総 説

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

藤 原 治*

最近 20 年間に、津波堆積物の研究は地球科学と防災技術の両面で大きく進歩した。地球科学の面では、堆積学や古生物学などの研究から、津波堆積物の形成プロセスの理解が進んだ。また、シミュレーションや水路での津波による堆積過程の再現実験も進んでいる。防災面では、長期にわたる津波の履歴が解明されつつあり、北海道や相模湾周辺では過去 7,000 年から 1 万年、南海トラフ沿岸でも 3,000 年以上に渡るデータが蓄積された。また、津波堆積物が示す浸水範囲などを説明する津波シミュレーションを行うことで、津波を起こした断層モデルの推定や津波の浸水範囲の復元もされるようになった。

しかし、見つかった津波堆積物の数はまだ少なく、ストーム堆積物などとの識別など課題も残る。今後は、信頼性の高い津波堆積物のデータを時間的にも空間的にも密に蓄積していくとともに、津波の波高、流速、遡上範囲などを津波堆積物から定量的に推定する基準を構築していくことが課題である。

こうした成果を社会に還元するために、地質学、地形学、地震学、津波工学、社会学などの連携が必要である。

キーワード：地震防災、津波防災、海溝型地震、津波履歴、津波堆積物

I. は じ め に

地層中の津波堆積物を利用して過去の地震を復元することが、Atwater (1987) と箕浦ほか (1987) によって具体化されて以来、この 20 年間に津波堆積物の研究はさまざまな進展を見せている。津波には複数の原因があるが、過去 200 年間の統計で見ると、約 90% が海溝型地震に伴うもので、残りが火山噴火や地すべりに関係するものである (今村, 1996)。小論では多数を占める海溝型地震に伴う津波による堆積物 (以下では、地震津波堆積物と呼ぶ) を扱う。

この分野の進歩には、地層を研究する理学の分野と、その応用として津波堆積物を指標とした防災研究の分野の両方がある。小論では、まず、津波堆積物の研究が時代とともにどのように進歩したかを、調査・研究方法の進展と合わせて研究史にまとめる。次に、津波堆積物研究の成果を、津波直後に行われた調査 (現世津波の研究) と地層中の津波堆積物 (過去の津波の研究) に分けて述べ、あわせて問題点と課題を整理する。特に、津波堆積

物と他のイベント堆積物との違いについて、堆積過程を比較して詳しく述べる。次に、津波堆積物が防災面で果たした貢献を解説し、最後に今後の展望を述べる。

本論では以下のレビュー論文や書籍も参考にした。津波の全般的な特徴については Bryant (2001), Satake (2005), 津波堆積物の堆積学的な特徴については Shiki *et al.* (2000), 藤原ほか (2004), 防災面での応用については藤原ほか (2004), Atwater *et al.* (2005) である。

II. 津波堆積物とは

非常に長い波長を持つことが津波の大きな特徴である (図 1)。通常の波は波頭の後が直ぐに低くなるが、津波は波頭の背後に数十 km から 100 km 以上に達する水位の高い水塊が控えている。このため、通常の波が海岸で砕けてすぐに引くのに対し、津波の波は後続の水塊が次々と押し寄せ遡上を続ける。海岸に到達した津波は強い流れとなって内陸奥深くまで侵入し、土砂を長距離運搬する。

津波が海岸の砂丘などを乗り越えて内陸の低地へ広

2006 年 9 月 9 日受付, 2007 年 5 月 12 日受理.

* 産業技術総合研究所活断層研究センター 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7. E-mail : o.fujiwara@aist.go.jp

がった跡や、津波で運ばれた土砂などが海底や海岸の地層に覆われて長く残ることがある。このような津波で形成された地層は津波堆積物と呼ばれる(藤原ほか, 2004 など)。津波堆積物のできる様子を図2に模式的に示す。海岸には一般に、浜堤や砂丘などの高まりがあり、通常の波浪はこれを越えることは少ない。海岸の高まりの陸側にはラグーンなどの低地があり、ここでは通常は粘土や植物遺体などが静かに堆積している(図2-1)。津波が押し寄せると、海岸の砂丘や浜などを侵食して、礫や貝

殻などとともに陸上に運び込む(図2-2)。津波が収まった後、津波堆積物が残され、窪地などには特に厚く堆積することがある(図2-3)。津波堆積物が新たな土壌などで速やかに覆われると、侵食から免れて長く残ることがある(図2-4)。

