

Szczuciński, W., Kokociński, M., Rzeszewski, M., Chague-Goff, C., Cachao, 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.

珪藻およびナノリスと粒度分布の解析による 2011 年東北沖津波によって生じた仙台平野への堆積物の堆積物供給源と堆積過程

Abstract

2011 年 3 月 11 日に発生した東北沖津波は、仙台平野の低地の内陸 5 km 以上まで浸水し、そのほとんどの地域に、砂と泥の堆積物をもたらした。堆積物の供給源を明らかにし、津波堆積物の堆積過程を解釈するために、海岸線に対して垂直な横断線に沿って津波堆積物、下位の土壌、海岸から試料を採取して、粒度分布及び珪藻群集とナノリスの解析を行った。内陸に向かって細粒化する津波堆積物は、海岸線から 2 km 以内に堆積したものは、度の低いものから中程度の中粒砂から粗粒砂からなり、より内陸部に堆積した堆積物は、度がかかなり低いから低い泥からなる。より明確に記せば、砂質堆積物内部では粗粒砂から中粒砂へとわずかに細かくなっており、泥質津波堆積物中では粗粒と極粗粒なシルトの粒子の寄与が増大した。津波堆積物は垂直方向の変化において、上方細粒化傾向と、上方粗粒化上位で細粒化する傾向を持つことを表している。砂浜と、海岸線から 1 km の範囲に堆積した津波堆積物と土壌において珪藻は、ほんの少数しか見つからなかった。一方、より内陸部の津波堆積物には豊富に珪藻が含まれていた。土壌と津波堆積物に含まれる珪藻群集は、類似しており、淡水性-汽水性の典型的な種が優位を占めていたが、典型的な海洋性の珪藻は産出しなかった。ナノリスは、ほんのわずかな標本を除いて、検討した堆積物には、ほとんど見られなかった。我々のデータは、津波によって、海洋堆積物は陸地に全くあるいは、ほんのわずかしかな運ばれていないことを示す。海岸線から 1 km の範囲に堆積した砂質津波堆積物は、そのほとんどが海岸とデューンの侵食によってもたらされた。これらの供給源からの堆積物は、内陸 1-2km では減少し、一方局地的な土壌侵食と貞山運河から巻き上がった堆積物起源の堆積物が増加する。より内陸部では局地的な土壌の侵食は、泥の堆積物の供給源である。津波堆積物は少なくとも 2 回の浸水によって堆積しているようであり、懸濁から堆積した結果、上方細粒化する傾向がつくられた。しかしながら、頻繁な平坦ラミナと C-M 図での配置および共通した上方粗粒化が普通に見られることからベッドロード堆積物は、砂質堆積物では重要である。本研究では、非常に大規模な津波でも海洋堆積物を内陸に運ばないこと、それゆえに沖合起源の堆積物(海洋性珪藻, ナノリス, 海洋堆積物)の仮定に基づいた津波堆積物の多くの一般的で汎適用される指標が限定的に使用されるかもしれないことを明らかにした。

1. Introduction

最近発生した甚大な災害である 2004 年インド洋大津波と 2011 年東北沖津波は想定外のものであり、確認された犠牲者は、それぞれ 18 万人以上と約 1 万 6 千人である。しかしながら、最新の研究によ

って、このようなイベントは予測されているべきはずだったことが明らかになった。なぜならば、これまでにこれらの地域では類似した大きなイベントが起こっていたことを示す地質学的記録が見つかったためである(例えば, Monecke et al., 2008; Satake et al., 2008; Namegaya et al., 2010)。2004年の津波以前は, 1883年に発生したクラカタウ火山性津波を除いて, この地域の海岸線に沿ってインド洋津波が起こったことは知られていなかった。しかし, 地質学的なデータは類似したイベントが500-700年間隔で発生している可能性を示していた(Jankaew et al., 2008; Monecke et al., 2008; Fujino et al., 2009; Prendergast et al., 2012)。しかしながら, 日本では2011年の東北沖津波以前に, その前身となる津波が既に知られていた(Abe et al., 1990; Minoura et al., 2001; Namegaya et al., 2010; Sugawara et al., 2011, in press)。しかし, 最新の調査はこれらの過去のイベントのマグニチュードは過小評価されている可能性が明らかになった(Goto et al., 2011a)。これらの例は, 津波の災害評価の目的とした, イベントのマグニチュードのよりよい理解の供給には, 津波および古津波の正確な同定と解釈が重要であるということである。

津波堆積物は, 供給源に依存し, 大きな変異性をみせる。しかしその土地の堆積相の組み合わせの解釈による複合的なプロキシ(同定判断基準)を用いることで同定できる。いくつかの同定判断基準は, 最新の津波を研究することによって発展している(例えば, Gelfenbaum and Jaffe, 2003; Moore et al., 2006; Pariset et al., 2007; Sawai et al., 2009)が, しかし, より最近の研究では古津波の研究を組み込んだ新しい重要なデータを含んでいる(例えば, Morton et al., 2007; Shiki et al., 2008; Bourgeois, 2009; Chague-Goff, 2010; Peters and Jaffe, 2010; Chague-Goff et al., 2011; Goff et al., 2012)。現在の基準は, 堆積物の分布形態や堆積学的(堆積構造と組織), 物理的(堆積残留磁化率の異方性), 古生物学的(貝, 珪藻, 有孔虫, 花粉, 微化石), 地球化学的, 鉱物学的, 考古学的, 人類学的そして前後関係(付随する環境の応答)の証拠を含む。これらの基準の多くは, 陸へ運ばれる津波堆積物は沖合の物質をかなり含むという仮定に基づいている。古津波堆積物を考える時に, 堆積後の変化あるいは指標となる物の化石化過程の考慮は重要である(Nichol and Kench, 2008; Goff et al., 2012; Szczuciński, 2012; Goto et al., in press-c)。

堆積物粒径の特徴は, 最も共通して報告される津波堆積物の特徴の一つである(例えば, Dawson et al., 1991; Minoura and Nakaya, 1991; Gelfenbaum and Jaffe, 2003; Goff et al., 2004; Moore et al., 2006, 2011; Paris et al., 2007; Higman and Bourgeois, 2008; Morton et al., 2008; Fujino et al., 2010)。津波堆積物は, その土地の堆積環境(土壌, デューン, 砂浜, 浅海)から主に供給されているので, もし堆積物粒径のデータがあれば, 堆積物供給源の解釈が可能となる。津波堆積物の堆積物の粒度分布は, 堆積時の流体力学的状態を反映する(例えば, Gelfenbaum and Jaffe, 2003; Moore et al., 2011)。最も共通して言及されるパラメータは, 内陸および上方への堆積物細粒化で, これは, 流速, 堆積物輸送能力の低下, そして懸濁状態からの堆積を通じての堆積作用変遷に関係する(Dawson and Shi, 2000)。しばしば津波堆積物の中に複数の上方細粒化層があり, これらは, 一般的に津波の流れの中の個々の波に伴って堆積したと考えられる(例えば, Higman and Bourgeois, 2008; Chague-Goff et al., 2012)。しかしながら, このような粒径の傾向がみられない, もしくは上方粗粒化する層およびユニットも報告されている(例えば, Higman and Bourgeois, 2008; Moore et al., 2011)。このような上方粗粒化ユニットはベッドロードの剪断またはトラクションカーペットの堆積に起因すると考えられている(Le Roux and Vargas, 2005; Moore et al., 2011)。粒度特性の変化は,

