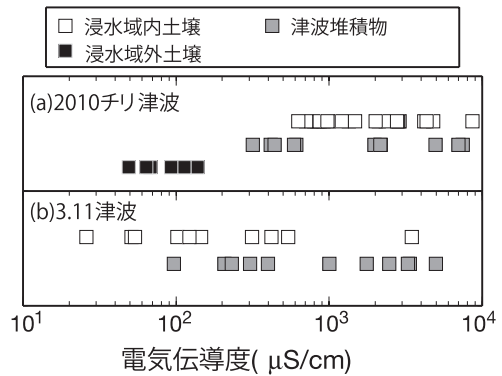


図-2 2010チリ津波 (吉井ら, 2011a) と3.11津波の調査結果における電気伝導度の比較. サンプルと脱イオン水の比率は1:10で計測

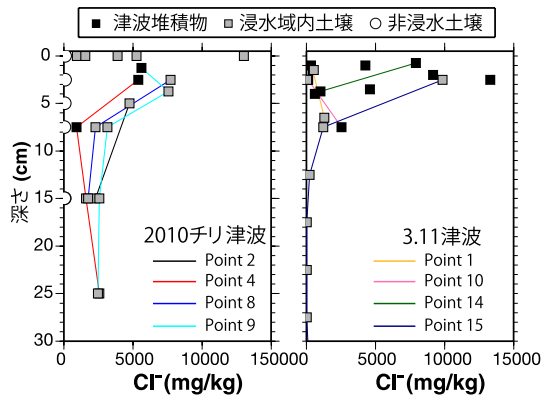


図-3 2010チリ津波 (吉井ら, 2011a) と3.11津波の調査結果におけるCl<sup>-</sup>の鉛直分布

波における浸水域内土壌が明らかに浸水域外のものに比べて高い電気伝導度を示すのに対して, 3.11津波における浸水域内土壌においては電気伝導度が非浸水域と同程度のものが見られる.

次に, これらの違いを検討するために, 電気伝導度の鉛直分布について比較を行った (図-3). なお, 2010年チリ津波の調査において, 津波以外で海水の影響を受けていると考えられた地点のデータは, 他の地点と比べて特異な変動をしていたため, 比較には用いていない.

図-3より, 両地点の共通した傾向として, Cl<sup>-</sup>は表層7cm程度まで高く, 7cm以深ではその変化量は小さい. また, 極表層のサンプルで値のパラツキが大きく, 深くなるほどパラツキは小さくなる. 一方, 2011チリ津波では深さ10cm以上の場所においてもCl<sup>-</sup>が多く含まれているのに対して, 3.11津波のサンプル (Point 15, 水田内で取得) では10cm程度になるとCl<sup>-</sup>が大きく減少しており, ほとんど津波の影響を受けていないと考えられる. 図-2で見られた3.11津波で電気伝導度が100μS/mより小さいサンプルは, これらの深層の土壌サンプルに相当する.

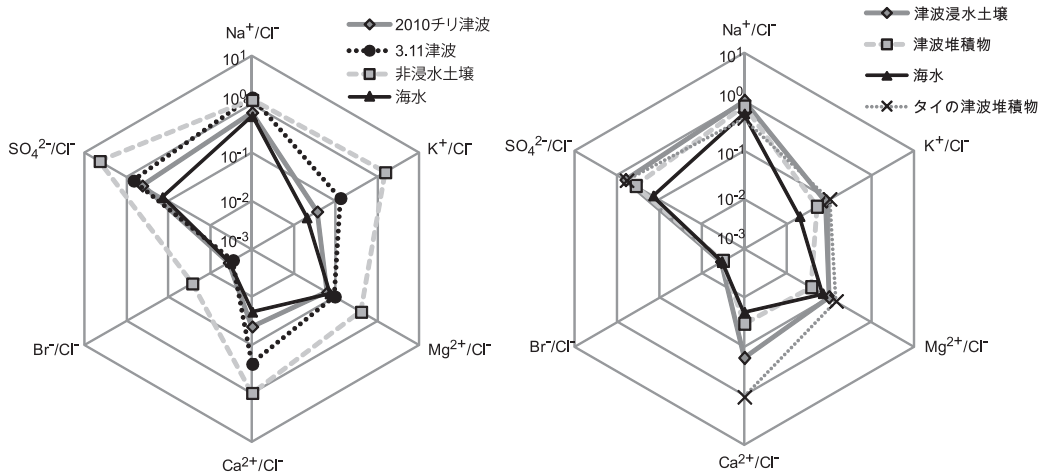


図-4 土壤に含まれる水溶性イオン量比。2010年チリ津波の調査結果は吉井ら（2011a）、2004年インド洋津波後のタイの津波堆積物の調査結果はSzczucińskiら（2005）による。海水の成分比はSverdrupら（1961）より引用。（b）の津波浸水土壤および津波堆積物は2010チリ津波および3.11津波のデータの平均値である