津波堆積物の産状は、藤原ほか(2004)などのまとめでは、海岸低地の池や湿地などの地層から薄いシート状の砂層として検出されることが多い。津波堆積物は、さまざまなサイズの岩やサンゴ礁の破片などを含むこともあり、大きなものは「津波石」と呼ばれる(例えば、河名・中田, 1994)。津波で破壊された建築物の瓦礫も津波堆積物を構成することがある(例えば、Moore *et al.*, 2006)。

津波堆積物は、遡上する津波の流れが減衰する過程を反映して、大局的には海岸から内陸へ薄く細粒になるが、その変化の仕方は地形の凹凸や植生密度などの影響を受けて多様である(例えば、Sato *et al.*, 1995; Gelfenbaum and Jaffe, 2003; 鎌滝・西村, 2005; 藤野ほか, 2006; 海津, 2006)。また、津波堆積物は後年の侵食や生物擾乱で失われることもあり、地層に残される津波の記録は時間的にも空間的にも不完全である。

図1 津波と風波の波長の違い

Fig. 1 Differences in wavelengths between tsunami and wind waves

III. 地震津波堆積物の研究史

図2 津波堆積物の形成過程
藤原(2006)を改変。

Fig. 2 Depositional and preservation process of tsunami deposits
Modified from Fujiwara (2006).

津波堆積物研究の進展を、鍵になった研究の発表時期や津波の発生時期で代表させて、4 つに分けて解説する。

1. 研究の開始と初期の成果 (1980 年代まで)

津波堆積物を古地震の指標に用いる研究は、日本では 1983 年 5 月の日本海中部地震津波を契機に始まった (箕浦ほか, 1987)。箕浦ほか (1987) は青森県十三湖の湖水が流入した海水と反応して白濁したのを観察し、過去の津波も同様の痕跡を湖底の地層に留めていると考えた。湖底の泥層からは、予想通り海水の侵入を示す化合物を多く含む砂層が何枚も見つかり、その一部は年代測定に基づいて古文書にある地震の記録との対応が示された。

これに先立って、日本では 1933 年 3 月の昭和三陸津波、1960 年のチリ津波による堆積物が三陸海岸から報告されている。Nomura and Hatai (1935) は、昭和三陸津波で打ち上げられた 5 種の新種を含む 240 種の貝類を記載した。またこの津波で、海浜の砂が山地斜面の少なくとも標高 24~25 m まで打ち上がったことが報告された (東京帝国大学地震研究所, 1934)。

今野 (1961) は、チリ津波による侵食と堆積の事例を三陸沿岸の多くの地点で観察し、その形態や地理的分布、各地での流入・流出方向などを報告した。彼らは厚い (15~20 cm) 津波堆積物の断面に、砂層とそれを覆う薄い泥質層のセットが何回か累積した構造を見出し、これが繰り返して襲来した大波で堆積したと推定した。

2. 津波堆積物研究の発展 (1990 年代~)

1990 年代には、1993 年北海道南西沖地震津波を始め 10 回もの巨大津波が発生し (Gelfenbaum and Jaffe, 2003)、津波直後の調査によって後述する津波堆積物のさまざまな特徴が解明された。過去の津波堆積物の研究も進み、特に北海道東部の太平洋沿岸では、自然状態の湿地が広く分布する地形的な利点と、地層の年代が泥炭層の ^{14}C 年代測定や火山灰層序から正確に推定できる利点を生かして、精力的な調査が行われた。その結果、過去約 6,500 年間について、内陸奥深くまで最大で 4 km 近くも遡上した超巨大な津波が繰り返して発生したことが判明した (例えば、平川ほか, 2000; Nanayama *et al.*, 2003)。

東北地方でも湖沼堆積物 (Minoura *et al.*, 1994) のほか、仙台周辺の平野から歴史津波の堆積物が報告された (例えば、Minoura *et al.*, 2001; 澤井ほか, 2006)。相模トラフや南海トラフ沿岸では、津波堆積物が保存されやすい広い低地が少ないので、湖沼でピストンコアラなどで採取された試料から歴史・先史時代の津波堆積物がおもに報告されてきた (例えば、岡村ほか, 1997, 2003;

都司ほか, 1998; 岡橋ほか, 2001)。

琉球海溝周辺からは、島嶼に分布する津波石の高度分布と、それが打ち上った年代 (付着したサンゴなどの ^{14}C 年代測定値による) を基に、完新世後期の津波履歴が研究された (例えば、加藤, 1987; 河名・中田, 1994)。これらの研究では、遡上高が最大で 25 m 以上にも達する津波が 500 年から 1,000 年程度の間隔で発生した可能性が示された。