古津波と津波の堆積プロセスのモデル化の試みにおいて重要なパラメータであり (Jaffe and Gelfenbaum, 2007; Jaffe et al., 2011), その結果的にこれらのデータは, イベントの頻度だけでなく古津波の大きさ決定を助けるために最も重要なパラメータの1つである.

珪藻は, ありふれた藻類で, 様々な環境 (海洋, 汽水, 淡水) で珪質殻を生産し, しばしばよく堆積物中に保存されている (Battarbee, 1986). 珪藻は, 海水環境の指標として大きな価値を持ち, 歴史上の津波や古津波の堆積物の研究で最も一般的に研究されている微化石である (例えば, Hemphill-Haley, 1995, 1996; Dawson et al., 1996; Dawson and Smith, 2000; Sawai, 2002; Witon and Witkowski, 2003; Sawai et al., 2004b, 2008a, 2009; Razzhigaeva et al., 2006; Dawson, 2007; Kokociński et al., 2009; Goff et al., 2010; Chague-Goff et al., 2011, 2012; Winsborough et al., 2012). Goff et al. (2012) によれば, 津波研究のための珪藻群集の最も重要な特徴は, 複数の環境から供給された混合による典型的な種の存在, そして泥質津波堆積物と対照的に, 砂質津波堆積物中に含まれる珪藻の濃度が低いことである. これらの特徴は, 津波堆積物の同定及び堆積物供給源の決定や浸水時に作用した流体力学的な過程に関する解析を助ける (壊れた殻). 重要なことに, 珪藻のデータは, 保存された津波の砂層よりも内陸で外来の種が見つかることで, 古津波の最大浸水限界を特定するのに役立つ情報を伝えている (Hemphill-Haley, 1996). Goto et al. (2011a) は, 珪藻は, 地球化学的なデータと合わせて, 古津波のマグニチュードの良い理解の助けに測り知れないほど貴重であることを示唆している.

今のところ, 石灰質ナノプランクトンや他のナノプランクトンが, 津波堆積物のいくつかの研究で使われている (例えば, Andrade et al., 2003; Paris et al., 2010). ナノリスは, シルトと粘土 (< 63 μm) と同じサイズで, 生物起源の炭酸塩粒子によって構成される異質の形態を持っている. ナノリスは主にハプト微小藻類門に属する海洋性円石藻類であるコッコリスから成り, カルサイト質の複雑な構造物の集合体をつくる (Winter and Siesser, 1994; Billard and Inouye, 2004). コッコリスは, 深海炭酸塩軟泥の主要な構成物の一つである (Baumann et al., 2004; Ziveri et al., 2004). しかしながら, このグループは, 沿岸の堆積物にも見られ, そこでは群体を形成する, より小さいホヤ類のアラゴナイト質骨片もみられる. ナノリスは, 古環境の代替指標及び沿岸堆積物中の海洋トレーサーとして使用されており (Ferreira and Cachão, 2005; Guerreiro et al., 2005; Alday et al., 2006; Drago et al., 2006), そして津波堆積物の有用な堆積物供給源指標となるかもしれない.

本研究では, 2011年3月11日にマグニチュード9.0のメガスラスト地震 (Ozawa et al., 2011) によって引き起こされた, 仙台平野 (Fig. 1a) において 5km 以上も内陸部まで浸水が及んだ津波によってもたらされた堆積物の粒度, 珪藻とナノリスを分析した (The, 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011; Goto et al., in press-a). 本研究の主な目的は, a) 仙台平野における東北沖の遡上した津波堆積物の供給源を確定する, b) 大規模な津波時に発生する堆積過程について新たな洞察を提供する, c) 温帯気候帯において, 粒径, 珪藻およびナノリスの大津波によって生じた堆積物の有用な指標としての有用性の評価である.

2. Study area

仙台平野低地のほとんどは, 完新世の河川と沿岸性堆積物によって構成され, 海岸と平行な砂質堤

防と砂質自然堤防、有機物に富む泥堆積物によって構成された後背湿地が存在する (Sugawara et al., in press). 仙台平野は、5000–4500 年前、2800–1600 年前および 700 年前から現在までに発達した三つの複合的な浜堤による急速な海岸線の前進によって形成された (Matsumoto, 1985). 二つの主要な河川 (名取川と阿武隈川) といくつかの小河川は、平野と沿岸域を形成する堆積物の主要な供給源である (Sawamoto, 2002). 河口に流出した現世の堆積物は、沿岸流によって北方に運搬され、そのため、調査地域の海浜堆積物は主に約 10km 南方に位置する阿武隈川から供給されている (Hattori, 1967; Sawamoto, 2002). 現在の海岸は、平均潮差約 1m で波浪卓越型の海岸に支配されている. 調査地域から沖合海底までは、比較的急勾配であり、海岸から 1km 以内で水深が 20m に達する (Fig. 1b). 海洋堆積物は、沿岸帯 (海浜と外浜) では、全般的に砂質であり、内側陸棚の約 5–30m の深さにかけて主に泥質砂と砂質泥で構成されている (Hattori, 1967; Saito, 1989; Tamura and Masuda, 2004).

調査地域は、仙台平野の中央部に位置する幅 5 km 以上の沿岸地帯で、主に水田耕作のために使われていた (Fig. 1c). 調査地域は、汽水の貞山堀と八剣堀の運河といくつかの水路および堤防が横切っている (Fig. 1c). 調査地域の海側の端は、高さ 3m までの砂丘で、その松林はひどいダメージを被っており、覆われた松林と砂丘は、幅約 150m の浜に接する (Fig. 1c). 津波による浸水は、内陸 4.85 km までおよび (Association of Japanese Geographers, 2011; Chague-Goff et al., this issue-a, b), 識別できる砂質堆積物 (>0.5cm) を海岸から c. 2.8–2.9 km まで残し (Goto et al., 2011a), 薄い泥層は 4.65 km まで及んでいた (Chague-Goff et al., this issue-a, b). 津波の (地表からの) 深さは、海岸線付近では 8m を超え、2.5 km 内陸部では 3m 以下に減少した (Goto et al., 2011a). 津波前面の前進速度は、およそ 4m/s であった (Goto et al., 2011a).