粒径分析の結果、この地点の平均粒径は約0.012mmであり、他の調査地点の平均粒径が0.02～0.1mmであるのに比べると非常に細かいという特徴が見られた。そのため、土壤の透水性が小さかったことにより、深層まで津波の影響が達しなかったと推測される。

一方、表層の土壤、津波堆積物においても3.11津波後の取得したサンプルでは $\text{Cl}^-$ が $300\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下のサンプルがあり、2010チリ津波に比べて $\text{Cl}^-$ が少ない。また、一部のサンプルで極表層の $\text{Cl}^-$ が非常に小さいにもかかわらず、5cm程度の深さでは逆に $\text{Cl}^-$ が多く含まれている地点がある。この原因としては、津波の発生から調査期間までの降雨量が2010チリ津波では2mmであったのに対して、3.11津波では42.5mmであり、降雨によりイオン類が流出した事が推測される。また、降雨により表層のイオンが深層へと移流（McLeodら、2010）された可能性もある。

ここで重要であるのは、このような降雨に伴うイオン類の流出および土壤中での移流により、津波が浸水した土壤層とイオン類が保存されている層が異なる可能性がある点である。吉井ら（2011b）では、津波直後の調査方法として極表層の土壤を分析することの有効性が指摘されたが、降雨後には化学物質が保存される層を考慮した調査が必要になる。

## (2) 化学成分の特徴

浸水域内土壤および津波堆積物中に残留する化学成分の特徴を調べるために、イオン類の成分量を塩化物イオン濃度比で整理した（図-4）。図-4より、土壤中に残留するイオン類は成分量こそ異なるものの、化学成分比は3.11津波、2010チリ津波ともに類似しており、海水の成分比に近い（図-4（a））。さらに、化学成分比を津波堆積

物の有無で整理した結果（図-4（b））、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ が若干異なるものの、化学成分比は堆積物の有無に関わらずほぼ同じである。Szczucińskiら（2005）がインド洋津波直後にタイで調査した結果においても土壤の成分比は海水と類似している。このことから、初期に土壤中に残留する化学成分比は津波の規模や調査地点などによらず、一般的傾向として海水とほぼ同様の成分比を有しており、さらにこの特徴は津波堆積物の有無と関係ないと考えられる。

これらの結果は、浸水域内土壤および津波堆積物に含まれる化学物質が、津波浸水後に海水が蒸発することで海水中の化学物質が残留していることを示唆している。この事は、津波堆積物の極表層で極めて高い電気伝導度が確認されること（中矢ら、2005）からも裏付けられる。海水の蒸発が主要な化学物質の残留過程であるとすれば、表層の土壤における化学成分量の違い（図-3）は、津波後の海水の浸水時間（蒸発量）に依存している可能性もある。

## (3) イオン比を用いた判別手法の検討

既に吉井ら（2011a）が指摘しているように、津波発生直後であれば土壤中のイオン量を用いた判別分析を行うことで、津波浸水域を高精度に判別することが可能である。ところが、土壤中のイオン類の総量は降雨により減少するため、過去の津波の浸水域調査にイオン量を用いることは不適である。そこで、図-4で確認されたイオン成分比を用いた浸水域判別の可否について検討を行った。

