



総 説

東北地方太平洋側における古津波堆積物の研究 Paleotsunami research along the Pacific coast of Tohoku region

Abstract

澤井祐紀*

Yuki Sawai*

2017年5月9日受付.

2017年8月17日受理.

* 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門
Research Institute of Earthquake and Volcano
Geology (IEVG), National Institute of Ad-
vanced Industrial Science and Technology
(AIST), Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi,
Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

Corresponding author: Y. Sawai,
yuki.sawai@aist.go.jp

This paper reviews research on paleotsunami deposits in the Tohoku region, which began with investigations of lacustrine deposits along the coastal area of the Japan Sea in the 1980s. Subsequently, deposits of the 1611 Keicho, 1454 Kyotoku, and 869 Jogan tsunamis were identified. There is abundant historical and geological evidence of the 1611 tsunami, although its source is still unclear, with possibilities including offshore of Sanriku coast or the southern Kuril Trench. The other two historical tsunamis (1454 and 869) are modeled as having an offshore Sendai source, with a moment magnitude (M_w) of greater than 8.4–8.6. In addition, tsunami deposits older than the 869 Jogan event have been reported in the Tohoku region, but their sources remain unknown.

Keywords: earthquake, tsunami, tsunami deposit, Tohoku, Japan Trench, Kuril Trench

はじめに

東北地方太平洋沖地震は、我が国における津波堆積物研究のあり方を大きく変えた。中央防災会議の「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」は、想定すべき地震・津波について「これまでの考え方を改め、古文書等の分析、津波堆積物調査、海岸地形等の調査などの科学的知見に基づき想定地震・津波を設定させ、地震学、地質学、考古学、歴史学等の統合的研究を充実させて検討していくべきである」という趣旨を盛り込んだ提言を2011年9月に公表した。この流れに対応するように、事業化された津波堆積物調査が全国各地で行われるようになり、津波浸水履歴を解明する上で重要な資料が多く集まるようになった。こうしたなか、Goff et al. (2012)や澤井(2012)は津波堆積物の観察項目を整理し、これらの報告を踏まえて原子力安全基盤機構(JNES; 現在は原子力規制庁に統合)は2014年2月に津波堆積物調査ハンドブックを公表した(道口ほか, 2014)。また、後藤ほか(2016)は、津波堆積物調査ハンドブックにある項目を整理し、既存の報告(研究報告や査読付き論文)においてどのような分析・議論がなされているかに注目し、カテゴリーに分けて整理した。このような規格化が進む一方で、各地域において明らかにされているデータの量や質は未だ均一とは言えず、それぞれの地域における調査研究がどの程度のレベルに達しているかは、定期的に整理されて津波浸水リスクの評価に反映されるべきである。以上の経緯のなか、このたび、地質学会125周年特集号「日本の古津波」がまとめられることになり、筆者は東北地方太平洋側における古津波堆積物の研究について総括・執筆する機会を得た。

日本において現在まで続いている津波堆積物研究の源流は、東北地方にあると言っても過言ではない。例えば、日本ではじめて現世の津波堆積物が報告されたのは、1960年チリ地震による津波によって形成された東北地方の津波堆積物(今野ほか, 1961)と言われている(澤井, 2012; Saito et al., 2016)。また、東北地方太平洋沖地震の発生で一般に知られるようになった西暦869年貞観地震についても、津波堆積物研究がほとんど行われていなかった1990年代初頭に報告されている(阿部ほか, 1990; Minoura and Nakaya, 1991)。本論では、執筆時(2016年12月)までに同地域で発表された報告(Fig. 1)について整理するとともに、今後取り組むべき点についても述べる。なお、本論で紹介する地質時代は後期完新世(約5000年前以降)から近代とし、後期完新世以前の研究(Fujino et al., 2006)や1960年チリ地震(今野ほか, 1961)のように現世の津波堆積物の研究については割愛する。また、東北地方太平洋沖地震の発生により、多くの研究で津波堆積物の堆積学的・古生物学的・化学的な特徴の記載が行われ(例えば, Takashimizu et al., 2012; Nakamura et al., 2012; Matsumoto et al., 2016a; Tamura et al., 2015a)、分析手法についても進展があった(Chagué-Goff et al., 2012a, b; Shinozaki et al., 2016)が、こうした点については、地質学雑誌の別の特集号にまとめられる予定ということなので、本論ではあえて記述しない。

慶長地震およびそれ以降の津波堆積物

歴史史料および近代の観測記録から、多くの津波が三陸海岸を襲ったことが分かっている。歴史時代から近年における津波を整理した渡辺(1998)によれば、歴史文書には江戸時代から明治時代の間に24回の津波が記録されており、これ

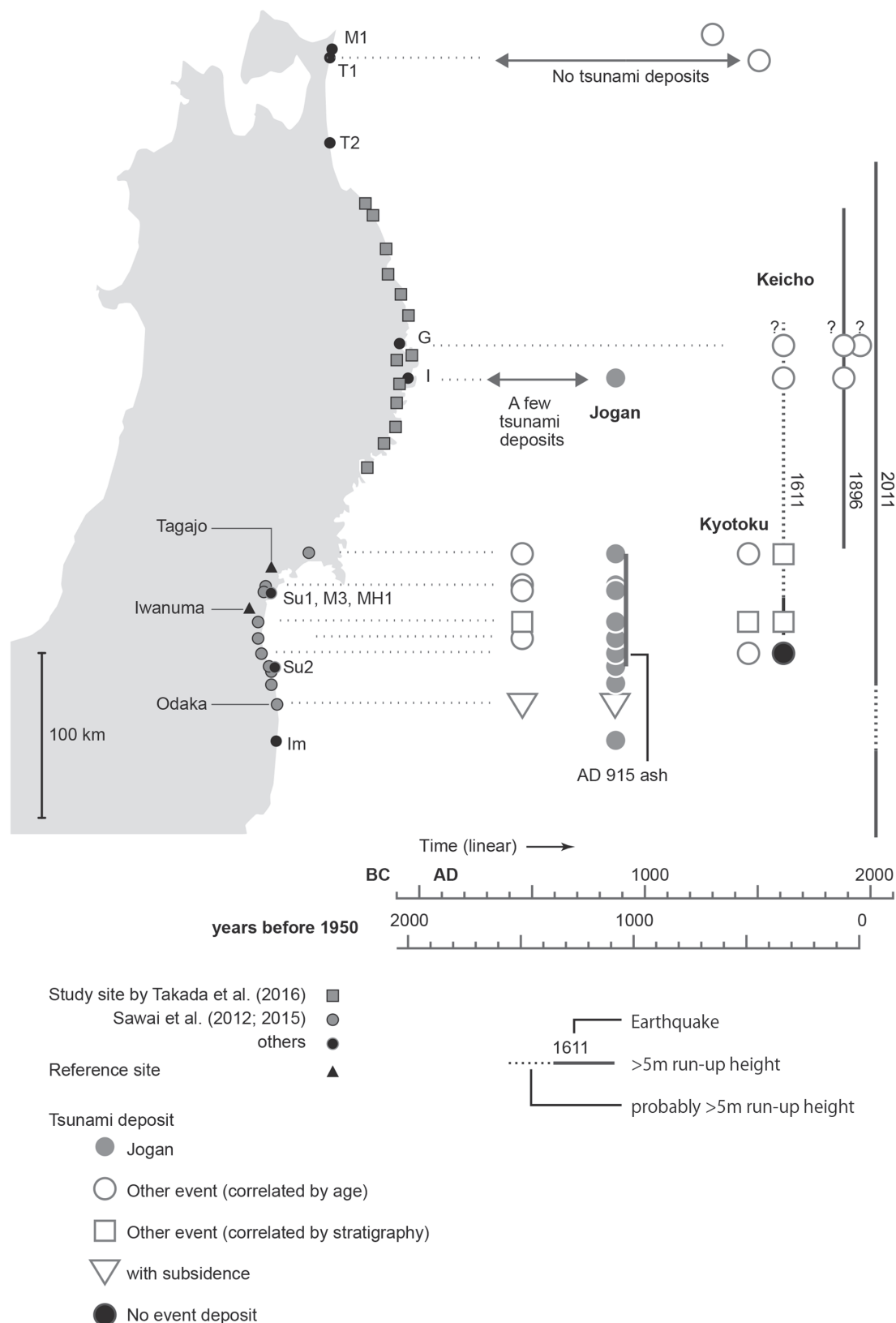


Fig. 1. Map showing research sites in the Tohoku region. M1: Sarugamori (Minoura et al., 2013); T1: Odanosawa (Tanigawa et al., 2014); T2: Misawa (Tanigawa et al., 2014); G: Otobeno in Miyako City (Goto et al., 2015); I: Koyadori (Ishimura and Miyauchi, 2015); Su1: Sendai (Sugawara et al., 2011, 2012); M3: Sendai (Minoura and Nakaya, 1991); MH1: Sendai (Matsumoto et al., 2012); Su2: Soma (Sugawara et al., 2001); Im: Ukedo in Namie Town (Imaizumi et al., 2010). Grey circles and squares show the research sites of Sawai et al. (2012, 2015) and Takada et al. (2016), respectively. The spatial correlation of tsunami deposits in Miyagi and Fukushima prefectures is based on Sawai et al. (2012).