調査地域では、津波堆積物の最も可能性のある堆積物の供給源は、深い海洋環境及び浅い海洋環境、海浜、海岸砂丘、土壌や低地を横断する運河が含まれる. トランセクトに沿って記録された中では、浜辺 (主に海浜面、バームと後浜) で侵食が最も顕著であり、砂丘は海岸林によって覆われており (主に砂丘の前面と陸側の端部)、海岸平野の内陸 2km まで水田や構造物があった (Fig. 2; Richmond et al., this issue; Tappin et al., 本巻). 海浜面は、津波の発生した後、急速に回復し、サンプリング調査の時には既に、津波が起こる以前の海浜の状態に近かった (Richmond et al., 本巻). Goto et al. (2011a, in press-b) は、また土壌の下に埋もれた古い砂質堆積物 (旧海浜や砂丘) が地震時に液状化し、その後、恐らく津波堆積物に組み込まれたことを報告している.

3. Methods

3. 1. サンプリング

現地調査は、津波発生から約 2 ヶ月後の 2011 年 5 月 5 日から 9 日に行われ、4.5km の海岸線に対して直行するトランセクトに沿って行った (Fig. 1). トランセクト (T3) は、海岸を保護する大重量の構造は全く存在しないため、映像記録などの津波に関する追加データを利用した (Goto et al., 2011a). 津波堆積物は、海岸線から内陸に 2.4km までは 50m 間隔で調査し、2.4km からトランセクトの終端までは 100m 間隔で調査した. すべての地点で、津波堆積物を記載し、津波による侵食の兆候を記した (Fig. 2). 肉眼による詳細な観察は、Richmond et al. (本巻) によって示されている. 本研究のために、我々は、トランセクト沿いの 44 の堅穴 (Fig. 1–3) と海浜を横切る短いトランセクトと浸水限界

の周辺の4地点の計9つの地点(Fig. 1c)から採取された試料を使用した。海浜の試料は、表面(最上層2cm)から採取し、そして残りの堅穴では津波堆積物とその下位の土壌をサンプリングした。観察した垂直変化に基づいて0.2cm(薄いマッドキャップ)から数cm, パテナイフを用いて津波堆積物から試料を採取した。海岸から1.24kmの地点3-24では、塩ビ管を堆積物に対して垂直に押し込み、後で実験室において二つに開き、1cmの分解能でサンプリングを行った。

3. 2. 粒度分析

海浜堆積物($N=11$), 津波堆積物の下位にある土壌($N=32$), 津波堆積物($N=118$)の試料を、粒度分析した(Fig. 1)。試料は、有機物を除去するために過酸化水素で処理し、1.4mm($-0.486\ \Phi$)のふるいにかけた。粗粒な($\leq -0.486\ \Phi$)画分は、ほとんどの試料で存在しないか、ごくわずか($<5\%$)であった。より細粒な画分($\geq 0.486\ \Phi$)は、Malvern Mastersizer 2000 Particle Analyserを用いて分析した。粒度の統計的なデータ(平均値, 中央値, 分級, 歪度と尖度)は、対数モーメント法を用いたGRADISTATソフト(Blott and Pye, 2001)によって算出し、得られたデータは、 ϕ スケール単位を用いて、重量%として表示している。

3. 3. 珪藻分析

海浜潮間帯(B1-B3, $N=3$), バーム(B6, $N=1$), 土壌($N=11$)そして津波堆積物($N=39$) (Fig. 1), から採取した 1cm^3 の珪藻をBattarbee (1986)に概説されている以下の方法で処理した後、調べた。蒸留水ですすぐことで、被殻と蓋殻の洗浄を行い、ナフラックスを用いてマウントし永久プレパラートとした。珪藻種は、Krammer and Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, b), Witkowski et al. (2000)とWojtal (2009)を参考に、ノマルスキー型微分干渉顕微鏡下で1000倍の倍率で同定を行った。生態分類(好塩性と生活形)は、Denys (1991), Van Dam et al. (1994)とVos and de Wolf (1988, 1993)に基づく。ほとんどの試料で少なくとも100個の珪藻の殻を同定し、計測した。しかしながら、一部の試料では珪藻の存在量が少ないために、殻の数が少なかった。さらに、試料間で珪藻の数の可変性を評価するために、同じ量の堆積物に対して含まれる珪藻の断片化した殻と全殻を計数した(永久プレパラート上で25面)。殻が4分の3まで残っている破片を1つの殻とみなした。

3. 4. ナノリスの分析

海浜($N=4$), 土壌($N=20$)および津波堆積物($N=72$)から採取された96の試料全てにおいて、ナノリスを調べた。試料は沿岸相に適応させた手法(Ferreira and Cachao, 2003), ランダム沈降法(Flores and Sierro, 1997)に従って調製した。水分を含んだ試料を 50°C のオーブン中で乾燥し、堆積物の種類(砂, 泥)に応じて2~3gの副標本を採取し、ピペットで体積4~5mlをスライド上に載せた。その後、合成バルサムのEntellanを使用してスライド上にカバーガラスを永久的にマウントした。スライドごとに、1250倍の倍率で偏光顕微鏡(Ortholux II-Pol-BK)を介して、3cmの長さの連続した行を観察した。分類法は、Perch-Nielsen (1989)およびBown (1999 and references therein)に従う。

4. Results

4. 1. 堆積物の概略的な記載

堆積物の肉眼での記載は、Richmond et al. (本巻)とGoto et al. (2011a)の一部によって行わ

れており、最も関連性の高い特性を以下に要約する。津波堆積物はサンドシートやマッドドレープを含み厚さがかなり変化し、サンドシートとマッドドレープは、どちらもトランセクトに沿って不連続であった (Fig. 2)。堆積物によって覆われた下位の土壌は、しばしば部分的に侵食されていた (Fig. 2a で中程度から強い侵食のあった地点を参照せよ)。本研究で行われた調査地点のトランセクトで記録された最大の厚さは、海岸林における～28cmであった (地点 3-4, Figs. 2 と 3)。しかし、近い場所でも厚さはかなり変化することが観察された (Richmond et al., 本巻 では、0-60cm である)。津波堆積物の厚さは、不規則ではあるが、概して陸に向かって薄層化する傾向があるものの、10cm よりも厚い堆積物は海岸線から 2km 以内のみに観察された。