ここでは、吉井ら（2011a）と同様にマハラノビスの距離に基づく判別分析を適用し、説明変数は2つとした。説明変数には、一価のイオンおよび二価のイオンを代表

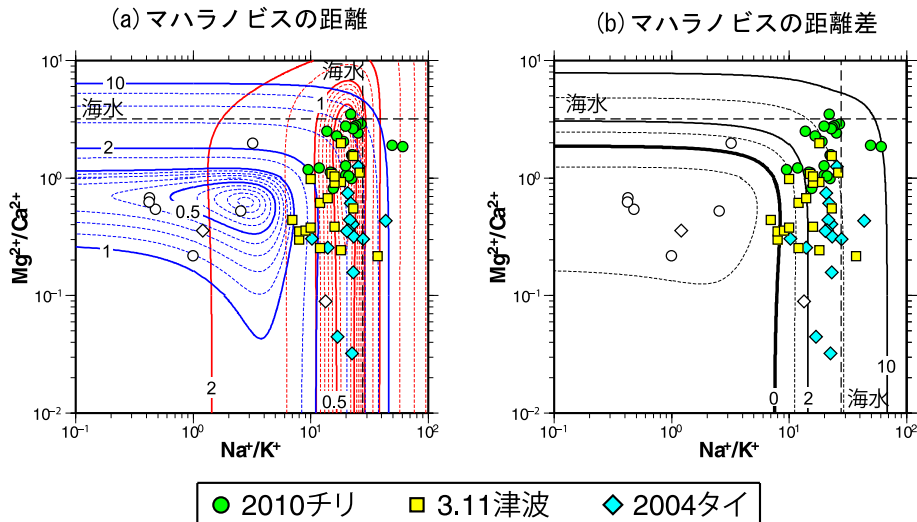


図-5 イオン成分比を用いた判別分析結果。(a) 浸水域内・外のマハラノビスの距離の分布。(b) マハラノビス距離差。0のコンターが浸水域内・外のサンプルの確率的境界を示す。カラーで示したシンボルは浸水域内土壌および津波堆積物であり、白抜きシンボルは浸水域外の土壌である。2010チリは吉井ら (2011a)、2004タイはSzczucińskiら (2005) のデータを使用

する値を用いる事とした。二価のイオンの代表として、Minoura・Nakaya (1991) に倣い  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  を用いた。一方、一価のイオンは  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  と結合しにくく、できるだけ独立して変動するイオンが好ましいことから、陽イオンの  $Na^+/K^+$  を代表値として用いた。また、一般的な津波浸水域判別の基準を得るために、2004年インド洋津波 (Szczucińskiら, 2007)、2010年チリ (吉井ら, 2011a) および3.11津波の調査結果を判別分析に用いた (計67サンプル)。

判別分析の結果を図-5に示す。浸水域内・外のサンプルのマハラノビスの距離 (図-5(a)) は、主に  $Na^+/K^+$  に依存しており、Minoura・Nakaya (1991) が津波で確認した  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  にはほとんど依存していない。浸水域内・外の  $Na^+/K^+$  の差は大きく、浸水域内および非浸水域のサンプルを明確に分類できることが分かる。これらの2変数を用いた判別結果が図-5(b) であり、図中の0のコンターが浸水域内・外のサンプルの確率的境界を示す。図-5(b) より、イオン比を用いることで大部分のサンプルについて浸水域内・外を正しく判別できており、判別率的中率は93%となった。ここで浸水域内で取得したサンプルで非浸水域と判別されたものは3サンプルであり、電気伝導度は  $231\mu S/cm$  以下であった。

次に、降雨に対する有効性を検討するために、Szczucińskiら (2005, 2007) による津波直後および2年後の分析結果を、得られた確率分布上にプロットした (図-6)。2年間の降雨量は3,300mmであり、この降雨により土壌中のイオン量は大きく減少し、大部分のサンプルにおける  $Cl^-$  は  $2,000mg\ kg^{-1}$  以下になっている (Szczucińskiら, 2007)。

図-6より、降雨の影響により約半数のサンプルについては成分比が変化することにより正しく判別できなくなるものの、半数のサンプルについては  $Na^+/K^+$  の値がほとんど変化しておらず、正常に判別できる事が分かった。そのため、イオン分量のみを用いる方法と比較すると、イオン成分比を用いた方法は比較的降雨の影響を受けにくいと考えられる。

ただし、イオン成分比が大きく変化した地点と、変化が小さかった地点がどのような要因によるのかは不明である。調査地点の地形的な条件や土の粒径などにより降雨の影響が異なる可能性もあるため、今後の詳細な調査が必要である。また、降雨後の判別率的中率は50%程度であるため、この判別結果のみを根拠に津波浸水域を決定することはできず、他の証拠と化学分析結果を併せて浸水域を解釈する必要がある。

なお、自然状態における土壌の特性は多岐にわたるため、全ての条件に適用できる方法を確立するのは困難であるため、化学分析による浸水域調査の確度を向上させるには、水溶性イオン以外に重金属類などの化学的痕跡の利用についても検討する事が重要と考えられる。

#### 4. 結論

津波発生直後における水溶性イオン類の初期残留量は、降雨の影響により成分量は異なるものの、調査地点や津波の規模、堆積物の有無にかかわらず成分比はほぼ海水と同じであることが知見された。降雨によるイオン類は流出・移流により、津波浸水層とイオンの残留層が乖離する可能性が示唆された。また、イオン成分比は降

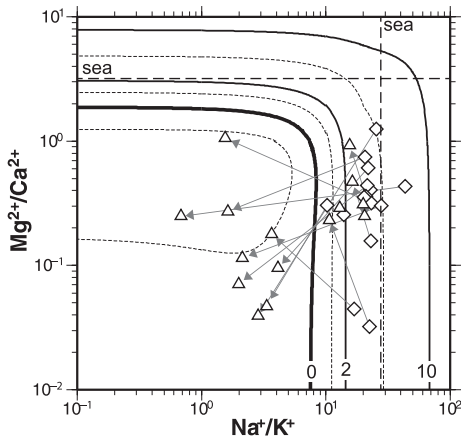


図-6 降雨におけるイオン比の変化。Szczenińskiら (2005, 2007) がインド洋津波直後、および2年後にタイで採取した津波堆積物の調査結果を使用

