東北地方太平洋沖地震による岩手、宮城、福島県沿岸域における 津波堆積物の供給源

— TOC/TN 比および安定硫黄同位体 ($\delta^{34}\text{S}$) を指標として —

奈良 郁子* 渡邊 隆広* 掛川 武**
山崎 慎一* 井上千弘* 土屋 範芳*

**Sources of Tsunami Deposits on the Pacific Coasts of Iwate, Miyagi, and Fukushima Areas
by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Northeast Japan Inferred
from Geochemical Signatures (TOC/TN Ratio and Stable Sulfur Isotope)**

Fumiko W. NARA*, Takahiro WATANABE*, Takeshi KAKEGAWA**,
Shin-ichi YAMASAKI*, Chihiro INOUE* and Noriyoshi TSUCHIYA*

[Received 6 March, 2014; Accepted 5 September, 2014]

Abstract

Geochemical analyses (total nitrogen: TN, total organic carbon: TOC, total sulfur: TS, and stable sulfur isotope ratio: $\delta^{34}\text{S}$) were performed on tsunami deposits by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake obtained from Iwate, Minamisanriku, Kesen-numa, and Sendai Bay areas for a total of 133 samples. Although TOC/TN ratios ranged widely (0.7–90), most of the samples (more than 80% of samples) ranged from 10–30, which were similar results to those for marine surface sediment in the Pacific coast area. Low $\delta^{34}\text{S}$ values (from -29.6‰ to -11.3‰) from Iwate, Minami Sanriku, and Sendai Bay tsunami deposits were observed. Generally, such low $\delta^{34}\text{S}$ values result from large isotope fractionation caused by the activity of sulfate-reducing bacteria in marine sediment under a sulfate (SO_4^{2-}) rich environment. These results suggest that the tsunami deposits were mainly derived from marine sediment. High correlations between TS and As contents ($r = 0.958$) were observed in tsunami deposits from the Kesen-numa area. Furthermore, the high $\delta^{34}\text{S}$ values (from -3.1‰ to -0.7‰) in the tsunami deposits from the Kesen-numa area correspond well with those of hydrothermal ore samples from the Kesen-numa area. These results indicate that sulfur and arsenic in tsunami deposits from the Kesen-numa area originated in slag from the mines.

Key words : TOC/TN ratio, stable sulfur isotope, sulfate reducing bacteria, tsunami deposits,
The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

キーワード : TOC/TN 比, 安定硫黄同位体, 硫酸還元バクテリア, 津波堆積物, 東北地方太平洋沖
地震

* 東北大学大学院環境科学研究科

** 東北大学大学院理学研究科地学専攻

* Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai, 980-8579, Japan

** Department of Earth Science, Tohoku University, Sendai 980-8576, Japan

I. はじめに

地震によって発生した陸域の津波浸水域を推定するために、地層中に残された津波堆積物を発見する試みがこれまで多く行われてきた（例えば、藤原, 2007; 藤原ほか, 2013）。なかでも仙台平野にて採取された津波堆積物試料を用いた研究は、非常に活発に行われている（Minoura and Nakaya, 1991; 澤井ほか, 2006; 菅原ほか, 2011）。東北地方において、過去に発生した地震（貞観地震, 西暦 869 年）により引き起こされた巨大津波により、仙台平野が浸水し津波堆積物を形成させたことがわかっている（Minoura and Nakaya, 1991; 澤井ほか, 2006; 菅原ほか, 2011）。地層中からの津波堆積物の認定は、多くの場合、海岸の砂由来と考えられる石英質の砂層を見いだすことにより決定される（例えば、澤井ほか, 2006）。とくに、仙台平野で確認された津波堆積物である「貞観津波堆積物」は、歴史記録に残された津波被害（貞観地震）との整合をもち、災害科学における津波堆積物研究の重要性を示している。しかしながら、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震後のフィールド調査から、海から陸域へと運搬された津波堆積物は、砂よりもさらに粒度の細かい泥質の堆積物が、砂と比較してさらに内陸へと運搬されていることがわかった（Goto *et al.*, 2011）。Goto *et al.* (2011) は、歴史津波堆積物中の砂層から見積もられた津波浸水域は、実際よりも小さく見積もられている可能性を指摘している。つまり、砂層津波堆積物のみで評価された津波浸水域は、実際の津波浸水域を過小評価する恐れがある。粒度に関するデータのみではなく、さまざまな指標を用いて津波堆積物の分析を進め、基礎データを蓄積していくことが重要であることは間違いない。

2011 年東北地方太平洋沖地震により陸域へ打ち上げられた津波堆積物試料を用いて、さまざまな地球化学分析が進められている（Chagué-Goff *et al.*, 2012; 土屋ほか, 2012; 渡邊ほか, 2014）。土屋ほか (2012) は、2011 年 4 月から 8 月にかけて、岩手県久慈市から福島県南相馬までの津波

浸水域から津波堆積物試料を採取した。津波堆積物中の無機金属元素およびヒ素の含有量の分析から、津波により海底および河口付近の堆積物が陸域へ打ち上げられ、津波を起因とした陸域におけるヒ素の環境リスクが増加することを示した。

本研究では、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震による津波で打ち上げられた堆積物試料中の全窒素 (Total nitrogen: TN)、全有機態炭素 (Total organic carbon: TOC)、全硫黄 (Total sulfur: TS) 含有量および安定硫黄同位体比 (Stable sulfur isotope ratio: $\delta^{34}\text{S}$) の分析を行い、津波堆積物の供給源の推定を行った。安定硫黄同位体を用いた現世津波堆積物の研究は、仙台平野に打ち上げられた津波堆積物試料（海岸から内陸域へ全長 4.5 km）を用いて行われているが（Chagué-Goff *et al.*, 2012）、東北地方沿岸域全域を対象に安定硫黄同位体分析を行ったのは、本研究がはじめてである。津波が引き起こす物質循環過程への影響に関して、地球化学分析結果に基づき報告を行う。

II. 試料と分析方法

1) 試料

本研究では、岩手県久慈市から宮城県沿岸域の全域、および福島県南相馬市までの津波浸水域において採取された津波堆積物試料（試料数 133 個、図 1、表 1）を分析に用いた。津波堆積物採取に関する詳細は、既報（土屋ほか, 2012）を参照されたい。特筆事項として、鉱さい試料（Slag sample, 試料名: NH1, NT30）を気仙沼市本吉町大谷地区から採取した。ここでは、東北地方太平洋沖地震により鉱山跡地の堆積場から、製錬時の廃棄物である鉱さいが流出した。大谷地区での津波試料採取時に、明らかに堆積場から流出した人為由来の鉱さい試料 2 点を採取した。

津波堆積物試料を風乾にて乾燥後、2 mm の篩を用いてレキ、木片等を除去した。粒径 2 mm 未満の津波堆積物試料をメノウ乳鉢で均一化した後、元素分析および安定同位体分析に供与した。

2) 窒素、炭素、硫黄元素分析

津波堆積物中の全窒素含有量 (Total nitrogen: TN)、全有機態炭素含有量 (Total organic carbon:

図 1 東北地方太平洋沿岸域における津波堆積物試料採取位置. a) 東北地方位置図, b) 東北地方太平洋沿岸図. 図 b 中の X 印は赤色が鉱床, 青色が Bedded Mn を, また津波浸水域を橙色で記す.