堆積物のほとんどは、中粒から粗粒砂と泥によって構成されていた。0.5cm より厚い砂の堆積物は、海岸から 2.8-2.9km まで観察されたが、薄い砂の基底ラミナ (1-2 粒の厚さ) は、ほぼ浸水限界 (Goto et al., 2011a) である内陸 4.5km まで記録された。泥層 (厚さ 1mm-3cm) は、海岸から約 1.4km で確認され内陸 4.65km まで分布する (Chagué-Goff et al., this issue-a; Richmond et al., 本巻)。いくらかの小さな上方細粒化が、より厚い泥層内で観察された。砂質堆積物は、一般的にラミナが発達しており (複数の重鉱物ラミナを持つ, Fig. 2c), 土壌のリップアップクラスト (Fig. 2c) と礫から小さな巨礫サイズのクラスト (その土地の道路, 建造物や補強された砂丘の侵食に由来) を含み、多くの場合は表面にリップルが形成される (Richmond et al., 本巻)。貝殻と貝殻の破片は、堆積物内に稀に見られる。

4. 2. 粒径

海浜の堆積物では、粒径のばらつきはほとんどない変動が明らかになった。海浜の堆積物の分級度は、中程度から良く、中粒砂と粗粒砂によって構成されていた (Figs. 3-5)。これらの粒度分布は、単峰型であり対称 (歪度 -0.33-0.3) そして中間的な尖度 (尖度 2.5-3.6) であった (Fig. 4)。

土壌もしくは津波堆積物の下位の堆積物はかなり多様で、トランセクトに沿って土壌の種類は変化し (Figs. 2c, 3-5), 一般的に内陸に向かって細粒化していた (Figs. 3-4)。海岸林における砂丘を覆う土壌のほとんど (Fig. 1c) は、中粒砂で構成される一方、別の場所の土壌では、泥、泥質砂と砂質泥によって構成されていた。土壌を形成する堆積物の分級度は、非常に悪いか悪く、中粒砂とシルトの粒径の画分が最頻値をとるという双峰分布を示すことが多い (Fig. 4)。土壌試料の粒度分布は、対称からごくわずかに歪曲した対称 (歪度 0.35-2.4) であり、扁平からかなり扁平な尖度 (尖度 1.8-8.6) であった。土壌試料中のわずかに歪曲し、とても急尖的な分布は、主に海岸林で観察された。

津波堆積物は多様で、泥から粗粒砂の範囲まで変化する (Figs. 2, 3 and 5)。しかし、ほとんどの試料は、中粒砂と砂質泥 (非常に粗いシルト画分の平均粒径を有する) に分類された (Fig. 5)。いくつかの砂質津波堆積物は、分級が良かったが、ほとんどの砂質堆積物は、分級が中程度もしくは悪く、泥質堆積物は、常に分級が非常に悪かった (Figs. 2 and 5)。粒度分布は、海岸線から約 1.5km 以内の砂質堆積物と浸水限界付近の泥質堆積物において単峰性であり、トランセクトにおける砂の卓越するセクションと泥の卓越するセクションとの遷移する場所では、二峰性そして三峰性ですらあった (Fig. 4)。粒度分布は粗粒子側への歪と、細粒子側へのかなりの歪み (歪度 -0.68-3.98) まで変化したが、内陸約 2.7km からは、粒度分布が対称型のものだけであった。相対的尖度の観点から、調査した粒度分布は、非常に緩尖から非常に尖度の大きい (尖度 0.4-31 以下) 範囲を示した。非常に尖度の大きい粒度分布は、海岸線の 2.7km 以内のみに観察された。

津波堆積物は一般に、陸側に向かうにつれて細粒化し(Figs. 2c, d, 3, 4), そして海岸線から地点 3-52(内陸 2.68 km)において下層の土壌よりも常に粗粒であった。この海岸線から 2km の陸側方向への細粒化は、主に粗粒砂から中粒砂への粒度分布の最頻値の移動によるものであった(Fig. 4)。しかし、さらなる細粒化は、粗粒シルトおよび超粗粒シルトにおける二番目の最頻値の増加の寄与によるものであった(Fig. 4)。これは、分級度、歪度と尖度の統計的な粒径パラメータに反映されていた。海岸線から 2km 以内の砂質堆積物は、常に非常に分級が良かったが、一方で海岸線からより離れた内陸の堆積物は、分級度が悪いか非常に悪かった(Fig. 2e)。砂質堆積物は、尖度と歪度の面で粒度分布に大きなばらつきを示した。しかしながら、泥質堆積物は、常に対称であり、中間的から突出した分布であった。いくつかの堆積物の断面においては、粒径の垂直変化もあった(Figs. 3, 6)。より細かい間隔(1-2 cm)で堆積物をサンプリングした、地点のほとんどでは、断面上部において上方細粒化が観察され(例えば、地点 3-13, 3-14, 3-24, 3-30, 3-36, 3-44)、下部において上方粗粒化(例えば、地点 3-24, 3-44)が観察されるのが普通である。いくつかの地点では、二回の上方細粒化傾向(例えば、地点 3-16, 3-36)あるいは、上方粗粒化と細粒化傾向が対になったもの(例えば地点 3-24)が観察された(Fig. 3)。詳細な垂直変化は、津波堆積物の厚さが 23cm であった地点 3-24 に関して提示する(Fig. 6)。その堆積物の下位 4cm は上方粗粒化を示し、その上位 5cm は上方細粒化の傾向を示した。このシーケンスは、シーケンスの最上部までの堆積物中にも繰り返された(Fig. 6)。

4. 3. 珪藻群集

海浜、土壌および津波堆積物から、全 198 の珪藻の分類群が同定された(完全な種のリストは、付録 A を参照)。わずかながらだが珪藻蓋殻は、海浜試料と潮間帯で採取された試料からさえも見つかった(Fig. 7)。それらは、淡水から海水-汽水までの様々な生息地(または生活形)を示したが、後者は稀であった(Fig. 7)。同定された種のほとんどは、淡水と汽水に生息する典型的なもので(例えば *Cocconeis placentula* や *Navicula cohnii*)、その他には、汽水性の *Fragilaria brevistriata* と海水汽水性の *Diploneis aestuarii* が含まれていた。