Table 1. Historical tsunamis documented in Japanese literature that occurred during 1603–1912 (Edo and Meiji eras). This is an extract of the comprehensive work by Watanabe (1998). More recent studies, particularly concerning magnitude and rupture area, may not be consistent with this table. The notes are selected translations by Yuki Sawai of Watanabe (1998). More details of the descriptions of the tsunamis and earthquakes are given in the original literature references.

Date of the earthquake		Rupture area	Magnitude (M)	Notes
Gregorian calendar	Japanese calendar			
2nd December 1611	Keicho 16, 10th month, 28th day	Sanriku	7-8	Keicho tsunami
9th September 1616	Genna 2, 7th month, 28th day	Miyagi	7 class	Damage by the tsunami at Sabusawa-jima island
13th April 1677	Empo 5, 3th month, 12th day	Sanriku	7 ³ / ₄ ~8	Ships washed away in Noda-Kuki. There high tides at Miyako. About 1 m tsunami at 6 o'clock in Onahama.
20th October 1687	-	Callao, Peru	7.6	50 cm tsunami at Shiogama, Miyagi
26th January 1700	-	Cascadia, USA	9 class	Tsunami estimated as follows; 3 m at Miyako (Iwate), 2 m at Ootsuchi (Iwate) and Tanabe (Wakayama), and 2 m at Nakaminato (Ibaraki) and Shimizu (Shizuoka).
13th May 1717	Kyoho 2, 4th month, 3rd day	Miyagi	7.5	Paddy and farm damaged by tsunami at Hashikami village
8th July 1730	-	Valparaíso, Chile	8.7	Paddy and farm inundated by tsunami in Oshika Peninsula
25th May 1751	-	Concepción, Chile		Houses inundated by tsunami at Ootsuchi, Oshika and Kesennuma
29th Janaunary 1763	Horeki 12, 12th month, 16th day	Offshore East Aomori	7.6	Ships washed away at Hachinohe and Kuji
20th July 1835	Tempo 6, 6th month, 25th day	Miyagi	7.4	Tsunami ran about 270 m from the sea at Ryori (Iwate). Some damage by tsunami at Nobiru (Miyagi)
7th November 1837	-	southern Chile	8.0	Inundation at Kesennuma, Motoyoshi, and Oshika (Miyagi)
23rd August 1856	Ansei 3, 7th month, 23rd day	Sanriku	7.8-8.0	Tsunami estimated as follows; 3.6-3.9 m at Hakodate, 3 m at Hachinohe, 6 m at Noda, about 4 m at Ootsuchi, about 3 m at Kamaishi, Ryori, and Ryoishi, and 3 m at Obuchi (Miyagi)
21st October 1861	Bunkyu 1, 9th month, 18th day	Miyagi	7.4	Tsunami estimated as 3-4 m and 2-3 m at Ryori and Nobiru, respectively
13th August 1868	-	northern Arica,	8.5	Tsunami observed at Motoyoshi
10th May 1877	-	Iquique, Chile	8.3	3 m tsunami at Kamaishi
15th June 1896	Meiji 29, 6th month, 15th day	Sanriku	6.8	Meiji Sanriku tsunami
20th February 1897	Meiji 30, 2nd month, 20th day	Miyagi	7.4	About 1 m tsunami at Ofunato and Ogatsu
5th August 1897	Meiji 30, 8th month, 5th day	Sanriku	7.7	Tsunami estimated as follows; 1.2 m at Taneichi, 1.5 m at Otsuchi, 1.2 m at Miyako, 1.5 m at Kamaishi, 1.5 m at Ofunato, 2.4 m at Rikuzentakata, and 1.5 m at Shizugawa.
23rd April 1898	Meiji 31, 4th month, 23rd day	Miyagi	7.2	Maximum amplitude of the wave was 20 cm at the tide gauges
25th November 1899	Meiji 32, 11th month, 25th day	Miyagi	7.1	Maximum amplitude of the wave was 32 cm at the tide gauges
9th August 1901	Meiji 34, 8th month, 9th day	Offshore East Aomori	7.2	Maximum amplitude of the wave was 46 cm and 70 cm at the tide gauges in Ayukawa and Hanasaki, respectively
10th August 1901	Meiji 34, 8th month, 10th day	Offshore East Aomori	7.4	Maximum amplitude of the wave was 50 cm and 40 cm at the tide gauges in Ayukawa and
31st January 1906	-	Columbia-Ecuador	8.6	Maximum amplitude of the wave was 36 cm at the tide gauge in Ayukawa
17th August 1906	-	Valparaíso, Chile	8.4	Maximum amplitude of the wave was 18 cm at the tide gauge in Ayukawa

らのうち 1687 年, 1700 年, 1730 年, 1751 年, 1837 年, 1868 年, 1877 年, 1906 年 (2 回) のものは波源が遠隔地にあるいわゆる「遠地津波」とされている (Table 1)。また規模については, 最大のものが 1611 年慶長地震と考えられている (渡辺, 1998)。1611 年慶長地震に関する歴史記録は多く残されており, それらを要約すると以下の通りである。慶長十六年十月二十八日 (1611 年 12 月 2 日) の午前中に三陸沿岸から江戸にかけて数回の地震動があった。津波による被害は, 三陸沿岸から仙台平野・福島県にわたり, 伊達政宗領内で津波による死者は 1783 人, 南部・津軽で人馬死 3000 余, 相馬領でも死者 700 人などとされている (都司・上田, 1995; 渡辺, 1998; 蝦名・今井, 2014; 蝦名・高橋, 2014)。この地

震については, 地震動による被害がないことから, 1896 年明治三陸津波地震と同様の津波地震であるとされている (宇佐美, 1975)。

慶長地震による津波堆積物は, 東北地方の各地で報告されている。例えば, Minoura and Nakaya (1991) は, 仙台平野北部において十和田 a 火山灰層 (To-a; 西暦 915 年) の上位にイベント砂層を報告しており, これを 1611 年慶長地震による津波堆積物と考えた。また, Sawai et al. (2012) も, 石巻および仙台平野において十和田 a 火山灰層の上位に 2 層のイベント堆積物を認め, このうち上位のものを慶長地震, 下位のものを後述の享徳地震 (1454 年) による津波堆積物とした。仙台平野だけでなく, 岩手県各地においても, 慶

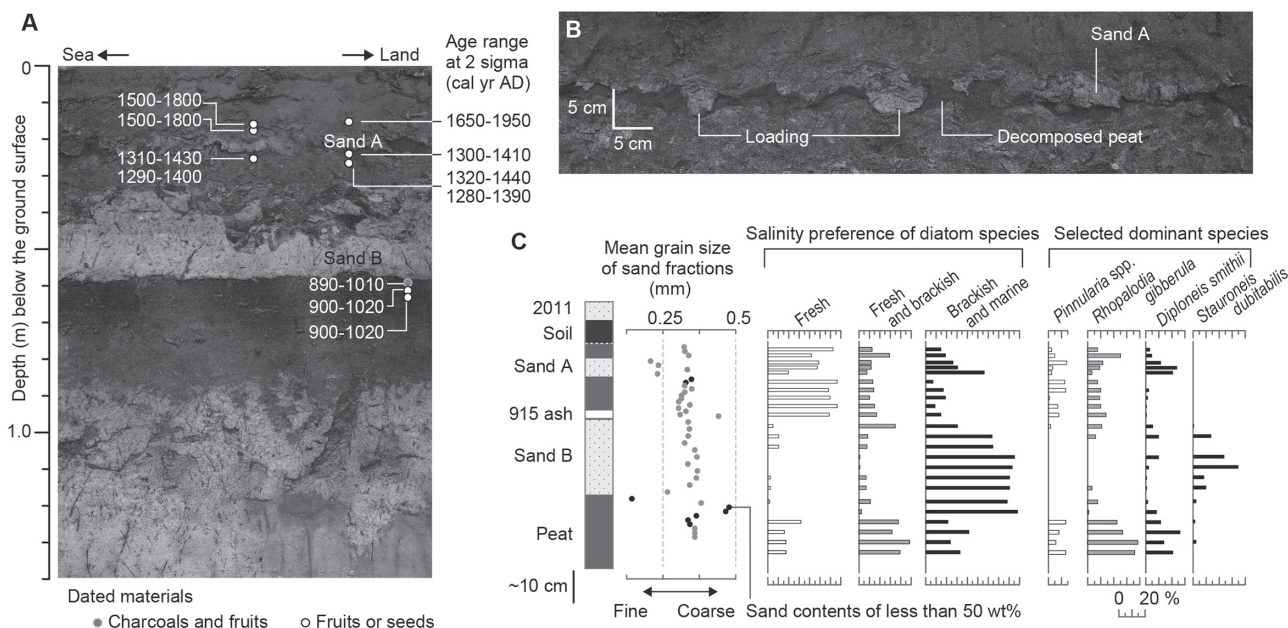


Fig. 2. Stratigraphy of the area in Sendai plain that is ca. 1.5 km from the present-day shoreline. Sands A and B are correlated with the 1454 Keicho and 869 Jogan tsunamis, respectively. Figure modified from Sawai et al. (2015).