雨後の津波浸水域調査について有効な指標となり得ることが分かったが、判別率の低下するため他の調査と合せた解釈が必要になる。

**謝辞：**本研究における現地調査は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの現地調査の一環として実施したものである事を記すと共に、調査日程・場所の調整を実施して頂いた合同調査グループ事務局に深謝致します。また、土壤のイオン分析は松岡ありさ様にご協力頂きました。

#### 参 考 文 献

後藤和久・藤野滋弘 (2008) : 2004年インド洋大津波後の津波堆積物研究の課題と展望, 地質学雑誌, 114 (12), pp. 599-617.

宍倉正展・澤井祐紀・岡村行信・小松原純子・Than Tin Aung・石山達也・藤原 治・藤野滋弘 (2007) : 石巻平野における津波堆積物の分布と年代, 活断層・古地震研究報告, 7号, pp. 31-46.

宍倉正展・澤井祐紀・行谷佑一・谷川晃一朗 (2011) : 仙台・石巻平野における869年貞観地震と2011年東北地方太平洋沖地震の津波浸水域の比較, 日本地球惑星科学連合年次大会.

地震調査委員会 (2011) : 三陸沖から房総沖にかけての地震活

#### 動の長期評価 (第二版)

菅原大助・今村文彦・松本秀明 (2010) : 過去の津波像の定量的復元 - 貞観津波の痕跡調査と古地形の推定について, 津波工学研究報告, 27, pp. 103-132.

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012) : 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループHP 統一調査データ 2012/4/25版, <http://www.coastal.jp/ttj/> (2012/4/25 アクセス)

中矢哲郎・丹治 肇・桐 博英 (2005) : インド洋津波によるタイ南部農業被害の現地調査, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1361-1365.

原口 強 (2011) : 東日本大震災津波現地踏査報告, <http://www.jsgimap.org/tsunami/> (2011/6/24 アクセス)

吉井 匠・今村正裕・松山昌史・越村俊一・松岡昌志・E. Mas・C. Jimenez (2011a) : 土壤中の化学成分を用いた津波浸水域の調査方法, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 67 (1), pp. 49-62.

吉井 匠・松山昌史・今村正裕・越村俊一・松岡昌志・E. Mas・C. Jimenez (2011b) : 土壤の簡易化学分析による津波浸水域調査, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 67 (2), pp. 1316-1320.

Goto, K., C. Chagué-Goff, S. Fujino, J. Goff, B. Jaffe, Y. Nishimura, B. Richmond, Y. Nishimura, B. Richmond, D. Sugawara, W. Szczeniński, D.R. Tappin, R.C. Witter and E. Yulianto (2011) : New insights of tsunami hazard from the 2011 Tohoku-oki event, Marine Geology, 290, 1-4, pp. 46-50.

McLeod, M. K., P. G. Slavich, Y. Irhas, N. Moore, A. Rachman, N. Ali, T. Iskandar, C. Hunt & C. Caniogo (2010) : Soil salinity in Aceh after the December 2004 Indian Ocean tsunami, Agricultural Water Management, 97(5), pp. 605-613.

Minoura, K. and S. Nakaya (1991) : Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan, Journal of Geology, 99(2), pp. 265-287.

Shi, S., A. G. Dawson and D. E. Smith (1995) : Coastal sedimentation associated with the December 12th, 1992 tsunami in Flores, Indonesia, Pure and Applied Geophysics, 144(3-4), pp. 525-536.

Sverdrup, H. U., Johnson, M. W. and Fleming, R. H. (1961) : The Oceans: their physics, chemistry, and general biology (Modern asia editions), Prentice-Hall, 173 p.

Szczeniński, W., P. Niedzielski, G. Rachlewicz, T. Sobczyński, A. Zioła, A. Kowalski, S. Lorenc and J. Siepak (2005) : Contamination of tsunami sediments in a coastal zone inundated by the 26 December 2004 tsunami in Thailand, Environmental Geology, 49(2), pp. 321-331.

Szczeniński, W., P. Niedzielski, L. Kozak, M. Frankowski, A. Zioła and S. Lorenc (2007) : Effects of rainy season on mobilization of contaminants from tsunami deposits left in a coastal zone of Thailand by the 26 December 2004 tsunami, Environmental Geology, 53(2), pp. 253-264.