珪藻は、土壌でも比較的豊富であった。ただし砂丘砂に位置する最も海側の地点(3-5 と 3-7)から採取された 2 つの試料を除く。これらの後者の試料は、ほとんど壊れた状態の淡水-汽水と汽水海水に生息する珪藻をごくわずかに含んでいた(Fig. 7)。珪藻群集を検討した地点としては、上記の地点 3-5 と 3-7 の次に海側の地点 3-16 では、珪藻は、土壌中にかなり豊富であり、陸側に向かうにつれてその数はさらに増加し、海岸線から約 3.17km 内陸の地点 3-60 で見つかった珪藻の数は最大であった(Fig. 7)。一般的に、土壌中の珪藻群集はトランセクトに沿って類似しており、淡水-汽水性の種が最も共通して存在していた。珪藻群集は、*Fragilaria elliptica*, *Navicula goeppertiana*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea* そして *Pinnularia subcapitata* が卓越し、それらが珪藻群集全体の 60~70%程度を占めていた(Figs. 7, 8)。他の生息地の珪藻グループは、いずれの試料においても、最大で群集全体の 20%しか占めていなかった(Figs. 7, 8)。地点 3-44(八剣堀運河の支流の間 Fig. 1c)の土壌は例外として記録された。この地点では、主に *Hantzschia amphioxys* (Fig. 9) と *N. palea* によって構成された淡水-汽水性群集が、全体の約 50%を占め、一方で残りは、汽水-淡水性の *N. cohnii* (Fig. 9)からなる。かなり壊れた珪藻の破片は、全ての土壌試料で見つかった(Fig. 9)。

珪藻は、最も海側の地点の津波堆積物中には稀であり、下位の土壌の観察と同様に陸方向に向かって増加した(Fig. 7)。珪藻類の非常に高い値は、汽水が流れる貞山掘運河からすぐ陸側の地点 3-22

の表面の試料で記録された。この試料では、41種が同定され、最も一般的な種は、*F. brevistriata*(淡水性)、*Fragilaria construens*, *F. elliptica*, *Navicula placentula*(全て淡水-汽水性)そして *Nitzschia constricta* (汽水性)であった(Fig. 8)。津波堆積物中の珪藻の数は、垂直変化を示した。一般的な特徴は、津波堆積物の最上部の珪藻類の高い値であった(Fig. 7)。ほとんどの津波堆積物の試料では、壊れた珪藻の数は、無傷の珪藻の数を上回っていた(Figs. 7, 9)。

淡水-汽水性珪藻は、津波堆積物で優勢であり、40%~75%を占めていた(Figs. 7, 8)。最も一般的な種は、*F. construens*, *F. elliptica*, *Fragilaria* sp., *N. placentula*, *N. amphibia*, *Nitzschia microcephala*, *N. palea* そして *P. subcapitata* であった。汽水-淡水性の珪藻が優勢な試料は、ただ一つで地点3-16の表面の試料で、*Navicula gregaria* という単一種が全体のほぼ70%を占めた(珪藻の存在量が低い試料を除いて)。他の試料では、汽水-淡水性の珪藻は、全体の30%未満含であり、このグループの中で最も一般的な種は、*Navicula clementis*, *N. cohnii* および *N. gregaria* であった。淡水性珪藻類は、集団全体の約5~30%を占め、最も一般的な種は、海岸線から1~2.5kmにかけて採取された試料に、特によく代表として見つかる *F. brevistriata* であった(Fig. 8)。汽水と汽水-海水に生息する珪藻は、一般的でなく、全体の20%未満しか占めていない。その最も一般的な種は、*N. constricta* (汽水性)そして *Fragilaria schulzii*, *Cocconeis scutellum* そして *Diploneis smithii* (汽水-海水性)であった(Fig. 8)。

4. 4. ナノリス類

ほぼすべての試料は、石灰質の微化石もしくはナノプランクトンを含む炭酸カルシウムの生物遺骸は含んでいない。津波堆積物中にのみ、小型の *Gephyrocapsa* と *Emiliana huxleyi* (地点3-11, 深さ2-4 cm), *E. huxleyi* (地点3-48, 深さ2-5 cm), *Gephyrocapsa* cf. *oceanica* (地点3-24, 深さ8-12 cm) などのわずかなコッコリスを含み、おそらく再移動した三つの新第三紀の試料 *Reticulofenestra* spp (地点3-36, 深さ0~0.5cm および3~5cm)が含まれた。

5. Discussion

5. 1. 堆積物の供給源

5. 1. 1. 粒度分布からの洞察

津波堆積物、土壌および海浜の試料(地点3-5)の粒径の比較は、土壌と海岸砂が津波堆積物の主要な供給源であるように見えることを示唆している。これは、Stewart's diagram (Fig. 5b)で示され、最も海側の地点の津波堆積物は、海浜の試料と同様の領域地域に重なり、一方で、残りの津波堆積物のほとんどは、土壌試料にオーバーラップするか、海浜と土壌の試料の間に位置している。粒度分布を比較した場合、津波堆積物が海浜や土壌起源であることはより明確である(Fig. 4)。海浜の砂といくつかの沿岸の土壌で典型的な中粒砂から粗粒砂のモードは、海岸から2km以内の津波堆積物においても同様に優位を占めていた。粗粒シルトから極粗粒シルトのモードは、ほとんどの土壌試料において典型的で、より内陸部の津波堆積物において優勢なモードとなり、土壌と津波堆積物の粒度分布は、非常によく似ていた。

トランセクト線上の仙台湾沖合の海洋堆積物は、泥、極細粒砂そして細粒砂からなると報告されている(Hattori, 1967; Saito, 1989)。粒径だけでは、沖合の泥が陸上の津波堆積物に寄与した可能性

を評価することは困難である。しかし、海洋堆積物で普遍の細粒と極細粒砂(2-4 ϕ)は、私たちのトランセクトに沿った津波堆積物において極めて稀である(Figs. 4, 6)。そのため、有力な堆積物供給源と津波堆積物の粒度分布と統計データの比較は、砂質津波堆積物は、主にトランセクトの海側の海浜と土壌から供給され、さらに、より陸側の泥質堆積物は、おそらくほとんどが土壌の浸食に由来することを示唆している。

5. 1. 2. 珪藻分析からの洞察

珪藻は、様々な環境に普遍に生息するため、珪藻群集は堆積物の供給源指標として役立つ。特定の種は、塩分に対して敏感な(本研究で使用した)だけでなく、水底の種類(植物、砂、泥、岩)や流れの強さ(湖によどんでいる水あるいは川の水)によって特定の生息地を持つ。珪藻の研究は、仙台平野における古津波の調査に適用されているが(例えば、Minoura et al., 2001; Sawai et al., 2008b)、現世の珪藻の分布、特に仙台湾についてほとんど公表されていない。特定の珪藻種の供給源を確認するために、我々は、海浜(潮間帯を含む)と津波堆積物の下位の(砂丘と水田における)土壌から採取した試料を調査した。調査結果を一般的な分類学上の研究(e. g. Krammer and Lange-Bertalot, 1986, 1988, 1991a, b; Witkowski et al., 2000)とともに、地域的な総説の研究(Kosugi, 1988)および深海(Shimada and Hasegawa, 1999)、沿岸域(Sawai et al., 2004a)、水田(Ohtsuka and Fujita, 2001)そして河川(Hirota and Ohtsuka, 2009)の研究事例と比較した。