津波堆積物の試料採取には、初期にはピストンコアラなどが用いられたが、定方位試料の得られるジオスライサー (中田・島崎, 1997; 原口ほか, 1998) の開発により、調査効率が上がるとともに堆積構造などの情報も増えた。剥ぎ取り試料は、未固結堆積物の堆積構造の観察に多くの実績があり、津波堆積物にも応用されてきた (七山・重野, 1998)。最近では、親水性のグラウト剤の活用により作業効率が向上し (例えば、Takada and Atwater, 2004)、津波堆積物からさまざまな堆積構造が見いだされている (例えば、藤原ほか, 2006; Fujiwara and Kamataki, 2007)。津波堆積物に見られる堆積構造については、藤原ほか (2004) や Fujiwara (in press) などにまとめられている。

3. 海底堆積物からの発見 (1997 年~)

相模湾周辺では、後氷期の高海面期に堆積した内湾 (溺れ谷) 堆積物から、周辺に分布する海岸段丘の離水と対応する津波堆積物が発見された (藤原ほか, 1997, 1999; Fujiwara *et al.*, 2000)。房総半島南部では隆起・離水した完新世中期の内湾堆積物を露頭で観察でき、津波堆積物の堆積構造 (藤原ほか, 2003a; Fujiwara and Kamataki, 2007) や化石の群集組成 (藤原ほか, 2003b; 阿部ほか, 2004; 内田ほか, 2004; 佐々木ほか, 2007) などが詳しく研究された。

これらの研究によって、入り組んだ内湾が津波堆積物の優れた保存場所であることが実証され、津波堆積物の研究対象が過去と現在の内湾堆積物にまで広がった。原口ほか (2006) は、三陸沿岸の大槌湾を埋め立てた埠頭でボーリングを行い、埋め立て前の海底面 (水深約 10 m) から完新統下部にまで達する地層試料を得た。この内湾泥底の地層には、異地性の貝殻を含む砂層や礫層が突発的に堆積するイベントが、数十年から数百年に 1 回の頻度で繰り返しており、その多くは津波堆積物の可能性が指摘された。

少数ながら、より古い時代の地層からも津波堆積物の報告がある。例えば更新世後期の古東京湾の例 (Mura-koshi and Masuda, 1991) や中部地方の内湾の例 (Taka-

shimizu and Masuda, 2000), 三陸海岸の白亜紀層の例 (Fujino *et al.*, 2006) が代表的である。後二者では、湾内で津波が何度も押し引きを繰り返した様子が堆積構造から復元された。

4. 定量化の時代 (2000 年代～)

津波堆積物から浸水範囲、浸水深、流れの強さなど、災害の規模に関わる情報を定量的に推定する試みは、1990 年代以前から行われてきた (例えば Minoura *et al.*, 1997)。こうした研究は、北海道東部での事例 (例えば 平川ほか, 2000; Nanayama *et al.*, 2003) や、スマトラ島沖地震津波を契機に急速に進展している。

堆積物からそれを形成した津波の水理量を復元できれば、過去に発生した津波の規模の推定に役立つが、そのための有力な指標は見つかっていない。例えば、津波の規模と堆積物の層厚の間には明瞭な関係が認められず、波高 (あるいは浸水深) が数 m 以上あっても、堆積物の層厚は数 cm からせいぜい数十 cm である (首藤, 2007)。2004 年スマトラ島沖地震津波で浸水深が 25 m、流速が 10 m/s 以上と推定されるインドネシアのバンダ・アチェン近くでさえ、堆積物の層厚はせいぜい 80 cm であった (Moore *et al.*, 2006)。

津波の水理量を堆積物の特徴から定量化するには、水路実験やシミュレーションで堆積物の形成を再現し、野外データとの比較から、その形成条件を探る研究が進められている (例えば 福田ほか, 2006; Goto and Imamura, 2007; 今村・後藤, 2007)。

IV. 津波堆積物研究のおもな成果

津波堆積物の調査・研究は、津波の発生直後に行われる場合と、地層中の津波堆積物を対象とする場合では目的や方法が異なるので、両者の成果などを分けて述べる。また、古津波研究の基本的かつ未解決の問題である津波堆積物の識別方法について、現状の到達点を述べる。

1. 津波の発生直後の調査

津波直後の調査は、津波の遡上範囲、遡上高、流向などの復元や、津波による侵食・堆積のプロセスの推定などを目的として行われ、津波の高さ (実際には遡上高や遡上範囲) などについて、検潮記録に比べて空間的に密度が高い情報が得られる利点がある。津波イベントから時間がたつほど、気候条件や復興作業などによってベッドフォームや内部構造など、堆積物の持つ情報、あるいは津波堆積物自体が急速に失われるので、津波直後に得られる「生の情報」は貴重である。