Fig. 1 Map showing study area in Tohoku Pacific coast area. a) Tohoku district in Japan and b) sampling sites in Tohoku Pacific coast area. Red and blue X marks indicate sites of hydrothermal metal deposits and bedded Mn. The tsunami flooded area is shown with light red shading on the map.

TOC) および全硫黄含有量 (Total sulfur: TS) の定量分析は, 東北大学に設置された元素分析計 (Elemental analyzer: EA, Flash 2000, ThermoFisher Scientific 社製) を用いた. TOC 分析においては, 1.2N-HCl により無機態炭素 (炭酸塩) を除去した. 津波堆積物試料を 10–15 mg 秤量し錫箔に封入後, 元素分析計へ供与した. 錫箔に封入

された試料は, 約 900℃ に設定された元素分析装置内にて, 酸素雰囲気下で閃光燃焼される. その際, 温度が約 1800℃ 付近まで達することにより, 試料中の窒素, 炭素, 硫黄がガス化 (N_2 , CO_2 , SO_2) される. これらの混合ガスはキャリアガス (高純度 He) によって移動し, 分離カラムにてそれぞれのガスに分離後, 熱伝導度検出器 (Thermal conduc-

表 1 岩手沿岸, 気仙沼, 南三陸および石巻, 仙台港地域における津波堆積物試料中の全窒素 (TN), 全有機態炭素 (TOC), 全硫黄 (TS) 含有量, TOC/TN 比, 安定硫黄同位体比 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$), ヒ素含有量. ヒ素含有量は土屋ほか(2012)より引用した.

Table 1 TN, TOC and TS concentrations, TOC/TN atomic ratio, $\delta^{34}\text{S}$ and Arsenic (As) concentrations (after Tsuchiya *et al.*, 2012) of bulk tsunami sediments.

sample name	sampling point	sampling date	TN wt%	TOC wt%	TOC/TN atomic ratio	TS wt%	$\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ ‰	Total As content (Tsuchiya <i>et al.</i> , 2012) mg/kg	Japanese address
NT28	1	2011.7.6	0.04	0.60	15.8	0.08		9.1	岩手県 久慈市長内町
NT27	2	2011.7.6	0.22	2.59	14.0	0.05		29.4	岩手県 九戸郡野田村野田
NT26	3	2011.7.6	0.04	0.35	10.5	0.03		12.2	岩手県 九戸郡野田村下安家
NT25	4	2011.7.6	0.02	0.11	8.0	0.01		2.9	岩手県 下閉伊郡普代村宇留部
NT24	5	2011.7.6	0.02	0.28	17.0	0.01		4.2	岩手県 下閉伊郡田野畑村羅賀
NT23	6	2011.7.6	0.01	0.15	17.0	0.02		3.8	岩手県 下閉伊郡田野畑村松前沢
RY22	7	2011.6.15	0.16	3.91	28.0	0.13		46.2	岩手県 下閉伊郡岩泉町小本小本
RY21	8	2011.6.15	0.19	0.47	2.8	0.03		4.7	岩手県 宮古市田老星山
RY20	9	2011.6.15	0.03	0.47	16.1	0.08		13.5	岩手県 宮古市田老乙部
RY19	10	2011.6.15	0.06	1.29	25.1	0.18		6.8	岩手県 宮古市田老川向
RY18	11	2011.6.15	0.08	0.67	10.4	0.02		4.2	岩手県 宮古市崎山第4地割
RY17	12	2011.6.15	0.07	0.65	10.9	0.12		7.3	岩手県 宮古市小山田
RY16	13	2011.6.15	0.03	0.57	22.4	0.03		4.3	岩手県 宮古市磯鶏2丁目
RY15	14	2011.6.15	0.08	0.43	6.4	0.07		6.4	岩手県 宮古市津軽石
RY14	15	2011.6.14	0.03	0.52	22.0	0.03		1.7	岩手県 下閉伊郡山田町大沢
RY13	16	2011.6.14	0.02	1.70	90.2	0.06		2.2	岩手県 下閉伊郡山田町織笠
RY12	17	2011.6.14	0.11	4.17	43.5	0.07		8.2	岩手県 下閉伊郡山田町船越
RY11	18	2011.6.14	0.10	1.72	20.9	0.05		5.4	岩手県 上閉伊郡大槌町吉里吉里3丁目
RY09	19	2011.6.14	0.16	2.06	14.7	0.12		12.8	岩手県 上閉伊郡大槌町大槌第15地割
RY10	20	2011.6.14	0.08	0.91	12.8	0.20		9.1	岩手県 上閉伊郡大槌町安渡3丁目
RY07	21	2011.6.14	0.38	4.94	15.1	0.13		29.8	岩手県 釜石市鶴住居町第5地割
RY08	22	2011.6.14	0.23	2.30	11.8	0.30	-16.9	40.3	岩手県 釜石市鶴住居町第15地割
RY06	23	2011.6.14	0.21	3.13	17.4	0.10		14.2	岩手県 釜石市両石町水海
RY04	24	2011.6.14	0.23	4.79	24.3	0.46	-11.3	24.9	岩手県 釜石市大渡町1丁目
RY05	25	2011.6.14	0.20	3.81	22.5	0.65	-18.1	15.0	岩手県 釜石市港町1丁目
RY03	26	2011.6.14	0.14	2.07	17.1	0.14		9.4	岩手県 釜石市平田
RY02	27	2011.6.14	0.27	3.85	16.7	0.06		11.1	岩手県 釜石市唐丹町本郷
RY01	28	2011.6.14	0.09	1.07	13.6	0.04		5.1	岩手県 釜石市唐丹町荒川
RY32	29	2011.8.2	0.13	0.68	6.0	0.03		6.1	岩手県 大船渡市三陸町吉浜上野
RY31	30	2011.8.2	0.04	0.49	14.4	0.01		4.1	岩手県 大船渡市三陸町越喜来沖田
RY30	31	2011.8.2	0.22	2.35	12.3	0.24		14.8	岩手県 大船渡市三陸町綾里平館
NT12	32	2011.6.16	0.11	3.21	33.4	0.35	-17.3	9.2	岩手県 大船渡市赤崎町諏訪前
NT13	33	2011.6.16	0.04	0.62	20.1	0.03		13.8	岩手県 大船渡市末崎町神坂
NT10	34	2011.6.16	0.16	1.92	13.9	0.06		18.9	岩手県 陸前高田市竹駒町十日市場
NT9	35	2011.6.16	0.06	0.85	16.2	0.07		11.3	岩手県 陸前高田市高田町中川原
NT8	36	2011.6.16	0.03	0.39	17.9	0.05		11.8	岩手県 陸前高田市高田町古川
NT14	37	2011.6.16	0.04	0.67	21.2	0.15		11.9	岩手県 陸前高田市小友町三日市
RY29	38	2011.8.2	0.11	0.97	10.2	0.03		9.8	宮城県 気仙沼市唐桑町港
RY28	39	2011.8.2	0.10	0.94	11.2	0.02		80.6	宮城県 気仙沼市唐桑町明戸
NH7	40	2011.6.1	0.16	2.21	16.4	0.51	-11.0	20.0	宮城県 気仙沼市東八幡前
NH5	41	2011.6.1	0.06	0.75	15.9	0.09		15.4	宮城県 気仙沼市東みなと町
NH6	42	2011.6.1	0.05	0.59	14.6	0.16		11.7	宮城県 気仙沼市東みなと町
Tnm-05	43	2011.4.16	0.05	0.72	15.8	0.18		11.5	宮城県 気仙沼市錦町2丁目
RY27	44	2011.8.2	0.04	0.30	8.4	0.02		16.4	宮城県 気仙沼市松崎尾崎
RY26	45	2011.8.2	0.14	1.36	11.2	0.04		14.4	宮城県 気仙沼市波路上内田
NT35	46	2011.8.24	0.06	0.24	4.7	0.01		12.0	宮城県 気仙沼市波路上杉ノ下
RY25	47	2011.8.2	0.23	2.52	12.7	0.03		102.9	宮城県 気仙沼市本吉町九多丸
NT34	48	2011.8.24	0.21	1.60	9.0	0.04		33.0	宮城県 気仙沼市本吉町田の沢
NT33	49	2011.8.24	0.23	0.92	4.7	0.05		201.0	宮城県 気仙沼市本吉町前浜
NH1	50	2011.6.1	0.02	0.31	18.6	1.43	-3.3	2563.3	宮城県 気仙沼市本吉町高(鉾さい)
NT30	51	2011.8.24	0.09	1.35	17.5	0.97	-1.0	2257.4	宮城県 気仙沼市本吉町高(鉾さい)
NH2	52	2011.6.1	0.06	0.95	19.5	0.71	-0.6	1735.4	宮城県 気仙沼市本吉町高
NT29	53	2011.8.24	0.13	1.15	10.5	0.43	-1.1	1118.6	宮城県 気仙沼市本吉町高
NH3	54	2011.6.1	0.13	1.93	17.1	0.68	-1.2	1840.4	宮城県 気仙沼市本吉町高
NT31	55	2011.8.24	0.12	1.50	14.5	1.03	-0.8	2202.6	宮城県 気仙沼市本吉町高
Tnm-06	56	2011.4.16	0.07	0.98	15.3	1.14	-0.9	1984.8	宮城県 気仙沼市本吉町高
NH4	57	2011.6.1	0.10	1.56	18.1	0.04		226.5	宮城県 気仙沼市本吉町赤牛
NT32	58	2011.8.24	0.11	2.11	22.3	0.24		474.5	宮城県 気仙沼市本吉町赤牛
NT36	59	2011.8.24	0.23	2.24	11.4	0.17		26.1	宮城県 気仙沼市本吉町津谷明戸
Tnm-07	60	2011.4.16	0.44	0.27	0.7	0.23		20.9	宮城県 気仙沼市本吉町卯名沢