海浜堆積物(同様に潮間帯からの堆積物)と海岸砂丘に発達した土壌は、純海洋性種を除く全ての生息地に普遍的に見られる珪藻類を極わずかに含んでいた。珪藻の低い存在量と相まって、純海洋性種を除く全ての生息地の珪藻類を含む群集が内陸1kmの津波堆積物に見られた(Fig. 7)ことは、それらが海底以外の、主に海浜と海岸砂丘の侵食した堆積物から供給されたことを示唆している。貞山掘運河の西(内陸1~2km)の津波堆積物に見られる珪藻は比較的多く、下位の土壌(Figs. 7, 8)から見つかった珪藻とほとんど同じ、淡水-汽水に生息する典型的な種であった。しかし、珪藻は津波堆積物中ではるかに多く産出していることから(Fig. 7)、珪藻がその土地の土壌の侵食のみに由来するのではなく、むしろ他に(おそらく貞山掘運河から)由来したことを示す。トランセクト(内陸2km以上)の、最も陸側の部分では、水田土壌と津波堆積物中における、珪藻群集(Figs. 7, 8)、存在量、壊れた珪藻背殻と無傷な珪藻背殻の比率の著しい類似性は、津波堆積物のほとんどは、その土地の土壌の侵食に由来することを明らかに示す。珪藻の種類と生息地(淡水から海水-汽水)の大きなスペクトラムを含む土壌試料は、洪水や灌漑と関係した著しい季節変化を被る環境下では、環境がかなり変化するるので、ある時間での堆積物の珪藻の種数が多くなる。例えば、日本の中部地方の水田では、90以上の珪藻分類群(主に *Nitzschia* 属, *Navicula* 属、そして *Pinnularia* 属に属する)は、一年中観察され、それらのほとんどが淡水性であるのに、汽水性の種もあった(Ohtsuka and Fujita, 2001)。季節性の珪藻種の良い例は、*H. amphioxys* であり、この種は12月から4月にかけて一般的である(Ohtsuka and Fujita, 2001)。この種はまた、いくつかの津波堆積物中でも多量に発見された。さらに、津波堆積物や土壌中には、共通した属(*Navicula* 属, *Nitzschia* 属)とそこの河川に典型的な種(*Gomphonema parvulum*)が含まれていた(Hirota and Ohtsuka, 2009) (Fig. 8)。

一般的な分類に基づく純海水性の珪藻は、津波堆積物中には見つからなかった。Kosugi (1988)によって海洋性として報告された少数の標本が見つかったが、これらは通常、海洋植物に付着し、他の研究では同種は汽水-海水性として同定されている(例えば、*C. scutellum*, *Synedra tabulata*)。

沿岸域にも生息できる汽水-海水性の珪藻類は、ほとんどの試料で見つかったが、比較的少なかった(全ての試料において100個体で20%以下)。しかし、これらの珪藻は、土壌試料においても同様の割合で見られた。(本研究のように)比較的河口に近い沿岸地域では、海洋堆積物は、河川水とともにもたらされた淡水性もしくは汽水性の種の比率が海水性種に対してかなり高いことを強調するのは重要である(e.g. Hirose and Gotoh, 2009)。しかし、海洋性種の欠如や、土壌と津波堆積物との珪藻群集の類似性は、陸上の津波堆積物への沖合堆積物の寄与が無いかもしくは軽微であったことを示唆している。

5. 1. 3. ナノリス分析からの洞察

石灰質の化石は、一般に海洋起源の堆積物の指標となる。津波堆積物試料においてナノリスは、きわめて稀であった。これは、海洋堆積物中のナノリスの存在量の低さまたは、津波による陸への沖合堆積物の限られた運搬のどちらかのためであると考えられる。先行研究(Takayama, 1972)は、仙台湾におけるナノリスの存在量は比較的多いと記しているのので、調査地域における溯上した津波堆積物には海洋堆積物は、大きな寄与をしていないという説明は妥当である。

5. 1. 4. 2011年東北沖津波に関する他の研究からの洞察

同じトランセクトにおける他の研究でも、津波堆積物の起源を議論している。Richmond et al. (本巻)は、海洋堆積物の寄与が限られていた可能性が高い証拠として、津波堆積物中に含まれる貝殻が非常に少ないことを指摘した。さらに、彼らは貞山掘運河のすぐ西方の堆積物から、合弁の薄い殻の二枚貝を見つけ、それらに似た貝殻が東方の堆積物から見つからなかったことから、彼らが運河の堆積物から運ばれたことを示唆した。Pilarczyk et al. (本巻)は津波堆積物中の有孔虫を研究し、海浜や海岸砂丘の堆積物から侵食されていると推測される長期間にわたる地表露出の証拠を有する現世の有孔虫をほんのわずか見つけた。Jagodziński et al. (本巻)では、海浜、土壌と津波堆積物試料において細粒砂の画分中の重鋳物の組成を調べた。彼らは、重鋳物の存在量と組成の類似性を見出し、統計的な分析は、海岸線から1.5km以内に残された津波堆積物のほとんどは、海浜、砂丘やその土地の土壌の侵食によるものであり、より内陸部の津波堆積物は、ほとんどその土地の土壌の侵食に由来することを示した。彼らは、沖合堆積物の重要な寄与の証拠を見つけていない。Chagué-Goff et al. (本巻-a)による地球化学的な研究では、堆積物供給源ではなく海水の指標の存在に焦点を当てている。海水から沈殿した元素(例えばS, Cl)を別にすると津波堆積物とその下位の土壌の化学組成は、だいたい同じであり、これは津波堆積物への陸の堆積物の寄与を反映する。しかし、安定炭素と窒素同位体データとC/N比は、海洋起源の有機物の寄与の可能性を示唆した。

5. 1. 5. 堆積物供給源データのコンパイル

本研究のトランセクトにおける津波堆積物の供給源に関する上記で議論した証拠は、一致しており、私たちは共通の結論を導き出すことができる。海洋堆積物が主な寄与であった証拠はない。津波堆積物のほとんどは、陸上での侵食によってもたらされ、海浜と砂丘の尾根上の土壌で、海岸線から1km以内が最も重要な津波堆積物の供給源である。陸側の1~2kmにおいて、その土地の土壌侵食や貞山掘運河から巻き上がった堆積物といった他の堆積物供給源が優勢になり、これらの供給源の寄与は減少する。地下の砂の液状化と再堆積によるいくらかのマイナーな寄与が起こった可能性があるが、明確な証拠は、本研究では見つからなかった。しかし、仙台平野の他の地域では、これらのプロセスが重要であることが認められた(Goto et al., in press-b)。最後に(2kmより陸側で)最も陸側の津波堆