長地震あるいは享徳地震に対比される古津波堆積物が同地域に広く分布していることが分かっている (Goto et al., 2015; Ishimura and Miyauchi, 2015; 高田ほか, 2016). このうち, Goto et al. (2015) や Ishimura and Miyauchi (2015) は, 慶長地震のみだけでなく, 慶長地震以降のイベント堆積物を複数検出しており, それらのうち2層を明治三陸地震や昭和三陸地震などの津波堆積物としている. こうした報告に加え, 青森県北部太平洋沿岸の津波堆積物を報告した Tanigawa et al. (2014) は, 16~18 世紀に大規模な津波浸水が起きたことを明らかにしているが, 発生年代の拘束が十分に行われておらず, その砂層が 1611 年慶長地震によるものか, あるいは他の地震によるものかを明らかにできていない.

慶長地震の波源については, 今のところ, 三陸海岸沖に破壊領域を持つ「三陸沖津波地震」と千島海溝南部に破壊領域を持つ「千島海溝連動型地震」の2つの説に集約される. 前者については, 地震動による被害がないことと, 三陸海岸において大きな津波が記録されていることから明治三陸地震のような津波地震を想定している (宇佐美, 1975). 後者については, 17 世紀前半の千島海溝南部において発生した連動型地震 (Nanayama et al., 2003) と慶長地震津波を同一視するものである. この説では, この時期の千島および日本海溝において大きな地震や津波が相次いで発生した地質学的な記録がないことから, 三陸海岸の前面ではなく, 少し離れた千島海溝南部に破壊領域を仮定している (岡村・行谷, 2011). 今のところ, どちらの説においても全ての歴史・地質記録を無理なく説明することはできない. 例えば, 三陸沖の津波地震では, 仙台平野の三本塚において報告されているような大きな浸水 (都司・上田, 1995) は十分に再現できない. また, 三陸

海岸に短軸方向が向いている千島海溝の地震では, 非常に大きな地震を仮定しないと三陸や仙台海岸に大きな津波を発生させることができないし, 17 世紀の連動型地震は東北地方に大きな津波を引き起こさなかったという Satake (2004) と矛盾する. 今後は, 新たな歴史記録の発見や, 信頼性の高い津波堆積物の検出により, 精度の高い断層モデルの構築が期待される.

享徳地震津波の堆積物を対象とした調査

東北地方太平洋沖地震が発生した後, 再評価されたのが西暦 1454 年享徳地震である. 震災以前に享徳地震があまり注目されていなかった第一の理由は, 歴史的な記録が非常に限られているためである. しかしながら, 享徳地震が発生した時期は, もともと地震に関する文書記録が稀少であると指摘されており (小山, 1999), 歴史記録の多少が即ち地震が存在したことの信憑性の優劣には直結しない. 享徳地震の歴史記録については保立 (2011) や行谷・矢田 (2014) に紹介されており, それによれば 1524 年 (大永四年) 頃には成立していた「王代記」に『奥州二津波入テ, 山ノ奥百里入テ, カヘリ二人多取ル』と記述されている. その半月後にあたる十二月十日の「鎌倉大日記」に『大地震』と記録されているのは, 享徳地震の余震と考えられている (保立, 2011).

享徳地震の津波堆積物については, Sawai et al. (2012, 2015) などが報告している (Fig. 2). 宮城県石巻平野および仙台平野の全域で津波堆積物の分布を調べた Sawai et al. (2012) では, 十和田 a 火山灰より上位に見られる津波堆積物のうち一つを 1454 年享徳地震によるものと推定している. また, Sawai et al. (2008) において西暦 1611 年慶長地震に相当するとされた宮城県山元町の津波堆積物を, 1454

年のものであると修正している。さらに, Sawai et al. (2015) では, 仙台平野における 1454 年当時の海岸線の位置を復元したうえで津波浸水シミュレーションを行い, 享徳地震の地震規模が貞観地震に匹敵する可能性を示している。

岩手県沿岸におけるイベント堆積物の分布をまとめた高田ほか(2016)によれば, 慶長地震あるいは享徳地震に対比される古津波堆積物が同地域に広く分布している。しかしながら, その推定年代の誤差が大きいことから, それらが慶長地震によるものか, あるいは享徳地震によるものであるのか各地域において必ずしも決めることができていない(Goto et al., 2015; Ishimura and Miyauchi, 2015; 高田ほか, 2016)。今後はこれらの津波堆積物の堆積年代を精度良く決め, 享徳地震および慶長地震による津波堆積物の広がりを議論することが求められる。

貞観地震津波の堆積物を対象とした調査

東北地方で最も地質学的証拠が報告されているのは, 869 年貞観地震であろう。東北地方太平洋沖地震が発生する以前における貞観地震・津波に関する研究については, 今井ほか(2013)などに詳細にまとめられている。ここでは, 今井ほか(2013)の内容を要約した上に, その後の経過を加筆したものを記述する。

平安時代に編纂された歴史書『日本三代実録』には, 貞観十一年五月二十六日(ユリウス暦 869 年 7 月 9 日)に陸奥国(東北地方)において大きな地震と津波が発生したと記されている。一般に, 貞観地震あるいは貞観津波と呼ばれるものである。日本三代実録によれば「陸奥国で大地震があり, ある者は家が倒れて圧死し, ある者は地割れにのまれて埋まった」とある。さらに「海口が吠え叫び, 雷のような音がして津波が押し寄せ, たちまち城下にまで達した。海から遠く離れていたが, 言い表せないほど広大な土地が水に浸った」とあり, 非常に大きな地震が発生し, 津波による大規模な浸水もあったことがうかがえる。

Sawai et al. (2012) は, 三代実録の記述と近代以降の津波に関する記録を比較し, 東北地方においてそれまで知られていた津波と比べて, 貞観地震が非常に大きかった可能性について言及している。たとえば, 近代から現代において三陸海岸に大きな被害をもたらした 1896 年明治三陸地震では, 宮城県牡鹿半島以北の状況については記録が残っているが, 石巻および仙台平野に関しては詳しい情報が無い。また 1933 年昭和三陸地震について報告した『津浪被害及状況調査報告』(東京大学地震研究所, 1934)では, 仙台平野における浸水の様子や被害の記録が残っているものの, 内陸までの大規模な浸水ではないようである。すなわち, 三代実録にある「言い表せないほど広大な土地が水に浸った」をそのまま受け入れるのであれば, 仙台湾周辺において, 貞観津波は近代の三陸津波よりも非常に大きかったと考えられる。

貞観地震による津波堆積物は, 1990 年代に仙台市において初めて報告された(阿部ほか, 1990; Minoura and Nakaya, 1991)。これらの報告では, その調査地点が仙台平野のごく一部に限られているために, 浸水範囲を平面的に捉える

のが難しかった。また, 津波堆積物の堆積年代が火山灰編年や放射性炭素年代測定値を用いた外挿法によって求められているため, 必ずしも精密なものではなかった。

阿部ほか(1990)および Minoura and Nakaya(1991)からおよそ 10 年後, 東北大学の菅原大助らによって, 貞観地震による津波堆積物が再検討されるようになった(菅原ほか, 2001)。菅原らは, Minoura and Nakaya(1991)の結果を踏まえて, 仙台平野北部や福島県北部相馬市において貞観の津波堆積物を報告した。また, 貞観の津波堆積物の直上に見られる十和田 a 火山灰(To-a; 西暦 915 年)の化学分析値等を示して, その同定を客観的に行った。

菅原らの研究と同時期に, 独立行政法人産業技術総合研究所(現在の国立研究開発法人産業技術総合研究所。以下, 産総研)の研究グループは, 文部科学省の「宮城県沖地震における重点的調査観測(通称, 宮城沖重点)」の一環として宮城県石巻平野および仙台平野の全域, 福島県の沿岸域, 茨城県の沿岸域で津波堆積物の痕跡を探る作業を行った。産総研による貞観地震の研究をまとめた Sawai et al. (2012)によれば, 宮城県から茨城県における 399 地点で掘削調査を行い, なかでも南相馬市小高区では貞観地震に伴う諸現象に関して最も多くの情報を得ている。小高区では, 海岸に平行する測線沿いに合計 43 地点で掘削が行われ, 泥炭層あるいは粘土層に挟まるように 3 層の砂層が検出されている。また放射性炭素年代測定によって砂層の堆積年代が推定され, これらのうち最上位の砂層が貞観地震に対比されている。この貞観地震に対応する砂層は, 現在の海岸線から 1.8 km 離れたところまで確認することができる。また, 貞観に相当する津波堆積物の上下の地層に含まれる珪藻化石を観察し, 地震の前後で大きく環境が変化していることから, 小高周辺において地震性沈降が発生したと推定している(Sawai et al., 2012)。なお, 産総研の報告については, 日本語で執筆された途中経過報告(澤井ほか, 2007, 2008; 穴倉ほか, 2007)が引用されることが多いが, これらのデータの多くは後年に見直され, 堆積物の時代解釈や対比などが訂正された最終版が Sawai et al. (2012)として総括されている。貞観地震に関する文献の引用はこの点に注意されたい。