表 1 (つづき)

Table 1 (Continued)

sample name	sampling point	sampling date	TN wt%	TOC wt%	TOC/TN atomic ratio	TS wt%	$\delta^{34}\text{S}$ ‰	Total As content (Tsuchiya <i>et al.</i> , 2012) mg/kg	Japanese address	
RY24	61	2011.8.2	0.10	1.07	12.9	0.06		5.9	宮城県	本吉郡南三陸町歌津港
RY23	62	2011.8.2	0.07	0.43	7.6	0.01		8.6	宮城県	本吉郡南三陸町歌津伊里前
NT1	63	2011.6.4	0.23	3.16	16.0	0.03		5.1	宮城県	本吉郡南三陸町志津川清水浜
NT3	64	2011.6.4	0.20	2.47	14.6	0.11		13.0	宮城県	本吉郡南三陸町志津川小森
NT2	65	2011.6.4	0.04	0.55	14.4	0.17		9.5	宮城県	本吉郡南三陸町志津川五日町
NT4	66	2011.6.4	0.07	0.79	13.6	0.07		7.7	宮城県	本吉郡南三陸町戸倉川向
NT7	67	2011.6.4	0.16	1.94	13.8	0.03		13.3	宮城県	本吉郡南三陸町戸倉滝浜
NT6	68	2011.6.4	0.13	1.97	17.7	0.28	-16.4	14.6	宮城県	本吉郡南三陸町戸倉新中芝
NT5	69	2011.6.4	0.32	4.24	15.6	0.06		17.7	宮城県	本吉郡南三陸町戸倉上沢前
NT17	70	2011.7.2	0.04	0.74	20.5	0.03		5.4	宮城県	石巻市北上町十三浜相川
Tnm-03	71	2011.4.16	0.10	1.42	17.2	0.04		5.7	宮城県	石巻市北上町十三浜白浜
NT16	72	2011.7.2	0.04	0.75	20.2	0.11		10.9	宮城県	石巻市北上町十三浜原
Tnm-02	73	2011.4.16	0.27	3.04	13.2	0.45	+5.0	21.0	宮城県	石巻市北上町女川二丁谷地
NT18	74	2011.7.2	0.01	0.25	28.9	0.05		10.1	宮城県	石巻市針岡小谷地
NT15	75	2011.7.2	0.03	0.51	22.9	0.05		9.7	宮城県	石巻市中野牧野果前
Tnm-01	76	2011.4.16	0.03	0.69	28.8	0.12		8.8	宮城県	石巻市相野谷
NT19	77	2011.7.2	0.11	1.99	20.2	0.42	-29.6	11.1	宮城県	石巻市雄勝町下雄勝1丁目
NT21	78	2011.7.2	0.08	1.20	18.2	0.04		5.6	宮城県	牡鹿郡女川町御前浜御前
NH34	79	2011.6.12	0.09	1.05	13.5	0.15		6.0	宮城県	牡鹿郡女川町女川浜女川
NH33	80	2011.6.12	0.02	0.34	21.8	0.02		3.5	宮城県	牡鹿郡女川町野々浜大道
NH24	81	2011.6.12	0.06	0.98	17.8	0.14		6.0	宮城県	石巻市桃浦
NH25	82	2011.6.12	0.14	2.01	17.1	0.61	-23.3	9.7	宮城県	石巻市萩浜萩浜
NH32	83	2011.6.12	0.01	0.28	24.0	0.09		5.4	宮城県	石巻市大谷川浜二重坂
NH31	84	2011.6.12	0.05	0.62	13.4	0.03		6.5	宮城県	石巻市谷川浜川原
NH26A	85	2011.6.12	0.06	1.02	20.9	0.02		4.8	宮城県	石巻市清水田浜須波田
NH26B	86	2011.6.12	0.02	0.25	17.8	0.01		6.4	宮城県	石巻市清水田浜須波田
NH28	87	2011.6.12	0.04	1.19	34.5	0.06		3.8	宮城県	石巻市大原浜町
NH29A	88	2011.6.12	0.01	0.14	16.2	0.04		7.2	宮城県	石巻市十八成浜十八成
NH29B	89	2011.6.12	0.01	0.58	68.0	0.02		10.0	宮城県	石巻市十八成浜十八成
Tnm-17	90	2011.4.29	0.06	0.59	12.1	0.11		6.8	宮城県	石巻市鮎川浜南
NH22	91	2011.6.11	0.08	1.04	15.4	0.12		12.9	宮城県	石巻市水明南2丁目
Tnm-04	92	2011.4.16	0.04	0.72	19.3	0.12		7.2	宮城県	石巻市不動町2丁目
NH21	93	2011.6.11	0.19	2.34	14.5	0.24		14.8	宮城県	石巻市大街道西3丁目
NH23	94	2011.6.12	0.01	0.32	37.0	0.05		9.3	宮城県	石巻市緑町2丁目
NH20	95	2011.6.11	0.28	3.16	13.2	0.14		31.4	宮城県	東松島市大曲横沼
NH19	96	2011.6.11	0.08	1.45	20.7	0.09		8.8	宮城県	東松島市高松猪鼻