積物を構成した泥は、主に土壌浸食に由来した。

東北沖津波における堆積物の供給源指標についての情報は、仙台平野のもう1つのトランセクト(本研究の調査地域から約10km北方に位置する)からも報告されており、Takashimizu et al. (本巻)は、津波堆積物中の珪藻群集について報告した。彼らは、海洋堆積物の溯上した津波堆積物への寄与は非常に限定されていると結論づけた。しかし、さらに北の一部の地域では、沖合の海洋堆積物の供給が十分に立証されている。例えば、Tanaka et al. (2012)は、三陸沿岸の陸前高田市(Fig. 1a)の津波堆積物は、介形虫の分析によって、少なくとも水深9mから由来したことがわかった。陸前高田市周辺の海岸は、地形の変化の大きい湾が多数あり、仙台湾の直線的な海岸とは全く異なっている。その地点の海岸では、海岸線から5km以内の傾向が、仙台湾よりも平均2-3倍急である。Goto et al. (本巻)は、貝殻の多産と海岸浸食の観察に基づき、不規則な海岸線によって特徴づけられる寒風沢島(さぶさわじま)(トランセクトT3から北方に約30km)の津波堆積物の堆積物供給源は主に沿岸と沖合である推論した。

海洋堆積物の溯上した津波堆積物への寄与の変化が大きい理由は、津波の伝播の特徴と海底が浅くなり侵食と運搬による堆積物が津波に加わることが関係しているのだろう。後者は、仙台平野において作用し(e.g. Saito, 1989), その可能性の原因は、津波の挙動に局所的な地形の影響である。海岸砂丘沿いの沿岸海底が比較的急勾配なので(Fig. 1b), 土砂を含んだ海水が、陸に浸水する前に反射して沖合へ戻った可能性がある。この仮説は最新の浸水モデリング(Sugawara and Goto, 本巻)によって支持されているように見える。似たような状況が2004年インド洋津波でもスリランカの海岸で観測された。この地点は、津波によって運ばれた堆積物のほとんどが、外浜に堆積し、極少量の海洋堆積物が陸に運ばれた(Goto et al., 2011b)。1993年の北海道津波の堆積物も同様に、主に陸上と外浜から由来していた。一方で、Gelfenbaum and Jaffe (2003)は、パプアニューギニアにおける1998年の津波では、陸上の津波堆積物の砂の2/3が沖浜起源であると推定した。

5. 2. 堆積プロセス

堆積組織(例えば、粒径)や堆積構造は、津波発生時に起きる過程の復元のために使用される(Goff et al., 2012を参照)。波の数、流向(押し波対引き波)、流れの条件の結果生じる様々な堆積過程(浮遊物の沈殿、ベッドロードトラクション)は、津波堆積物の特性に基づいて評価できるだろう(例えば、Dawson et al., 1991; Nanayama and Shigeno, 2006; Paris et al., 2007; Morton et al., 2008; Moore et al., 2011)。

東北沖津波は、第一波が最大であり、研究地域に浸水した(Goto et al., 2011a)。仙台平野からは、津波の潮位記録は得られなかったが、モデリング(Sugawara and Goto, 本巻)は、第一波の後、より小さい波による浸水が何回かあったことを暗示する。ほとんどの調査地点で、単一の堆積氾濫イベントの証拠(単一の上方細粒化もしくは、単一の一對の上方細粒-粗粒化シーケンス)が記録された(Fig. 3)。しかし、いくつかの地点では、少なくとも2つのイベント、2つの上方細粒化または、二対の上方粗粒-細粒化シーケンスが記録された(例えば、地点3-5, 3-16, 3-24, 3-36)。2つ目のイベントは、引き波時に関連するかもしれない。しかし、調査したトランセクトは非常に平坦(Fig. 1b)であり、仙台平野において引き波の指標は観察されなかった(海浜のみ, Richmond et al., 本巻を参照)。ほぼ2カ月間、この地域の大部分に水が溜まっていた証拠があったにもかかわらずである(Chagué-Goff et al., this issue-b)。モデリングの結果も、調査地域にわたって強い引き波はなか

ったことを示唆している (Sugawara and Goto, 本巻). そのため Jaffe et al. (本巻)に結論されたように津波堆積物は、少なくともいくつかの地点で複数の浸水による証拠(例えば, Fig. 6)を含んでいる可能性が最も高い.

最も一般的に報告された津波堆積物中の堆積様式は、懸濁物が沈殿した結果の正級化である(例えば, Dawson and Shi, 2000). このような級化が多くのある場所で見つかること(Fig. 3)と懸濁物の沈殿は粒度分布パラメータに基づくプロットからも推測される(Fig. 5). しかし、これらのプロットは、調査した堆積物の多くがベッドロードとして運搬され堆積したことを示唆している. 例えば, Passega C-M diagram 分析(Passega, 1964; Passega and Byramjee, 1969)は、異なる粒度分析法(ふるい分けの代わりに堆積)による限界はあるが、ほとんどの試料は最終堆積の前に懸濁状態で巻き上げられ、そしてあるいは運搬されたことを明らかにした. 同様の結果は、2004年インド洋津波(Wassmer et al., 2010)と2009年太平洋津波の津波堆積物から得られた(Chague-Goff et al., 2011).

ベッドロード堆積物の輸送と堆積に関する一般的な証拠は、津波堆積物の基底で最も良く見つかる上方粗粒化(または逆級化)(Fig. 6)である. これは、しばしば保存されないが、多くの津波堆積物から報告されている(Le Roux and Vargas, 2005; Higman and Bourgeois, 2008; Naruse et al., 2010; Moore et al., 2011; Szczuciński et al., 印刷中). 逆級化は掃流剪断カーペット(Le Roux and Vargas, 2005)もしくはトラクションカーペット堆積物(Moore et al., 2011)の効果を表すと推測される. 調査した堆積物には、このような上方粗粒化とその上位の細粒化傾向が、例えば地点 3-24 (Fig. 6)で観察され、この地点では、4つの堆積のフェーズがあったと解釈された. すなわち、二回の浸水によるトラクションカーペットの堆積(上方粗粒化)、その後の流速の減衰に伴う上方細粒化である. トラクションカーペットの堆積条件が最初の浸水時だけでなく、次の浸水時にも生じたことを示した. 掃流からの一般的な堆積を支持する論証の一つは、堆積物中の頻繁な葉理の発生である(Richmond et al., 本巻).

堆積の歴史へのいくつかの見識は、Sawai et al. (2009)によって記載されたような珪藻分析から得られるかもしれない. Sawai et al. (2009)は、津波からの堆積時の珪藻群集の分別を見出した. 本研究では、津波堆積物が上方細粒化する複数の地点(例えば、地点 3-5, 3-7, 3-22, 3-44)で、珪藻の殻の数は最上部(表面)試料で最も多かった. これは、珪藻の殻は低い密度なので、懸濁物沈殿の証拠を支持するかもしれない. 珪藻類のただ一つの最大値の存在は、続く浸水イベントの間、懸濁液中に珪藻を維持するのに十分な流れの条件であったか、続く浸水によって珪藻が再懸濁したことを示唆する可能性がある.