産総研と同様に, 宮城沖重点の一環として, 東北大学環境地理学の研究グループも三陸海岸や福島県沿岸で古津波堆積物調査を行っている(今泉ほか, 2010)。しかしながら, その堆積年代の推定の誤差が大きいことから, 必ずしも貞観地震の証拠をとらえているとは言い難く, この研究成果を使用する場合には十分な注意が必要である。

2011 年東北地方太平洋沖地震以降, 日本海溝沿いで古津波堆積物の可能性があるイベント層が多く報告され(例えば, Goto et al., 2015; 平川, 2012; 石村ほか, 2015; Ishimura and Miyauchi, 2015; 高田ほか, 2016; 谷川ほか, 2014; Tanigawa et al., 2014), それらの幾つかは貞観地震による津波堆積物に対比されている(平川, 2012; 高田ほか, 2016; 澤井ほか, 2016) (Fig. 3)。こうした報告は, 対象地域における津波・高潮・高波による浸水頻度を評価するという点では有用である。しかしながら, 前段落で述べたようにイベン

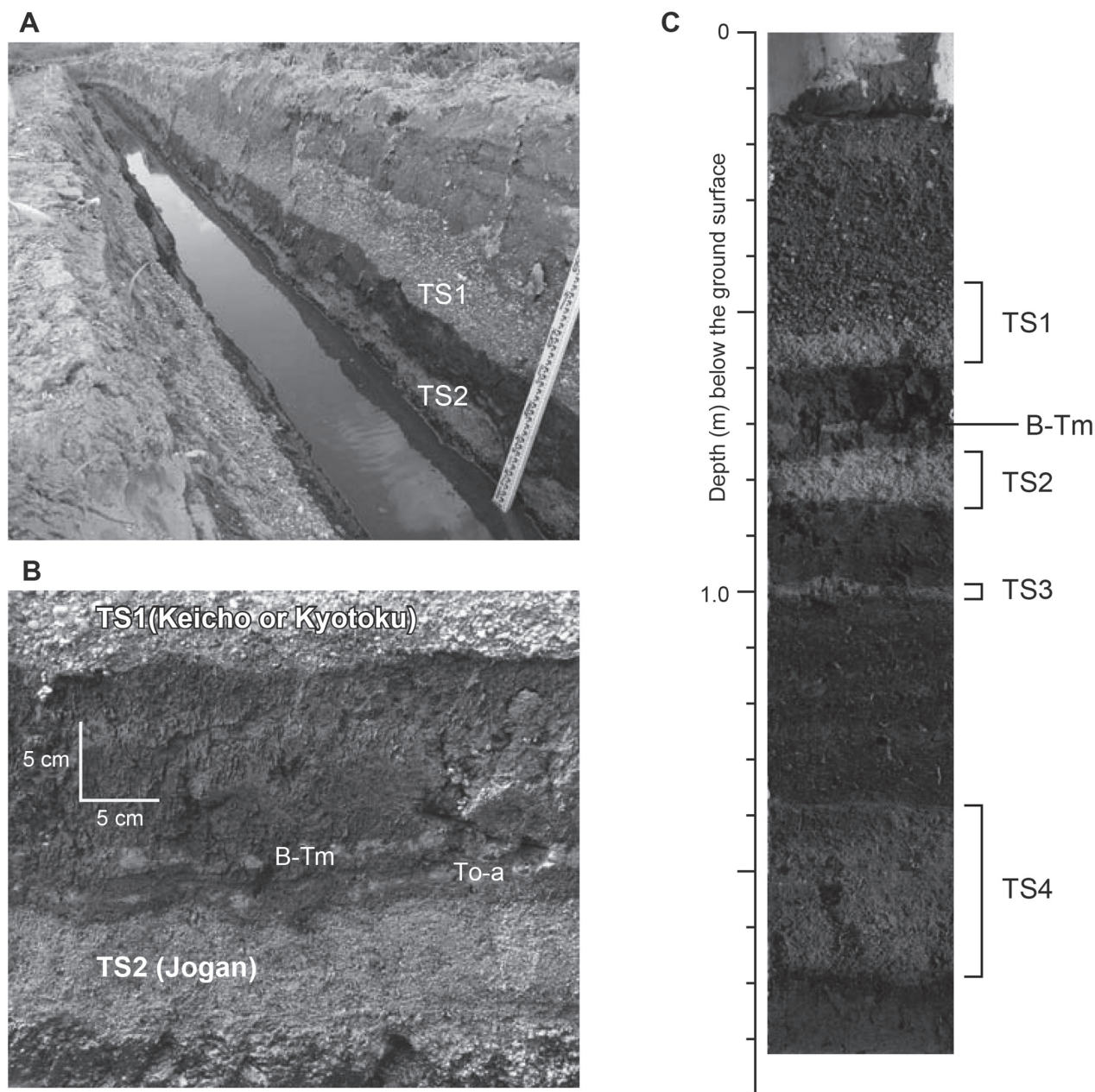


Fig. 3. Tsunami deposits at the Noda site. The uppermost sand layer (TS1) is correlated with the 1611 or 1454 tsunami. The second sand layer (TS2) is correlated with the Jogan tsunami. Figure modified from Takada et al. (2016).

ト年代の推定に問題を抱えている場合があるため、貞観津波の浸水範囲を推定するための証拠としては慎重な取り扱いが必要であろう。

貞観地震の断層モデル(津波の波源)はこれまでにいくつか提案されている。まず渡邊(2000)は、日本三代実録の記述と各地に残る津波の伝承記録等を参考にして、宮城県沖から茨城県北部沖にかけての長さ約 200 km、幅約 50 km の断層(M8.5)を提案した。その後、菅原ほか(2001)や Minoura et al. (2001)では、仙台市北部や相馬市松川浦における津波堆積物の分布を基に断層モデルを提案した。しかし、こうしたモデルでは津波の浸水計算などが行われておらず、歴

史・伝承・地質記録との比較に不確実さが大きく残されていた。

こうした問題点を解決するための定量的な考察が行われたのは、佐竹ほか(2008)が初めてである。佐竹ほか(2008)は 10 種類の断層モデルを検討し、その修正モデルを行谷ほか(2010)および Sawai et al. (2012)が報告しているが、それらは、(1)明治 29 年(1896 年)三陸地震に代表される海溝軸付近の浅部で発生する津波地震型の地震、(2)昭和 8 年(1933 年)三陸地震に代表される海溝軸外側で発生する正断層型の地震、(3)羽鳥(1998)が指摘した仙台湾内の活断層による地震、(4)様々な断層長さ、幅、およびすべり量のプレート間

地震に分類される。

行谷ほか(2010)および Sawai et al.(2012)は、これらの断層モデルから津波の伝搬を計算し、宮城県(石巻平野、仙台平野)および福島県(南相馬市小高地区、浪江町請戸地区)での浸水分布を検討している。そして、計算された浸水分布と津波堆積物の分布とを比較することでモデルの妥当性を検討している。なお、石巻・仙台平野においては、貞観地震当時の海岸線が現在の海岸線から 1~1.5 km 内陸に位置していたことを地質調査から推定し、それを考慮した浸水計算を行っている(Sawai et al., 2012)。この結果、プレート間地震のうち、断層の長さ 200 km、幅 100 km、およびすべり量 7 m(M_w 8.4)の時にいずれの地域においても津波がおおむね津波堆積物の分布位置まで浸水することが明らかにされた。この結果は、宮城沖重点の報告として 2010 年 6 月に公表されたが、M7 クラス程度しか想定されていなかった宮城県沖において M8 クラスの地震が発生する可能性があることを示した点で重要であった。

こうした研究の一方で、津波の浸水(海水の到達限界)は、津波堆積物(砂質、泥質、デブリ)の分布よりも広いことが指摘されていた。例えば、2004 年スマトラ沖地震の際には、その観察結果が定量的に示され(Chadha, 2005)、仙台平野においても今後の検討課題として触れられていた(澤井ほか, 2008)。2011 年東北地方太平洋津波直後の現地調査においてもこうした事実が確認され(Goto et al., 2011; 宍倉ほか, 2012)、たとえば石巻平野と仙台平野では、海岸線から最奥の砂質津波堆積物の位置までの距離と海岸線からの浸水距離との比を求めたところ、最奥の津波堆積物の位置よりも平均して約 1.4 倍奥まで海水が浸水したことが明らかになっている(Goto et al., 2011; 宍倉ほか, 2012)。佐竹ほか(2008)および行谷ほか(2010)では、こうした浸水範囲と津波堆積物の分布の差異を考慮していないため、貞観津波の大きさとして示された M_w 8.4 というのは地震規模の下限値であり、実際はさらに大きかったと考えられる。Namegaya and Satake(2014)はこうした問題点を考慮し、一番内陸に分布する(砂質の)津波堆積物が堆積した当時、その地点には少なくとも 1 m の浸水深はあったと仮定し、津波浸水計算を再検討した。その結果、貞観地震の規模は M_w 8.6 以上であったと推定している。

一方、菅原ほか(2011)や Sugawara et al.(2012)では、仙台平野における津波堆積物の分布を用いて貞観地震の断層モデルを検討した。断層の長さは 200 km と固定し、幅を 85~140 km、すべり量を 5.6~8.6 m と変化させ、かつ断層の傾斜角を高角(30°)および低角(10°)の 2 種類で浸水計算を行った。この結果、低角のモデルの方が妥当であることと、幅 100 km 以上の断層モデルでは浸水域に変化がなかったことを報告している。