Tnm-08	97	2011.4.16	0.25	3.02	14.1	0.09		16.8	宮城県	東松島市牛網新上四十八
Tnm-16	98	2011.4.29	0.01	0.31	35.6	0.01		2.6	宮城県	東松島市野蒜洲崎
NH17A	99	2011.6.11	0.01	0.34	38.7	0.03		2.3	宮城県	宮城郡松島町手樽早川東
NH17B	100	2011.6.11	0.29	2.90	11.7	1.24	-22.2	13.7	宮城県	宮城郡松島町手樽早川東
NH16	101	2011.6.11	0.15	1.72	13.5	0.23		5.2	宮城県	宮城郡松島町高城浜
NH15	102	2011.6.11	0.27	3.25	13.9	0.61	-22.8	12.6	宮城県	宮城郡松島町松島東浜
NH8A	103	2011.6.6	0.01	0.19	22.4	0.04		6.3	宮城県	塩竈市新浜町1丁目
NH8B	104	2011.6.6	0.15	1.79	14.0	0.56	-15.5	9.7	宮城県	塩竈市新浜町1丁目
Tnm-15	105	2011.4.29	0.01	0.13	14.0	0.04		10.6	宮城県	宮城郡七ヶ浜町花瀨浜古館
NH10	106	2011.6.6	0.05	0.81	20.5	0.07		8.1	宮城県	多賀城市栄
NH11	107	2011.6.6	0.03	0.89	31.8	0.12		9.7	宮城県	仙台市宮城野区白鳥
Tnm-14	108	2011.4.29	0.03	0.59	24.4	0.08		9.6	宮城県	仙台市宮城野区蒲生町
NH12A	109	2011.6.6	0.32	5.52	20.1	0.10		22.3	宮城県	仙台市若林区荒井遠藤
NH12B	110	2011.6.6	0.37	4.87	15.3	0.07		11.5	宮城県	仙台市若林区荒井遠藤
Tnm-13	111	2011.4.29	0.07	1.05	16.6	0.04		10.8	宮城県	仙台市若林区荒浜
NH14	112	2011.6.6	0.03	0.70	27.9	0.04		12.7	宮城県	名取市関上太子堂
Tnm-12	113	2011.4.25	0.01	0.52	47.7	0.03		10.5	宮城県	名取市関上2丁目
AO2	114	2011.6.13	0.12	2.20	20.6	0.09		17.8	宮城県	岩沼市下野郷中谷地
AO1	115	2011.6.13	0.01	0.12	14.4	0.02		7.4	宮城県	岩沼市下野郷浜
AO8	116	2011.6.13	0.05	1.26	30.6	0.06		16.3	宮城県	岩沼市早股東砂押
AO7	117	2011.6.13	0.16	3.33	25.0	0.05		8.8	宮城県	亶理郡亶理町逢隈中泉原
AO3B	118	2011.6.13	0.05	0.93	21.4	0.08		12.3	宮城県	岩沼市寺島毛下
Tnm-11	119	2011.4.25	0.02	0.38	28.0	0.01		10.6	宮城県	亶理郡亶理町荒浜港通リ
AO4A	120	2011.6.13	0.01	0.46	43.6	0.16		15.2	宮城県	亶理郡亶理町江下
AO4B	121	2011.6.13	0.03	0.73	28.7	0.13		20.1	宮城県	亶理郡亶理町江下
AO5	122	2011.6.13	0.03	0.07	2.9	0.01		7.8	宮城県	亶理郡亶理町吉田須賀畑
Tnm-09	123	2011.4.25	0.01	0.16	18.2	0.02		8.0	宮城県	亶理郡山元町山寺浜
AO6	124	2011.6.13	0.18	3.12	20.2	0.05		9.6	宮城県	亶理郡山元町高瀬南耕土
AO16	125	2011.6.20	0.02	0.27	20.7	0.02		6.4	宮城県	亶理郡山元町坂元二又
AO15	126	2011.6.20	0.08	0.89	13.2	0.03		4.5	宮城県	亶理郡山元町坂元道合
Tnm-10	127	2011.4.25	0.01	0.18	21.0	0.01		1.1	福島県	相馬郡新地町埴崎南浜田
AO14	128	2011.6.20	0.01	0.27	33.4	0.04		10.5	福島県	相馬市原釜北谷地
AO13	129	2011.6.20	0.14	2.46	20.3	0.06		6.2	福島県	相馬市新沼
AO12	130	2011.6.20	0.02	0.54	31.3	0.04		6.0	福島県	相馬市柏崎南家野
AO9	131	2011.6.20	0.18	3.39	22.1	0.08		7.2	福島県	相馬市日下石鳥喰
AO11	132	2011.6.20	0.03	0.87	29.0	0.08		5.6	福島県	相馬市蒲庭前釜
AO10	133	2011.6.20	0.16	2.56	18.4	0.16		7.5	福島県	南相馬市鹿島区南柚木矢ノ目

tivity detector: TCD) により検出される。本法における測定誤差は、すべての元素（窒素、炭素、硫黄）において $\pm 0.05\%$ である。

3) 安定硫黄同位体分析 ($\delta^{34}\text{S}$)