津波堆積物における砂の卓越から泥の卓越への明瞭な変化は、海岸から 2.8-2.9km で見つかった. 上述したように、この変化は主要な堆積物の供給源が海側の場所の混合な供給源(海浜, 砂丘, 運河, 土壌)から陸側の場所の土壌への変化に関連していた. 砂の卓越する堆積物の分布は、古津波の解釈に非常に重要なことが Goto et al. (2011a)によって見出されており、いくつかのケースでは、浸水域のたった約 60%でしか砂質の津波堆積物が残っていないので、過去の津波を過小評価することになる(例えば、仙台平野における貞観津波). いくつかの局所的な特徴は、堆積パターンの急速な変化をもたらすことができる. 内陸 2.5km までの地は、ほとんど平坦な場所から内陸に向かって緩やかな傾斜に変化する(Fig. 1b; Goto et al., 2011a). 多くの海岸に平行な堤防道路と堤防水田が、この地域には存在する. これらの一つは内陸 2.9km にある堤防道路であり、周辺地域より 1m 以上も高い

(Richmond et al., 本巻). これらの地形的特徴は, 地上の津波の流れの深さにも同時に作用し, 内陸-2.7km で著しく減少し, より内陸では2m 未満であった(Goto et al., 2011a). しかし, 堆積パターンにおけるこの変化は, Abe et al. (本巻)によって示唆されたような津波の流動特性のより一般的な変化に関係しているかもしれない. 彼らは, 仙台平野も7つのトランセクトを分析し, 浸水が2.5km を超過していながら, (少なくとも内陸 3~4km の間で)泥堆積物浸水限界付近までのほとんどで見つかったにも関わらず, 津波による砂層の陸側の範囲が2.5km 以内であることを見つけた. しかし, 彼らは, この発見に対するシンプルな一般的な説明を見出せず, さらなる数値モデリングと水力学的実験を示唆した.

5. 3. 粒径, 珪藻とナノリスの“津波プロキシ”としての応用

粒径, 珪藻とナノリスは, 有用だ, 津波によって運ばれた堆積物の供給源に依存した指標(“津波プロキシ”)である. 津波/古津波の堆積物のほとんどは, それらはいくつかの海洋堆積物および/または海洋動植物を含むため, 認識されている. 本研究は, 大規模な津波でも, 陸上に沖浜堆積物を運搬しないかもしれないことを示唆している. したがって, このような指標に基づく津波堆積物の同定は問題があるかもしれない.

粒度分布は通常, 津波堆積物の基本的な特性であり, 津波堆積物は, しばしばより細粒な堆積物中に異常なユニットとして見つかる. 今回のケースでこのアプローチは, 浸水した距離のほぼ半分では有効ではない. なぜならば, 最も陸側の津波堆積物は, ほとんどが下位の土壌起源であり, 土壌と非常に類似した粒度分布を有していたためである(Fig. 4).

ナノリスは, 2004年インド洋津波に続いてスマトラ, Lhok Nga からの previous 報告(Paris et al., 2010)とは異なり, 津波堆積物中におけるナノリスが稀なので, 東北沖津波によってもたらされた海洋堆積物の信頼できる指標として使用することはできない.

珪藻は, 堆積学的証拠がない場合にでも, 最大浸水距離の推定に有用であることが見出されている(Hemphill-Haley, 1996). しかし, 珪藻は供給源に依存しており, それゆえに, 海洋堆積物の寄与がわずかな場合には, 海洋性の珪藻が存在しないかもしれない. それにもかかわらず, 海浜堆積物で典型的な珪藻の低い頻度が, より内陸で(内陸 1km)見つかったことから, 珪藻が保持されている間は, 他の指標と組み合わせることで異常な内陸への運搬の指標として使えるかもしれない. このような場合には, 地球化学的指標が最も有益だろう(Chagué-Goff, 2010; Chagué-Goff et al., this issue-a). 珪藻の限界は, 運搬メカニズムの解釈に関係するようである. 本研究で観察された大量の壊れた珪藻は, 堆積物の運搬時のかなりの乱流のあった可能性の証拠として以前に提案された(Dawson, 2007). しかしながら, Hemphill-Haley (1996) と Sawai et al. (2009)は, 古津波および最近の津波による堆積物中の珪藻の背殻が壊れていないと報告している. 本研究における壊れた珪藻の数は, 堆積物供給源(土壌)に比べて多くないので, 津波堆積物中に特徴的な壊れた珪藻は, 津波による運搬中の破損よりもむしろ, 供給源の物質による. 興味深いことに, 珪藻のデータは, 以前の大津波(西暦 869 年貞観津波)が仙台平野の同じ領域にわずかな海洋起源の堆積物しか陸に運ばなかったことを明らかにした.(Minoura et al., 2001; Sawai et al., 2008b).

6. Conclusions

2011年東北沖津波は歴史上最大の津波の一つであり、この津波は5km以上も仙台平野の内陸まで浸水した。津波は、砂が卓越する堆積物を内陸2.9kmまでに残し、泥の堆積物をほぼ浸水限界までもたらしめた。しかし、津波の水深と浅い海底の斜面からの堆積物を含んだ海水の反射の影響によって、海洋堆積物は津波によってほとんど陸には運ばれなかった。結果として、津波堆積物に海洋性の珪藻とナノリスがないか極稀だったので、以前の津波研究で使われているようには、それらの“津波プロキシー”を、堆積物が海洋起源であることを確認するためには使用できなかった。粒度分布の詳細な分析と淡水から汽水性種の卓越する珪藻は、我々に仙台平野における津波堆積物の主要な堆積物供給源を再現することを可能にした。

- 海岸線から1kmまでの領域 — 海浜の砂，砂丘土壌
- 海岸線から1～2kmの領域 — その土地の土壌，海浜と砂丘の砂，貞山掘運河の堆積物
- 内陸へ2～2.5kmの領域 — その土地の土壌

津波堆積物は、複数回の浸水に起因する。懸濁物の沈殿を伴うトラクションカーペットからのベッドロード堆積物は重要な堆積プロセスであった。しかし、堆積様式とその結果として生じた層序のシーケンスは地点ごとにばらつきがあった。

供給源への依存による“津波プロキシー”の制限は、複数の直接的な海水の浸水のプロキシー（地球化学的な塩の指標）も含む複数のプロキシーの複合によるアプローチがいかに重要であるか実証している。

北村晃寿・小倉一輝