貞観地震の破壊領域の広がりをより正確に復元するためには、日本海溝の北端と南端周辺においても津波堆積物調査を進め、海溝沿いのより広い範囲で浸水域を推定することが不可欠であろう。津波は、概して波源となる破壊領域の長軸に面した場所において大きくなるが、ある程度離れたところの限

りではない。例えば、明治三陸地震や昭和三陸地震による津波は三陸海岸では非常に高い波高が報告されているが、仙台平野周辺や福島県沿岸におけるそれは比較的小さいものしか記録されていない(渡辺, 1998)。貞観地震について言えば、主に宮城県から福島県沿岸の地質記録に基づいて波源を推定しているため(Sawai et al., 2012; Namegaya and Satake, 2014; Sugawara et al., 2012)、そこから離れた三陸沖や茨城県沖周辺にまで破壊領域が及んでいたかを知ることができていない。今後は、三陸海岸や茨城県~千葉県周辺における津波堆積物調査が充実し、貞観地震の規模の推定が進むことが期待される。

後期完新世から貞観時代以前を対象とした 古津波堆積物の調査

後期完新世から貞観時代以前(約 5000~1100 年前)には、複数回の大規模な浸水があったと考えられている(Ishimura and Miyauchi, 2015; Matsumoto et al., 2012; Sawai et al., 2012; 高田ほか, 2016; Tanigawa et al., 2014)。例えば、仙台平野北部の杓形遺跡では、約 2000 年前のイベント堆積物が検出されており、当時の海岸線から 4.2 km まで浸水した津波によるものと推定されている(Matsumoto et al., 2012)。ただし、この 2000 年前の巨大津波に相当する津波堆積物は、仙台・石巻~福島県を調査した Sawai et al.(2012)や、岩手県を調べた Ishimura and Miyauchi(2015)や高田ほか(2016)では必ずしも報告されておらず、イベント年代の拘束に問題が残されている。約 2000 年前以前では、青森県(Tanigawa et al., 2014)や岩手県(Ishimura and Miyauchi, 2015; 高田ほか, 2016)、宮城県(Sawai et al., 2012)において、十和田中掘テフラ(To-Cu)の降下以降(あるいは、それに該当する地質年代以降)に複数回のイベント堆積物を報告しており、おおむね津波によるものと受け入れられている。こうした後期完新世から貞観時代以前の浸水イベントについては、その浸水課程や波源などの定量的な推定が全く行われていない。

このほか、後期完新世から貞観時代以前という時期からは外れるが、下北半島において約 650 年前頃の津波堆積物が報告されており、千島海溝との関係が考察されている(Minoura et al., 2013)。

今後の課題や展開

筆者が澤井(2012)を執筆してから既に 5 年が経過しているが、過去の津波の津波堆積物の認定や当時の浸水域を復元する作業は、未だ確立されたものではない。なかでも、イベント堆積物の認定、地点間の対比、調査地域の選定に関わる事項についてはその後の議論を左右するため、ここで特に述べておきたい。なお、ここで記すことの多くは、東北地方のみに限ったことではなく、日本各地において共通する事項である。

1. イベント堆積物の判別・記載方法

ある地点におけるイベント堆積物の判別は、肉眼で行えることが多い。例えば、平穏な環境で堆積する泥炭層の中に、

砂礫層が挟在するような場合である。そのイベント堆積物を津波起源と判断する際、堆積物の平面的な広がりが重要であるとされるが(Goff et al., 2012; 澤井, 2012)、イベント堆積物の広がりを議論するときの地層対比は研究従事者の主観によって左右される。津波堆積物は、数メートル以内でも層厚が大きく変化することが知られているし(Fujiwara and Tanigawa, 2014; Sawai et al., 2009)、隣り合う地点間の距離が離れていると、地層の対比に影響するという指摘もある(石村ほか, 2015)。こうした点を鑑みると、イベント堆積物を津波起源と判断し、さらにその分布から浸水域を復元しようとするならば、調査地点にはある一定以上の採取密度が求められるかもしれない。また、十分な採取密度が得られない場合は、研究結果の受け手に誤解を与えないように、地層対比の不確かさが分かるような記載をする必要があるだろう。

イベント堆積物の判別が肉眼で行いにくい場合、軟X線写真撮影やコンピュータ断層撮影(Computed Tomography; CT)を利用する方法もある。軟X線写真撮影は2011年の津波堆積物などでも適用されており、肉眼で観察しにくい堆積構造を客観的に示すことができる(Matsumoto et al., 2016a, b)。また、軟X線撮影と同様にCTを利用して堆積構造の画像を残すことができる。このCTの最たるメリットは堆積物試料を非破壊で観察できるという点であり、試料の断面映像を見てから分析項目を決めることができる。後進の研究者や成果の受け手に分かりやすい結果を残すという点を考慮すると、こうした装置の利用は積極的に行うべきである。

なお、個々の研究がどのような点に注目してイベント堆積物を議論しているのかについて、本論では詳しく記述しない。個別の事例については、後藤(2016)に従って整理されたデータベースが「津波痕跡データベース(津波堆積物情報)」として公開予定であるため、そちらを参照されたい。

2. 年代測定

津波堆積物の研究調査を行う際、イベント堆積物の堆積年代の推定は最も重要な点である。前段で述べたイベント堆積物の地点間対比の際や、津波の再来間隔を推定する際には、個々のイベント層の年代推定が不可欠だからである。特に三陸地方のようなリアス地形では、正面に波源を持つような津波(例えば、明治三陸津波や昭和三陸津波)だけではなく、1960年チリ地震のような遠地津波でも波高が高くなり、広域に津波堆積物を残すことが知られている。近接地を波源とする津波堆積物と遠地からのそれを堆積学的・古生物学的な特徴から区別することは極めて難しいため、三陸海岸のように数多くのイベント砂層が残されるような地域(例えば、Goto et al., 2015)において過去の津波をひとつひとつ分解するためには、年代測定の確度をあげる必要がある。

イベント堆積物の年代を推定する方法には、様々なアプローチがある。例えば、火山灰層序は、これまで最も簡便に用いられてきた方法である。また、砂質堆積物の年代を推定する方法として、光ルミネッセンス(OSL; Optically Stimulated Luminescence)法(Prendergast et al., 2012; Tamura et al., 2015b)も用いられる。こうした方法のなか、未だに

主流を占めるのは放射性炭素年代測定法である。放射性炭素年代測定法による年代推定では、イベント堆積物の直上と直下の年代を測定し、そこからイベント堆積物の堆積年代を再計算するアプローチが多い。また、イベント年代の推定精度を上げるため、ベイズ統計を用いた方法も用いられている(例えば、Baranes et al., 2016; Ishizawa et al., 2017 in press)。

放射性炭素年代測定の精度・確度を支配するのは、統計的な手法ではなく測定物の選定である。津波堆積物の研究では、バルク試料の年代がしばしば採用されるが、炭素化合物の二次移動などで真の値からはずれ、火山灰層序や信頼性の高い測定物から得られた年代値とかけ離れていることがある(Sawai and Nasu, 2005; 石村ほか, 2016; Nakamura et al., 2016)。こうした問題点を踏まえ、澤井(2012)では、津波堆積物の堆積年代を推定する際には年代測定物の選定を注意深く行う必要があると述べている。また、測定の際には、年代測定に用いた試料の種別(種子、木片、貝殻片など)と、その産出層準を明確に記載しておくことを推奨している。例えば、大型植物化石を年代測定する場合、①単個体(例えば、球果1個)、②単一種からなる単一器官(例えば、未同定単一種の果実のみを集めたもの)、③複数種からなるもの(多くの場合は複数器官。例えば、果実と針葉の組み合わせ)、④複数種の同定できない植物化石、という順位をつけて、測定した群集そのものが信頼できるものなのかを後で評価できるようにすることを提案している。このほか、年代測定に関して留意すべき点は、澤井(2012)に述べてあるので、そちらを参照していただきたい。

3. 調査地の選定

過去のイベント堆積物を見つけ、それを津波堆積物とする作業がうまくいくかどうかは、詰まるところ調査地の選定(と年代測定の精度)で決まってしまう。澤井(2012)で総括しているように、静穏な環境で碎屑物や植物遺体が堆積している場所ではイベント堆積物や放射性炭素年代測定のための試料が見つけやすいため、多くの研究では堤間湿地や沿岸湖沼が調査地として選ばれてきた。これに対し、近年の東北地方では、これまで適地とは考えられていなかった砂丘上から津波堆積物とされる地層が報告されている(Minoura et al., 2013; 山野井ほか, 2014, 2016)。Minoura et al. (2013)や山野井ほか(2014)の報告は、必ずしも多角的な分析によって担保されたものではないかもしれないが、今後の可能性を示したという点では重要である。日本海側や下北半島北部では、非常に高い砂丘が発達するため津波堆積物に関する調査は敬遠され、研究の空白地帯となりがちであった。しかしながら、こうした場所においても、津波堆積物の判別が丁寧に行われ、年代測定物の確保が担保されれば、有力な調査地とすることができるかもしれない。また、道口ほか(2014)などで言及されているような遺跡の発掘現場や工事露頭も、これまで以上に注目されるべき対象である。東北地方太平洋沖地震の被災地周辺では、復旧作業に伴った圃場整備事業や遺跡の発掘により大規模な壁面が露出している(高田ほか, 2016)。例えば、澤井ほか(2016)では、JR常磐線坂元駅の付け替えに伴って発掘された熊の作遺跡の壁面から貞観地震