全硫黄濃度が $0.25 \text{ wt}\%$ 以上の試料を対象に、硫黄同位体分析を行った ($n = 19$)。岩手沿岸地域で 4 試料 (NT12, RY04, RY05, RY08), 気仙沼地域で 8 試料 (NH1, NH2, NH3, NH7, NT29, NT30, NT31, Tnm-06), 南三陸町-石巻地域で 4 試料 (NH25, NT6, NT29, Tnm-02), 仙台湾沿岸地域で 3 試料 (NH8, NH15, NH17b) の試料を用いて硫黄同位体測定を行った。

津波堆積物中の硫黄の化学形態分別を行っていないため、安定同位体分析へ供与する試料中には、硫酸塩、硫化物および有機物態硫黄が存在している。ゆえに、本研究における安定硫黄同位体比を、 $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ (全硫黄 (Total Sulfur) の安定硫黄同位体比) として表記する。安定硫黄同位体分析には、元素分析-同位体比質量分析計 (Isotope ratio mass spectrometer: IRMS, MAT252, Finnigan 社製) を用いた。試料を錫箔中に封入する際に、助燃剤として酸化バナジウム (V_2O_5) を混ぜた。元素分析計により SO_2 ガス化された試料が, ConFlo III を介してオンラインで IRMS へ導入される。測定された同位体値は、国際標準試料である Canyon Diabro Troilite: CDT) 中の FeS の硫黄同位体比を用いて規格化し、式 (1) より測定試料の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ を得た。

$$\delta^{34}\text{S} (\text{‰}) = \left\{ \left(\frac{{}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}}{\text{sample}} \right) / \left(\frac{{}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}}{\text{CDT}} \right) - 1 \right\} \times 10^3 \quad (1)$$

Laboratory standard として Ag_2S ($\delta^{34}\text{S} = +0.54\text{‰}$) を用いた。本法における測定誤差は、 $\pm 0.5\text{‰}$ である。

III. 結果と考察

既報 (土屋ほか, 2012) にならい、津波堆積物試料を 4 つの地域 (岩手沿岸, 気仙沼, 南三陸町-石巻, 仙台湾沿岸) に区別した (図 1)。津波堆積物中の全窒素、全有機態炭素、全硫黄の含有量、および $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ 測定結果を表 1 に示す。

1) 全窒素、全有機態炭素、全硫黄含有量

1-1) 岩手沿岸地域 (Sampling points: 1-37)

津波堆積物中の全窒素 (TN), 全有機態炭素 (TOC), 全硫黄含有量 (TS) はそれぞれ $0.01\text{--}0.38 \text{ wt}\%$, $0.11\text{--}4.94 \text{ wt}\%$, $0.01\text{--}0.65 \text{ wt}\%$ であった (図 2, 表 1)。全硫黄含有量の平均値は $0.13 \text{ wt}\%$ ($n = 38$) であり、釜石市大渡町 (RY04) および釜石市港町 (RY05) の試料において比較的高い値 (それぞれ $0.46 \text{ wt}\%$, および $0.65 \text{ wt}\%$) を示した。

1-2) 気仙沼地域 (Sampling points: 38-60)

全窒素、全有機態炭素、全硫黄含有量はそれぞれ $0.02\text{--}0.44 \text{ wt}\%$, $0.27\text{--}2.52 \text{ wt}\%$, $0.01\text{--}1.43 \text{ wt}\%$ であった (図 2, 表 1)。また、鉾さい試料 (NH1, NT30) の全硫黄含有量はそれぞれ $1.43 \text{ wt}\%$, および $0.97 \text{ wt}\%$ を示し、その他の試料と比較しておおむね高い全硫黄含有量をもつことがわかった。全硫黄含有量の平均値は $0.37 \text{ wt}\%$ ($n = 23$) であり、その他 3 つのエリアと比べ明らかに高い値を示した。とくに気仙沼市本吉町で得られた試料は、その他の地点と比較して高い硫黄含有量を示した (平均値で $0.52 \text{ wt}\%$, $n = 14$)。

1-3) 南三陸町-石巻地域 (Sampling points: 61-98)

全窒素、全有機態炭素、全硫黄含有量はそれぞれ $0.01\text{--}0.27 \text{ wt}\%$, $0.14\text{--}4.24 \text{ wt}\%$, $0.01\text{--}0.61 \text{ wt}\%$ であった (図 2, 表 1)。南三陸町-石巻地域における硫黄含有量は低い値を示し (平均値で $0.11 \text{ wt}\%$, $n = 38$)、3 試料のみ比較的高い硫黄含有量を示した (Tnm-02, $0.45 \text{ wt}\%$; NT19, $0.42 \text{ wt}\%$; NH25, $0.61 \text{ wt}\%$)。

1-4) 仙台湾沿岸地域 (Sampling points: 99-133)

全窒素、全有機態炭素、全硫黄含有量はそれぞれ $0.01\text{--}0.27 \text{ wt}\%$, $0.07\text{--}4.87 \text{ wt}\%$, $0.01\text{--}1.24 \text{ wt}\%$ であった (図 2, 表 1)。仙台湾沿岸地域における全硫黄含有量の平均値は $0.13 \text{ wt}\%$ ($n = 35$) を示し、3 試料のみ比較的高い硫黄含有量を示した (NH17B, $1.24 \text{ wt}\%$; NH15, $0.61 \text{ wt}\%$; NH8B, $0.56 \text{ wt}\%$)。

図 2 岩手沿岸，気仙沼，南三陸および石巻，仙台港地域における津波堆積物試料中の a) TN, b) TOC, c) TS 濃度。

Fig. 2 Concentrations of a) TN, b) TOC, and c) TS of modern tsunami deposits in Iwate coast, Kesen-numa, Minamisanriku and Ishinomaki, and Sendai Bay coast.

2) 安定硫黄同位体分析結果

安定硫黄同位体比 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$) は，すべての地域で -29.6% から $+5.0\%$ の範囲をもち，気仙沼地域を除く 3 つの地域で低い $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ 値を示した（平均値で岩手沿岸地域： -16.0% ，南三陸地域： -16.5% ，および仙台港沿岸地域： -20.1% ）。一方，気仙沼地域では平均値で -2.5% の比較的重い値を示し，気仙沼地域で採取した鉱さい試料の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ 値は， -3.31% (NH1) と -0.96% (NT30) であった。

2011 年東北地方太平洋沖地震津波堆積物試料の安定硫黄同位体比は，仙台平野にて採取された試料を対象に Chagué-Goff *et al.* (2012) により報告されている。仙台平野試料の安定硫黄同位体比は，本研究で得られた $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ と比較して非常