による津波堆積物を認め、堆積構造や古生物学的な特徴を記載している。今後は、考古学と地質学がより連携を強めて、津波堆積物の研究を推進していくべきである。

おわりに

津波堆積物の研究における大きな出口の一つは、海域巨大地震の中長期予測に資する詳細な津波浸水履歴を明らかにすることである。ここでいう“履歴”という用語は、複合的な意味で使用されることが多い。例えば、単純に浸水の再来間隔を示す『時間的』な意味が強く、どの場所(波源となる領域)が繰り返し破壊しているのかについて考慮されていないことがある。一方で、ある時期にどこが破壊したのか(波源)という『空間的』な意味に重きを置き、その繰り返し間隔については重要視されない場合もある。仮に、『時間』と『空間』の両方の情報が複数回そろった場合についてのみ“履歴が解明した”と呼ぶとすれば、日本海溝沿いにおける海域古地震の“履歴”は解明していると言い難い。波源のモデル化が進んでいる貞観地震については破壊領域の北端と南端に議論の余地が残されているし、享徳地震についても破壊領域の一部が明らかになっているに過ぎない。また、最も有名な地震・津波の一つである慶長地震についても、その破壊領域は議論の決着が見えない。

『時間』と『空間』の情報をそろえるためには、非常に多くの時間と労力を費やす。例えば、地質記録から未知の巨大地震・津波を明らかにした研究として有名な北海道東部では、初期の研究報告(例えば、七山ほか, 1998)からモデル化(Nanayama et al., 2003; Satake et al., 2008)までに少なくとも5年、その後の年代測定による再来間隔の見直し(Sawai et al., 2009)にはさらに6年の時間を費やしている。北海道東部については、これだけ多くの時間が経過しても未だにモデルの見直しが行われている状況にある(Ioki and Tanioka, 2016)。北海道の研究例に習った日本海溝の研究は、研究アプローチとしては最適化されているかもしれない。しかしながら『時間』と『空間』がそろった履歴の解明という点において日本海溝沿いはまだ発展途上と言って良いだろう。

東北地方太平洋沖地震の発生以降、津波堆積物の研究分野には非常に大きな期待がかけられているが、信頼性の高い研究成果から現実的な防災・減災に貢献するためには多くの時間がかかる。そのため、津波堆積物研究の受け手は性急に結論を得ようとするべきではない。一方で担い手は、その時その時で最も信頼性の高いデータを迅速に出版するように心がけるべきである。相反する提言に聞こえるかもしれないが、受け手と担い手が研究の目標、背景、性格、現在進行形の研究過程をきちんと理解すれば、津波堆積物研究の社会への貢献が正しい方向に進み、この研究分野が活発になっていくはずである。本論をはじめとした、特集号の記事がその手助けになることを期待している。

謝 辞

産業技術総合研究所の谷川晃一郎氏、松本 弾氏、田村 亨氏、秋田大学の鎌滝孝信氏には、投稿前の原稿について有益

なコメントをいただいた。特に谷川晃一郎氏には、査読後の修正原稿についても助言をいただいた。また、査読者である藤野滋弘氏、川上源太郎氏のコメントによって本原稿は改善された。津波痕跡データベース(津波堆積物情報)の引用方法については、後藤和久氏および道口陽子氏に助言をいただいた。以上の方々に記して感謝の意を表します。

文 献

- 阿部 寿・菅野喜貞・千釜 章(Abe, F., Sugeno, Y. and Chigama, A.), 1990, 仙台平野における貞観 11 年(869 年)三陸津波の痕跡高の推定(Estimation of the height of the Sanriku Jogan 11 earthquake-tsunami (A.D. 869) in the Sendai Plain). 地震 2 輯(Jour. Seismol. Soc. Japan, 2nd Ser.), **43**, 513–525.
- Baranes, H. E., Woodruff, J. D., Wallace, D. J., Kanamaru, K. and Cook, T. L., 2016, Sedimentological records of the C. E. 1707 Hōei Nankai Trough tsunami in the Bungo Channel, southwestern Japan. *Natural Hazards*, **84**, 1185–1205.
- Chadha, R. K., Latha, G., Yeh, H., Peterson, C. and Katada, T., 2005, The tsunami of the great Sumatra earthquake of M 9.0 on 26 December 2004—impact on the east coast of India. *Current Science*, **88**, 1297–1301.
- Chagué-Goff, C., Andrew, A., Szczucinski, W., Goff, J. and Nishimura, Y., 2012a, Geochemical signatures up to the maximum inundation of the 2011 Tohoku-oki tsunami—implications for the 869 AD Jogan and other palaeotsunamis. *Sediment. Geol.*, **282**, 65–77.
- Chagué-Goff, C., Niedzielski, P., Wong, H. K. Y., Szczucinski, W., Sugawara, D. and Goff, J., 2012b, Environmental impact assessment of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai plain. *Sediment. Geol.*, **282**, 175–187.
- 蝦名裕一・今井健太郎(Ebina, Y. and Imai, K.), 2014, 史料や伝承に基づく 1611 年慶長奥州地震の津波痕跡調査(Tsunami traces survey of the 1611 Keicho Ohsyu earthquake tsunami based on historical documents and traditions). 津波工学研究報告(Res. Rep. Tsunami Eng.), **31**, 139–148.
- 蝦名裕一・高橋裕史(Ebina, Y. and Takahashi, H.), 2014, 『ビスカイノ報告』における 1611 年慶長奥州地震津波の記述について(Description of the 1611 Keicho Oshu earthquake and tsunami in the report by Vizcaino). 歴史地震(Hist. Earthquakes), **29**, 195–207.
- Fujino, S., Masuda, F., Tagomori, S. and Matsumoto, D., 2006, Structure and depositional processes of a gravelly tsunami deposit in a shallow marine setting: Lower Cretaceous Miyako Group, Japan. *Sediment. Geol.*, **187**, 127–138.
- Fujiwara, O. and Tanigawa, K., 2014, Bedforms record the flow conditions of the 2011 Tohoku-Oki tsunami on the Sendai Plain, northeast Japan. *Mar. Geol.*, **358**, 79–88.
- Goff, J., Chagué-Goff, C., Nichol, S., Jaffe, B. and Dominey-Howes, D., 2012, Progress in palaeotsunami research. *Sediment. Geol.*, **243–244**, 70–88.
- 後藤和久・菅原大助・西村裕一・小松原純子・藤野滋弘・澤井祐紀・高清水康博(Goto, K., Sugawara, D., Nishimura, Y., Komatsubara, J., Fujino, S., Sawai, Y. and Takashimizu, Y.), 2016, 津波堆積物の認定手順(Identification procedure of tsunami deposit). 津波工学研究報告(Res. Rep. Tsunami Eng.), **33**, 45–54.
- Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffe, B., Nishimura, Y.,...Yulianto, E., 2011, New insights of tsunami hazard from the 2011 Tohoku-oki event. *Mar. Geol.*, **290**, 46–50.
- Goto, T., Satake, K., Sugai, T., Ishibe, T., Harada, T. and Murotani, S., 2015, Historical tsunami and storm deposits during the last five centuries on the Sanriku coast, Japan. *Mar. Geol.*, **367**, 105–117.
- 羽島徳太郎(Hatori, T.), 1988, 貞観 11 年(869 年)宮城多賀城津波の推定波源域(Estimated tsunami source of the Jogan 11

- (869)Miyagi Tagajo tsunami)*. 月刊海洋 号外(*Kaiyo Monthly*), **15**, 167–171.
- 平川一臣(Hirakawa, K.), 2012, 千島海溝・日本海溝の超巨大津波履歴とその意味: 仮説的検討(Outsize tsunami sediments since last 6000 years along the Japan- and Kuril-Trench: A tentative idea on sources and supercycle). 科学(*Kagaku*), **82**, 172–181.
- 保立道久(Hotate, M.), 2011, 貞観津波と大地動乱の九世紀(Jogan tsunami and upheaval in 9th century)*. 季刊東北学(*Kikan Tohoku gaku*), **28**, 74–94.
- 今井健太郎・行谷佑一・澤井祐紀・穴倉正展・越村俊一・藤間功司(Imai, K., Namegaya, Y., Sawai, Y., Shishikura, M., Koshimura, S. and Fujima, K.), 2013, 第2章 東北地方の津波災害の歴史. 東日本大震災合同調査報告. 共通編2. 津波の特性と被害. 東日本大震災合同調査報告書編集委員会(*Report on the Great East Japan Earthquake Disaster. Fundamental Aspect 2. The Tsunami and its Impact*). CD-ROM
- 今泉俊文・石山達也・原口 強・宮内崇裕・後藤秀昭・島崎邦彦(Imaizumi, T., Ishiyama, T., Haraguchi, T., Miyauchi, T., Goto, H. and Shimazaki, K.), 2010, 津波堆積物調査にもとづく地震発生履歴に関する研究. 宮城県沖地震における重点的調査観測総括成果報告書(*Reports of Integrated Research Project for Miyagi-ken-oki Earthquakes*), 152–185.
- Ioki, K. and Tanioka, Y., 2016, Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **433**, 133–138.
- 石村大輔・市原季彦・阪田知洋・大畑雅彦・高田裕哉(Ishimura, D., Ichihara, T., Sakata, T., Ohata, M. and Takada, Y.), 2015, 高密度群列掘削調査による津波堆積物の対比: 岩手県山田町小谷鳥を例として(Continuity of tsunami deposits and their correlations based on close interval Handy Geoslicer survey: Case study of Koyadori, Yamada Town, Iwate Prefecture, northeast Japan). 活断層研究(*Act. Fault Res.*), **43**, 53–60.
- Ishimura, D. and Miyauchi, T., 2015, Historical and paleo-tsunami deposits during the last 4000 years and their correlations with historical tsunami events in Koyadori on the Sanriku Coast, northeastern Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, doi: 10.1186/s40645-015-0047-4
- 石村大輔・宮内崇裕・早瀬亮介・小原圭一・山市剛(Ishimura, D., Miyauchi, T., Hayase, R., Ohara, K. and Yamaichi, T.), 2016, 完新統コア中の有機質堆積物(バルク)試料と生物化石試料間に認められる放射性炭素年代値の系統的な差とその要因(Systematic age gap of radiocarbon dates between organic bulk sediment samples and fossil samples of animal and plant in Holocene core sediments and their causes). 地学雑誌(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **125**, 243–256.
- Ishizawa, T., Goto, K., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Sawada, S., Nishimura, Y. and Sugawara, D., 2017 in press, Sequential radiocarbon measurement of bulk peat for high-precision dating of tsunami deposits. *Quatern. Geochronol.*, doi: 10.1016/j.quageo.2017.05.003
- 今野円蔵・岩井淳一・高柳洋吉・中川久夫・小貫義男・柴田豊吉.....片岡 純(Konno, E., Iwai, J., Takayanagi, Y., Nakagawa, H., Onuki, Y., Shibata, T.,...Kataoka, J.), 1961, チリ地震津波による三陸沿岸被災地の地質学的調査報告(Geological Observations of the Sanriku Coastal Region damaged by the Tsunami due to the Chile Earthquake in 1960). 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告(*Contrib. Inst. Geol. Paleontol. Tohoku Univ.*), **52**, 1–45.
- 小山真人(Koyama, M.), 1999, 日本の史料地震学研究の問題点と展望—一次世代の地震史研究に向けて(A review of historical seismology in Japan: Analyses and proposal for next stage of study of historical documents). 地学雑誌(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **108**, 346–369.
- Matsumoto, D., Sawai, Y., Tanigawa, K., Fujiwara, O., Namegaya, Y., Shishikura, M., Kagohara, K. and Kimura, H., 2016a, Tsunami deposit associated with the 2011 Tohoku-oki tsunami in the Hasunuma site of the Kujukuri coastal plain, Japan. *Isl. Arc*, **25**, 369–385.
- Matsumoto, D., Sawai, Y., Yamada, M., Namegaya, Y., Shinozaki, T., Takeda, D.,...Pilarczyk, J. E., 2016b, Erosion and sedimentation during the September 2015 flooding of the Kinu River, central Japan. *Sci. Rep.*, **6**, 34168.
- Matsumoto, H., Yoshida, M. and Kumagai, M., 2012, Paleotsunami and the 2011 tsunami deposits on the Sendai coastal lowland, northeast Japan. *Trans. Japan. Geomorphol. Union*, **33**, 385–389.
- 道口陽子・内田淳一・杉野英治・堤 英明・津波堆積物調査・評価分科会委員および専門家(Michiguchi, Y., Uchida, J., Sugino, H., Tsutsumi, H. and members of the committee for tsunami deposit survey and evaluation in JNES), 2014, 津波堆積物調査ハンドブック(*Handbook of Tsunami Deposit Survey*). JNES-RE-2013-2039. 原子力安全基盤機構(Japan Nuclear Energy Safety Organization), 150p.
- Minoura, K., Hirano, S. and Yamada, T., 2013, Identification and possible recurrence of an oversized tsunami on the Pacific coast of northern Japan. *Nat. Hazards*, **68**, 631–643.
- Minoura, K., Imamura, F., Sugawara, D., Kono, Y. and Iwashita, T., 2001, The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan. *Jour. Nat. Disaster Sci.*, **23**, 83–88.
- Minoura, K. and Nakaya, S., 1991, Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan. *Jour. Geol.*, **99**, 265–287.
- Nakamura, A., Yokoyama, Y., Maemoku, H., Yagi, H., Okamura, M., Matsuoka, H.,...Matsuzaki, H., 2016, Weak monsoon event at 4.2 ka recorded in sediment from Lake Rara, Himalayas. *Quatern. Int.*, **397**, 349–359.
- Nakamura, Y., Nishimura, Y. and Putra, P. S., 2012, Local variation of inundation, sedimentary characteristics, and mineral assemblages of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Misawa coast, Aomori, Japan. *Sediment. Geol.*, **282**, 216–227.
- Namegaya, Y. and Satake, K., 2014, Reexamination of the A. D. 869 Jogan earthquake size from tsunami deposit distribution, simulated flow depth, and velocity. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2297–2303.
- 行谷佑一・佐竹健治・山木 滋(Namegaya, Y., Satake, K. and Yamaki, S.), 2010, 宮城県石巻・仙台平野および福島県舘戸川河口低地における869年貞観津波の数値シミュレーション(Numerical simulation of the AD 869 Jogan tsunami in Ishinomaki and Sendai plains and Ukedo river-mouth lowland). 活断層・古地震研報(*Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.*), **10**, 1–21.
- 行谷佑一・矢田俊文(Namegaya, Y. and Yata, T.), 2014, 史料に記録された中世における東日本太平洋沿岸の津波(Tsunami which affected the Pacific coast of eastern Japan in medieval times inferred from historical documents). 地震(*Jour. Seismol. Soc. Japan*), **66**, 73–81.
- 七山 太(Nanayama, F.), 1998, 北海道東部, 釧路～根室沿岸地域の津波堆積物の研究(予察)(Preliminary study of tsunami deposits along the Pacific coast of eastern Hokkaido). 地質調査速報(*Geol. Surv. Japan Inter. Rep.*), **EQ/98/1**, 1–9.
- Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Atwater, B. F., Shigeno, K. and Yamaki, S., 2003, Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. *Nature*, **424**, 660–663.
- 岡村行信・行谷佑一(Okamura, Y. and Namegaya, Y.), 2011, 17世紀に発生した千島海溝の連動型地震の再検討(Reconsideration of the 17th century Kuril multi-segment earthquake). 活断層・古地震研報(*Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.*), **11**, 15–20.
- Prendergast, A. L., Cupper, M. L., Jankaew, K. and Sawai, Y., 2012, Optical dating of late Holocene tsunami sand sheets in Thailand. *Mar. Geol.*, **295–298**, 20–27.
- Saito, Y., Ikehara, K. and Tamura, T., 2016, Coastal geology and oceanography. In Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T. and