に高い（約 $+19 \sim +20\%$ ， $n = 5$ ，Chagué-Goff *et al.*, 2012）。これは，Chagué-Goff *et al.* (2012) が，津波堆積物試料中の硫酸塩を対象とした安定硫黄同位体比分析を行ったため，海水由来の硫酸塩中の安定硫黄同位体比（約 $+20\%$ ）に影響されていることによる。つまり本研究における津波堆積物試料中の硫黄は，海水由来硫酸塩の影響が非常に低い。また，東北地方の沿岸域にはとくに仙台平野において，水田や田畑などの農耕用地が点在している。津波により農地が巻き上げられ，農耕用地土壌由来の硫黄が津波堆積物として堆積することも考えられる。しかしながら水田や田畑に使用される化学合成肥料中の硫黄同位体比は $-4.9 \sim +10.2\%$ と報告されており（Mizota and

Sasaki 1996), この値を比較して, 気仙沼試料を除いた本研究試料の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ は明らかに低い値である。本研究試料中の硫黄の供給源として, 農業用地土壌由来の硫黄による影響は無視できるほど小さいといえる。

3) 津波堆積物に含まれる有機物の起源

津波堆積物中の TOC および TN は, 高い相関を示した ($r = 0.801$, 図 3a)。また, TOC と TN の相関から得られた近似式より, 切片が 0 に非常に近い値 (0.019) をもつことがわかる。この結果から, 本研究における津波堆積物試料に含まれる窒素化合物のほとんどが有機物態の窒素であり, 津波堆積物試料への無機態窒素の混入は無視できるほど少ないことを示している。また TOC と TN の元素比 (TOC/TN 比) は, 0.7 ~ 90.2 と非常に幅広い値をもつが (表 1), TOC/TN の頻度分布から (図 4), TOC/TN 比が 10 ~ 30 の値をもつ試料が全体の 80% 以上を占めることがわかった。湖底および海底堆積物中の TOC/TN 比は, 堆積物に含まれる有機物の起源を推定する際に指標としてよく用いられている (Meyers, 2003)。通常, 湖水や海水など水環境中の植物プランクトン (一次生産者) は, 炭素に対して窒素をより多く含むタンパク質を生体構成物として保持していることから, 植物プランクトンの TOC/TN 比はおおよそ 4 ~ 10 の幅で推移する (Meyers, 2003)。一方, 陸上高等植物は, リグニンやセルロースといった炭素を多く含んだ有機分子で構成されているため, その TOC/TN 比は非常に高い (40 ~ 160, Meyers, 1994)。ゆえに湖底や海洋堆積物中の TOC/TN 比から, 湖内・海洋起源有機物 (自生性有機物) と陸起源有機物 (外来性有機物) の混合割合を見積もることができる (Perdue and Koprivnjak, 2007)。本研究によって得られた, 津波堆積物試料の比較的高い TOC/TN 比 (10 ~ 30) から, 津波堆積物中には陸起源有機物が含まれていることが予想される。岩手県大槌湾および仙台平野における海洋底の表層堆積物中の TOC/TN 比は, それぞれ 8.5 ~ 18.6 (平均値で 13.8 ± 3.3 ; 和田ほか, 1984; Wada *et al.*, 1987) および約 8 ~ 12 (Saito *et al.*, 1989; Ikehara *et al.*,

図 3 津波堆積物試料の a) TN および TOC 濃度の相関図, b) TS および TOC 濃度の相関図。

Fig. 3 Correlations between a) TN and TOC concentrations, and b) TS and TOC concentrations of tsunami deposits.

2014) であると報告されており, これらの値は陸起源有機物の寄与を示している。つまり東北沖太平洋沿岸の海洋堆積物は, 河川経由にて沿岸域へと運搬された陸起源有機物の寄与があるといえる。実際, 和田ほか (1984) は大槌湾および大槌湾への流入河川 (大槌川, 小槌川, 鵜住居川) の表層堆積物中の TOC, TN 含有量, およびこれらの安定同位体比分析を行い, 大槌湾表層堆積物中の有機物には, 陸起源有機物が約 30% 以上含まれてい

図 4 津波堆積物試料の TOC/TN 比の頻度分布。
Fig. 4 Frequency distribution of TOC/TN atomic ratio in tsunami deposits.

ることを報告している。

堆積物中の有機物は、堆積後の続成作用により分解を受ける。その際に陸起源有機物であるリグニンやセルロースより、窒素を含むタンパク質が優先的に分解されるため、堆積物中の有機態窒素が有機態炭素に比べ優先的に無機化を受ける。これにより、堆積物中の TOC/TN 比の鉛直分布は深度方向に対して増加傾向を示す (Saito *et al.*, 1989)。つまり、津波堆積物中の比較的高い TOC/TN 比 (約 20 ~ 30) は、津波による巻き上げ時において海洋底の表層堆積物がより深部まで巻き上げられた、あるいは陸地へ輸送された後に起きた続成作用により、その値を増加させたと考えられる。よって、TOC/TN 比が 10 ~ 30 の値をもつ津波堆積物試料に含まれる有機物の起源は、海洋底の表層に堆積した有機物 (河川からの陸起源有機物と海洋表層で生産された自生性有機物の混合) であるといえる。この結果は、河川を經由して陸域から海洋沿岸へいったん運ばれた有機物が、津波によって再度、海底から陸域へと運搬される物質輸送が生じていることを示している。

4) 津波による海洋表層堆積物の輸送

津波堆積物中の硫黄含有量 (TS) は、気仙沼地

域を除いて、全有機態炭素量 (TOC) とおおむね正の関係をもつ (図 3b)。この関係は、硫酸還元バクテリア (Sulfate reducing bacteria: SRB) の活動による有機物分解と硫化物生成で説明できる。海洋堆積物中において還元環境が進行すると、硫酸還元バクテリアによる有機物分解が行われる。その際、電子受容体として間隙水中の硫酸イオン (SO_4^{2-}) が利用され、下記の反応式に従い硫化水素 (H_2S) を発生し、最終的に環境中の Fe^{2+} と反応し黄鉄鉱 (Pyrite: FeS_2) として堆積物中に留まる。

海水中、および海洋堆積物表層の間隙水中には、硫酸イオン (SO_4^{2-}) が豊富に存在し、かつ Fe も堆積物中に十分に含まれているため、硫酸還元バクテリアの活動を規定しているのは堆積物表層に降り積もる有機物 ($\text{CH}_2\text{O} - \text{R}$) である。気仙沼地域以外の津波堆積物試料の TOC と TS の正の関係性は、堆積物中の TS (黄鉄鉱) の蓄積が TOC (有機物) に律速されていることを表しているといえ、気仙沼地域以外の津波堆積物中の硫黄は、海洋堆積物中で起きた硫酸還元により生成された黄鉄鉱であると考えられる。

硫酸還元バクテリアにより SO_4^{2-} が H_2S へ還元される際、高い同位体分別が起き、軽い硫黄同位体 (^{32}S) をもった SO_4^{2-} が H_2S へとより多く還元される (最大約 -40%, Habicht and Canfield 1997)。一方、 H_2S から FeS_2 が形成される際の同位体分別は非常に小さいため、軽い硫黄同位体比をもった FeS_2 が堆積物中に保存される。ゆえに、気仙沼地域以外の津波堆積物試料中の軽い硫黄同位体比 (-29.6 ~ -11.3‰, 図 5) は、これらの試料中の硫黄が、海洋堆積物中での還元環境下における硫酸還元バクテリアの活動により

生成した黄鉄鉱で形成されていることを強く示す。TOC/TN 比で得られた結果と同様に TS および $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ の結果からも、本研究にて採取された津波堆積物試料は、津波により陸域へと運搬された海底表層堆積物で構成されていることを強く示している。さらにこの結果は、歴史津波堆積物を判別する際に、海岸からの砂ではなくさらに粒度の細かい海洋底泥が重要であるとする、Goto *et al.* (2011) の指摘を支持している。

5) 硫黄同位体比が示す気仙沼地域津波堆積物中のヒ素の起源

気仙沼地域の津波堆積物中の TS は、TOC に対して非常に高い値（最大約 1.4 wt%）を示し（図 3b）、TOC に対して TS の濃縮が起きている。堆積物中の硫酸還元細菌の活動が非常に活発化すると、有機物（TOC）に対して硫黄（TS）の濃縮が発生する場合がある。しかしながらこの地域における $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ は、高い値（ $-3.31 \sim -0.63\%$ ）を示し、硫酸還元による硫黄濃縮は考えにくい。津波堆積物試料の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ より、気仙沼本吉町地域における津波堆積物試料中の硫黄の供給源は、他の地域における津波堆積物試料の硫黄供給源とは異なることがわかった。

気仙沼市本吉町地域の津波堆積物試料中の元素濃度の異常値は、ヒ素（As）においても報告されている（土屋ほか, 2012）。気仙沼市および本吉郡においては、ヒ素を含有する金属鉱床が密集しており（図 1）、かねてから鉱床由来のヒ素汚染リスクが懸念されていた（土屋ほか, 2007）。土屋ほか（2012）は、気仙沼本吉町地域の津波堆積物試料中にヒ素（As）が非常に高濃度（227 ~ 2563 ppm）含まれていること、また、公定法（環境省告示第 18 号試験土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件）に順次した水溶出試験において、気仙沼地域で採取された津波堆積物試料中のヒ素溶出量が環境基準値（10 $\mu\text{g/l}$ ）を大幅に超過する（51 ~ 391 $\mu\text{g/l}$ ）ことを明らかにした。ゆえに、津波堆積物試料中のヒ素の供給源を明らかにすることは、ヒ素の環境汚染リスクを正確に評価するために非常に重要である。

気仙沼地域における津波堆積物試料中の全硫黄量（TS）とヒ素濃度は、その他の地域と比べて非

常に高い相関を示した（ $r^2 = 0.918$ ，図 6）。これは気仙沼地域にて採取された津波堆積物中のヒ素と硫黄の起源が等しいことを示している。気仙沼本吉町地域の津波堆積物試料、および鉱さい試料の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ は、気仙沼地域以外で採取された津波堆積物試料と比較して明らかに異なり、重い値をもつ（図 5，表 1）。気仙沼市本吉町には、熱水性金鉱床である大谷鉱山が開発され、その金鉱床中には多くの硫化鉱物（黄鉄鉱，黄銅鉱や硫砒鉄鉱など）が随伴される（山田ほか, 2010）。東北地方北部の金鉱床から採取された硫化鉱物中の安定硫黄同位体比は、 $+2.5 \sim +6.9\%$ であり（山田ほか, 2010）、気仙沼地域における津波堆積物試料中の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ と近い値を示す。これらの結果は、気仙沼本吉町地域において採取された津波堆積物試料中の硫黄が、熱水由来の硫化物であることを示している。以上のことから、気仙沼地域にて採取された津波堆積物中の硫黄、および硫黄と密接に関係して硫化鉱物を構成するヒ素は、鉱山跡地の堆積場から流出した鉱さいに起源をもつと結論できる。

IV. 結 論

津波堆積物の元素分析および安定硫黄同位体比（ $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ ）分析より、2011 年東北地方太平洋沖地震によって岩手県、宮城県、福島県沿岸に打ち上げられた津波堆積物の供給源を明らかにした。津波堆積物試料の TOC/TN 比は、ほとんどの試料において 10-30 の間の値を示し、 $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ は、気仙沼地域以外の試料で非常に軽い値（ -26.9 から -11.3% ）を示した。これらの結果から、一部の津波堆積物試料の供給源は海洋底の表層堆積物であり、さらに河川経路にて陸から海へ輸送され海洋底表層に堆積した有機物が、津波によって再度、海洋底表層から陸へと再運搬される物質輸送が起きていることが示唆された。気仙沼本吉町地域にて採取された津波堆積物試料の TS はヒ素含有量と非常に高い相関（ $r = 0.958$ ）を示し、本地域における津波堆積物試料中の硫黄とヒ素が同一の起源をもつことがわかった。さらに気仙沼本吉町地域の津波堆積物試料の $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ 分析より、その起源が熱水由来の硫化物である可能性が非常に高

図 5 津波堆積物試料中の安定硫黄同位体比分布。灰色で記した帯は仙台平野現世津波堆積物試料の安定硫黄同位体比 (Chagué-Goff *et al.*, 2012) および東北地方鉱山にて採取された硫化物中の硫黄同位体比を示す (山田ほか, 2010)。

Fig. 5 Stable sulfur isotope ratios of tsunami deposits samples. Gray lines indicate stable sulfur isotope ratios of sulfate in the modern tsunami sediments at Sendai Plain (Chagué-Goff *et al.*, 2012) and of sulfide in metallic ore deposits in Tohoku district (Yamada *et al.*, 2010).

図 6 津波堆積物試料の TS および As 濃度の相関図。

Fig. 6 Correlation between TS and As concentration of tsunami deposits.

いことがわかった。よって、気仙沼本吉地域の津波堆積物中に含まれる硫黄、およびヒ素は鉱山活動に伴って海にもたらされ、津波とともに陸上へ再度打ち上げられた可能性が示唆される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、津波堆積物試料採取において被災地域における周辺住民の方々、復興に携わる多くの方々から協力をいただき、深く感謝申し上げます。慶應義塾大学の故園直建名誉教授には本特集号へ寄稿する機会を与えていただいた。査読者として貴重なコメントをいただいた産業総合研究所の藤原 治

博士、および 1 名の匿名査読者に深く感謝する。本研究は、JST/RISTEX 研究開発成果実装支援プログラム「津波堆積物の地球化学的判別による沿岸地域リスク評価と社会的影響の予測」(実装責任者 土屋範芳)、および JSPS 科研費(挑戦的萌芽研究 No.25630410 研究代表者 渡邊隆広)の助成を受けた。