- Gibbons, W. eds., *The Geology of Japan*, Geol. Soc. London, 409–430.
- Satake, K., 2004, Detection of Kuril subduction-zone earthquakes from remote historic records in Honshu, Japan, between 1656 and 1867. *Ann. Geophys.*, **47**, 369–378.
- 佐竹健治・行谷佑一・山本 滋(Satake, K., Namegaya, Y. and Yamaki, S.), 2008, 石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション(Numerical simulation of the AD 869 Jogan tsunami in Ishinomaki and Sendai plains). 活断層・古地震研報(Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.), **8**, 71–89.
- Satake, K., Nanayama, F. and Yamaki, S., 2008, Fault models of unusual tsunami in the 17th century along the Kuril trench. *Earth Planets Space*, **60**, 925–935.
- 澤井祐紀(Sawai, Y.), 2012, 地層中に存在する古津波堆積物の調査(Study on paleotsunami deposits in geologic stratum). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **118**, 535–558.
- Sawai, Y., Fujii, Y., Fujiwara, O., Kamataki, T., Komatsubara, J., Okamura, Y.,...Shishikura, M., 2008, Marine incursions of the past 1500 years and evidence of tsunamis at Suijinuma, a coastal lake facing the Japan Trench. *Holocene*, **18**, 517–528.
- Sawai, Y., Kamataki, T., Shishikura, M., Nasu, H., Okamura, Y., Satake, K.,...Aung, T. T., 2009, Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **114**, B01319, doi: 10.1029/2007JB005503.
- Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K. and Shishikura, M., 2012, Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L21309 doi: 10.1029/2012GL053692
- Sawai, Y., Namegaya, Y., Tamura, T., Nakashima, R. and Tanigawa, K., 2015, Shorter intervals between great earthquakes near Sendai: Scour ponds and a sand layer attributable to AD 1454 overwash. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4795–4800.
- Sawai, Y. and Nasu, H., 2005, Relative sea-level reconstruction using plant macrofossils: a 4500 years record of Onnetoh estuary, Hokkaido, northern Japan. *Mar. Geol.*, **217**, 49–65.
- 澤井祐紀・穴倉正展・小松原純子(Sawai, Y., Shishikura, M. and Komatsubara, J.), 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(A study on paleotsunami using hand corer in Sendai plain(Sendai City, Natori City, Iwanuma City, Watari Town, Yamamoto Town), Miyagi, Japan). 活断層・古地震研報(Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.), **8**, 17–70
- 澤井祐紀・穴倉正展・岡村行信・高田圭太・松浦旅人・Than Tin Aung,.....佐藤伸枝(Sawai, Y., Shishikura, M., Okamura, Y., Takada, K., Matsu'ura, T., Aung, T. T.,...Sato, N.), 2007, ハンディジオスライサ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(A study on paleotsunami using handy geoslicer in Sendai Plain(Sendai, Natori, Iwanuma, Watari, and Yamamoto), Miyagi, Japan). 活断層・古地震研報(Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.), **7**, 47–80.
- 澤井祐紀・谷川晃一郎・篠崎鉄哉・田村 亨・那須浩郎(Sawai, Y., Tanigawa, K., Shinozaki, T., Tamura, T. and Nasu, H.), 2016, 宮城県熊の作遺跡から発見された貞観地震による津波堆積物(AD 869 Jogan tsunami deposit found in the Kumano-saku archeological site, Yamamoto Town, Miyagi, Japan). 第四紀研究(Quatern. Res.), **55**, 59–66.
- Shinozaki, T., Sawai, Y., Hara, J., Ikehara, M., Matsumoto, D. and Tanigawa, K., 2016, Geochemical characteristics of deposits from the 2011 Tohoku-oki tsunami at Hasunuma, Kujukuri coastal plain, Japan. *Island. Arc*, **25**, 350–368.
- 穴倉正展・藤原 治・澤井祐紀・行谷佑一・谷川晃一郎(Shishikura, M., Fujiwara, O., Sawai, Y., Namegaya, Y. and Tanigawa, K.), 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の仙台・石巻平野における分布限界(Inland-limit of the tsunami deposit associated with the 2011 Off-Tohoku earthquake in the Sendai and Ishinomaki Plains, northeastern Japan). 活断層・古地震研報(Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.), **12**, 45–61.
- 穴倉正展・澤井祐紀・岡村行信・小松原純子・Than Tin Aung・石山達也.....藤野滋弘(Shishikura, M., Sawai, Y., Okamura, Y., Komatsubara, J., Aung, T. T., Ishiyama, T.,...Fujino, S.), 2007, 石巻平野における津波堆積物の分布と年代(Age and distribution of tsunami deposit in the Ishinomaki Plain, northeastern Japan). 活断層・古地震研報(Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.), **7**, 31–46.
- Sugawara, D., Imamura, F., Goto K., Matsumoto H. and Minoura K., 2012, The 2011 Tohoku-oki Earthquake Tsunami: Similarities and Differences to the 869 Jogan Tsunami on the Sendai plain. *Pure Appl. Geophys.*, **170**, 831–843.
- 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治(Sugawara, D., Imamura, F., Matsumoto, H., Goto, K. and Minoura, K.), 2011, 地質学的データを用いた西暦 869 年貞観地震津波の復元について(Reconstruction of the AD 869 Jogan earthquake induced tsunami by using the geological data). 自然災害科学(Jour. Japan. Soc. Nat. Disaster Sci.), **29**, 501–516.
- 菅原大助・箕浦幸治・今村文彦(Sugawara, D., Minoura, K. and Imamura, F.), 2001, 西暦 869 年貞観津波による堆積作用とその数値復元(Sedimentation associated with the AD 869 Jogan tsunami and its numerical reconstruction)*. 津波工学研究報告(Res. Rep. Tsunami Eng.), **18**, 1–10.
- 高田圭太・穴倉正展・今井健太郎・蝦名裕一・後藤和久・越谷 信・.....岩手県国土整備部河川課(Takada, K., Shishikura, M., Imai, K., Ebina, Y., Goto, K., Koshiya, S.,...River Division Department of Prefectural Land Development, Iwate Prefecture Government), 2016, 岩手県沿岸における津波堆積物の分布とその年代(Distribution and ages of tsunami deposits along the Pacific coast of the Iwate Prefecture). 活断層・古地震研報(Annu. Rep. Active. Fault Paleoeearthquake Res.), **16**, 1–52.
- Takashimizu, Y., Urabe, A., Suzuki, K. and Sato, Y., 2012, Deposition by the 2011 Tohoku-oki tsunami on coastal lowland controlled by beach ridges near Sendai, Japan. *Sediment. Geol.*, **282**, 124–141.
- Tamura, T., Sawai, Y., Ikehara, K., Nakashima, R., Hara, J., Kanai, Y., 2015a, Shallow-marine deposits associated with the 2011 Tohoku-oki tsunami in Sendai Bay, Japan. *Jour. Quatern. Sci.*, **30**, 293–297.
- Tamura, T., Sawai, Y., Ito, K., 2015b, OSL dating of the AD 869 Jogan tsunami deposit, northeastern Japan. *Quatern. Geochronol.*, **30**, 294–298.
- 谷川晃一郎・澤井祐紀・穴倉正展・藤原 治・行谷佑一(Tanigawa, K., Sawai, Y., Shishikura, M., Fujiwara, O. and Namegaya, Y.), 2014, 青森県三沢市で検出されたイベント堆積物(Event deposits on the Pacific coast of Misawa, Aomori Prefecture, northern Japan). 第四紀研究(Quatern. Res.), **53**, 55–62.
- Tanigawa, K., Sawai, Y., Shishikura, M., Namegaya, Y. and Matsumoto, D., 2014, Geological evidence for an unusually large tsunami on the Pacific coast of Aomori, Northern Japan. *Jour. Quatern. Sci.*, **29**, 200–208.
- 東京大学地震研究所(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), 1934, 昭和 8 年 3 月 3 日三陸地方津波に関する論文乃報告(Papers and reports on the tsunami of 1933 on the Sanriku Coast, Japan). 東京大学地震研究所彙報, 別冊(Bull. Earthq. Res. Inst. Suppl.) **1**, Part I, 1–232.
- 都司嘉宣・上田和枝, 1995, 慶長 16 年(1611), 延宝 5 年(1677), 宝暦 12 年(1763), 寛政 5 年(1793), および安政 3 年(1856)の各三陸地震津波の検証(Examination of Sanriku earthquake-tsunami in Keicho 16(1611), Empo 12(1763), Kansei 5(1793) and Ansei 3(1856))* . 歴史地震(Hist. Earthquakes), **11**, 75–106.

- 宇佐美龍夫(Usami, T.), 1975, 資料日本被害地震総覧(*Materials for Comprehensive List of Destructive Earthquakes in Japan*)*, 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 327pp.
- 山野井徹・門叶冬樹・加藤和浩・今野 進・箕浦幸治(Yamanoi, T., Tokanai, F., Kato, K., Konno, S. and Minoura, K.), 2014, 庄内砂丘中の津波堆積物(概報)(Tsunami deposits in the Shonai Sand Dunes: summary report)*. 山形応用地質(*Appl. Geol. Yamagata*), **34**, 1–12.
- 山野井徹・門叶冬樹・加藤和浩・山田 努・鎌田隆史・今野 進(Yamanoi, T., Tokanai, F., Kato, K., Yamada, T., Kamata, T. and Konno, S.), 2016, 山形県庄内砂丘に挟まれる2層の津波堆積

- 物(Two tsunami deposits in the Shonai Sand Dunes, north-east Japan). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **122**, 637–652.
- 渡辺偉夫(Watanabe, H.), 1998, 日本被害津波総覧(第2版)(*Comprehensive List of Tsunamis to Hit the Japanese Islands[2nd Ed.]*). 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 238pp.
- 渡辺偉夫(Watanabe, H.), 2000, 貞観十一年(869年)地震・津波と推定される津波の波源域(総括)(The earthquake and tsunami occurred in 869(Jogan 11), and tsunami source). 歴史地震(*Hist. Earthquakes*), **16**, 59–77.

* English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

澤井祐紀, 2017, 東北地方太平洋側における古津波堆積物の研究. 地質雑, **123**, 819–830. (Sawai, Y., 2017, Paleotsunami research along the Pacific coast of Tohoku region. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **123**, 819–830.)

本論は東北地方太平洋沿岸で行われた古津波堆積物に関する研究について総括する。東北地方における古津波痕跡に関する地質調査は、1980年代の日本海側で始まった。その後、津波堆積物に関する調査は太平洋側で行われ、1611年慶長津波、1454年享徳津波、869年貞観津波の痕跡が見つかっている。1611年慶長津波については、三陸海岸沖に波源を想定する一方で、千島海溝の巨大地震によるものという説もあり、未だ決着がついていない。1454年享徳津波および869年貞観津波については、日本海溝中部に波源があると考えられ、その規模はM8クラスである。1454年および869年の津波より前には、幾つかの古津波の痕跡が見つかっているが、その波源についてはまだ明らかになっていない。