文 献

- Chagué-Goff, C., Andrew, A., Szczucinski, W., Goff, J. and Nishimura, Y. (2012): Geochemical signatures up to the maximum inundation of the 2011 Tohoku-oki tsunami: Implications for the 869 AD Jogan and other palaeotsunamis. *Sedimentary Geology*, **282**, 65–77.
- 藤原 治 (2007): 地震津波堆積物: 最近 20 年間のおもな進展と残された課題. 第四紀研究, **46**, 451–462. [Fujiwara, O. (2007): Seismic tsunami deposits: Major advances over the last 20 years and remaining problems. *Quaternary Research*, **46**, 451–462. (in Japanese with English abstract)]
- 藤原 治・佐藤善輝・小野映介・海津正倫 (2013): 陸上掘削試料による津波堆積物の解析—浜名湖東岸六間川低地にみられる 3400 年前の津波堆積物を例にして—. 地学雑誌, **122**, 308–322. [Fujiwara, O., Sato, Y., Ono, E. and Umitsu, M. (2013): Researches on tsunami deposits using sediment cores: 3.4ka tsunami deposit in the Rokken-gawa Lowland near Lake Hamana, Pacific coast of central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **122**, 308–322. (in Japanese with English abstract)]
- Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffe, B., Nishimura, Y., Richmond, B., Sugawara, D., Szczucinski, W., Tappin, D.R., Witter, R.C. and Yulianto, E. (2011): New insights of tsunami hazard from

- the 2011 Tohoku-oki event. *Marine Geology*, **290**, 46–50.
- Habicht, K.S. and Canfield, D.E. (1997): Sulfur isotope fractionation during bacterial sulfate reduction in organic-rich sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **61**, 5351–5361.
- 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*, **349**, 91–96.
- Meyers, P.A. (1994): Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, **114**, 289–302.
- Meyers, P.A. (2003): Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, **34**, 261–289.
- Minoura, K. and Nakaya, S. (1991): Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: Some examples from northeastern Japan. *Journal of Geology*, **99**, 265–287.
- Mizota, C. and Sasaki, A. (1996): Sulfur isotope composition of soils and fertilizers: Differences between Northern and Southern hemispheres. *Geoderma*, **71**, 77–93.
- Perdue, E.M. and Koprivnjak, J.F. (2007): Using the C/N ratio to estimate terrigenous inputs of organic matter to aquatic environments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **73**, 65–72.
- Saito, Y., Nishimura, A. and Matsumoto, E. (1989): Transgressive sand sheet covering the shelf and upper slope off Sendai North east Japan. *Marine Geology*, **89**, 245–258.
- 澤井祐紀・岡村行信・穴倉正展・松浦旅人・Than Tin Aung・小松原純子・藤井雄士郎 (2006): 仙台平野の堆積物に記録された歴史時代の巨大津波—1611 年慶長津波と 869 年貞観津波の浸水域—。地質ニュース, **624**, 36–41. [Sawai, Y., Okamura, Y., Shishikura, M., Matsuura, T., Aung, T.T., Komatsubara, J. and Fujii, Y. (2006): Historical tsunamis recorded in deposits beneath Sendai Plain: Inundation areas of the A.D. 1611 Keicho and the A.D. 869 Jogan tsunamis. *Chishitsu News*, **624**, 36–41. (in Japanese)]
- 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治 (2011): 地質学的データをを用いた西暦 869 年貞観地震津波の復元について。自然災害科学, **29**, 501–516. [Sugawara, D., Imamura, F., Matsumoto, H., Goto, K. and Minoura, K. (2011): Reconstruction of the AD 869 Jogan earthquake induced tsunami by using the geological data. *Journal of Japanese Society of Natural Disaster Science*, **29**, 501–516. (in Japanese with English abstract)]
- 土屋範芳・狩野真吾・小川泰正・山田亮一 (2007): 地圏における重金属類の分布と岩石からの移行プロセスにおける化学形態に関する基礎的検討。地学雑誌, **116**, 864–876. [Tsuchiya, N., Kano, S., Ogawa, Y. and Yamada, R. (2007): Fundamental study on distribution of heavy metals in the geosphere and their chemical species during transport processes from rocks. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **116**, 864–876. (in Japanese with English abstract)]
- 土屋範芳・井上千弘・山田亮一・山崎慎一・平野伸夫・岡本 敦・小川泰正・渡邊隆広・奈良郁子・渡邊則昭・東北地方津波堆積物研究グループ (2012): 東北地方太平洋沖地震による岩手, 宮城, 福島県沿岸域の津波堆積物のヒ素に関するリスク評価。地質学雑誌, **118**, 419–430. [Tsuchiya, N., Inoue, C., Yamada, R., Yamasaki, S., Hirano, N., Okamoto, A., Ogawa, Y., Watanabe, T., Nara, F.W., Watanabe, N. and Tohoku Tsunami Sediment Research Group (2012): Risk assessments of Arsenic in tsunami sediments from Iwate, Miyagi and Fukushima Prefectures, Northeast Japan, by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Journal of the Geological Society of Japan*, **118**, 419–430. (in Japanese with English abstract)]
- 和田英太郎・水谷 広・柄沢享子・蒲谷裕子・南川雅男・米本昌平・辻 堯 (1984): 大槌水系における有機物の挙動: 炭素・窒素同位体比からの評価。地球化学, **18**, 89–98. [Wada, E., Mizutani, H., Karasawa, K., Kabaya, Y., Minagawa, M., Yonemoto, S. and Tsuji, T. (1984): Carbon and nitrogen isotopic composition as tracers of transport of organic matter along the Otsuchi watershed. *Chikyu Kagaku*, **18**, 89–98. (in Japanese with English abstract)]
- Wada, E., Minagawa, M., Mizutani, H., Tsuji, T., Imaizumi, R. and Karasawa, K. (1987): Biogeochemical studies on the transport of organic matter along the Otsuchi River watershed, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **25**, 321–336.
- 渡邊隆広・細田憲弘・土屋範芳・中村俊夫・平野伸夫・岡本 敦・奈良郁子・東北大学歴史津波調査グループ (2014): 仙台平野における歴史津波堆積物の放射性炭素年代測定—連続土壌堆積物試料 HS シリーズの堆積年代 (予察的分析)—。地学雑誌, **123**, 904–922. [Watanabe, T., Hosoda, N., Tsuchiya, N., Nakamura, T., Hirano, N., Okamoto, A., Nara F.W. and Tohoku University Tsunami Sediment Research Group (2014): Radiocarbon dating of historical tsunami sediments from the Sendai plain, northeastern Japan: Preliminary age model for the HS continuous soil sediment series. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **123**, 904–922. (in Japanese with English abstract)]
- 山田亮一・吉田武義・掛川 武・奈良郁子・小川泰正 (2010): 東北地方北部の金属鉱床に随伴する高インジウム鉱石の形成条件。資源地質, **60**, 153–164. [Yamada, R., Yoshida, T., Kakegawa, T., Nara, F. and Ogawa, Y. (2010): Several constraints of indium enrichment associated with base-metal, deposits in the vicinity of northern Tohoku district. *Resource Geology*, **60**, 153–164. (in Japanese with English abstract)]