津波による侵食と堆積の分布パターンを見ると、海岸近傍では侵食痕だけで堆積はほとんどなく、海岸から数十 m から 100 m 程度内陸に入った場所から堆積が始まり、津波堆積物は内陸へと次第に薄くなる。こうした事例は、1960 年チリ津波 (今野, 1961)、1993 北海道南西沖地震津波 (Sato *et al.*, 1995)、1998 年バプアニューギニア津波 (Gelfenbaum and Jaffe, 2003)、2004 年スマトラ島沖地震津波 (例えば, Moore *et al.*, 2006; 海津, 2006) などで記載されている。また、引き波による戻り流れは陸から海岸へと加速されるので、特に流れが集中するチャンネルでは大きな洗掘が起こる (例えば, 海津, 2006)。この洗掘については首藤 (2007) が詳しく論じている。

堆積物がどの程度の水深の海底から運ばれて来たかを、津波で海岸に打ち上がった生物遺骸から推定した例が少数ながらある。その水深は、1933 年三陸津波では 10 m 前後 (貝類が指標: Nomura and Hatai, 1935)、スマトラ島沖地震津波では 30 m 以浅 (有孔虫が指標: 藤野ほか, 2006) と浅いが、1993 年北海道南西沖地震津波では数十 m 以深に棲む有孔虫の遺骸も認められた (Nanayama and Shigeno, 2006)。堆積物が由来した場所や運搬距離の差異は、堆積場周辺の地形条件、生物や地質の分布状況などによると推定されるが、詳しい議論には今後のデータ増加が待たれる。この問題は内田ほか (2007) が詳しく論じている。

津波の遡上限界を推定する際に、津波堆積物や漂着物の陸側の分布限界がしばしば指標とされる。しかし、いくつかの事例では、津波堆積物の分布が実際の津波の遡上限界とは一致しないことを示している (例えば, Nishimura and Miyaji, 1995; Gelfenbaum and Jaffe, 2003; Moore *et al.*, 2006)。津波は津波堆積物の分布限界を超えて陸側まで遡上しており、実際の遡上限界は漂着物 (木屑や植物片など) の集積帯で示される。例えば 1993 北海道南西沖地震津波の場合、漂着物が示す津波の遡上限界は砂質の津波堆積物の分布限界より約 1 m 高い (Nishimura and Miyaji, 1995)。砂質の津波堆積物は遡上限界の最小値を近似的に示している。

2. 過去の津波堆積物の調査

地層中の津波堆積物からは、過去に起こった津波の特徴 (再来間隔や規模など) を復元し、それに基づいて将来の防災対策を考えることもできる。海溝型地震の繰り返し間隔は 100 年前後と人間の一生に比べて長く、地震や津波の記憶や経験は次の地震・津波までに薄れてしまう。また、陸上の活断層と異なり、原因となった断層を直接

に観察することは難しい。津波堆積物は、地震計や検潮儀、あるいは古文書に代わって、地震・津波の履歴と特徴を解析するデータを提供する。地層記録は不完全・不連続ながら非常に長期間をカバーしているので、稀にしか発生しない巨大津波でも、かなりの事例を集めることができる。

北海道東部では現世の事例と同様に、津波堆積物を海岸から内陸へと追跡して分布限界を調べ、津波の遡上限界が推定された。そして、歴史上知られている地震津波に比べて遡上距離が数倍も大きい超巨大津波が 300～500 年の再来間隔で繰り返し発生したことがわかった（例えば、平川ほか, 2000; Nanayama *et al.*, 2003）。この地域では、完新世の津波堆積物が後期更新世の段丘を覆っている事例があり、津波の波高が段丘崖の高さを越えたことがわかる（平川ほか, 2000, 2005）。17 世紀の超巨大津波の波高は、場所によっては 15 m 以上もあったと推定されている（平川ほか, 2005）。

東北地方の太平洋岸でも、歴史上の津波より非常に大きな津波の存在が、堆積物の研究から知られている。西暦 869 年の貞観津波による堆積物は、場所によっては当時の海岸線から 2 km 以上も遡上しており、この津波が明治や昭和の三陸津波よりかなり大規模であったことを示している（例えば、澤井ほか, 2006）。

相模・駿河・南海トラフ沿岸では、合計 15 ヶ所程度の

低地から津波堆積物が報告されており、疑わしいものも含めると、相模トラフでは過去約 1 万年、駿河・南海トラフでは 3,000 年以上にわたる津波の履歴が復元されつつある。しかし、再来間隔や震源を推定するには、データの密度が空間的にも時間的にも不足しており、さらなる調査が必要である。この地域についての詳細は、小松原ほか (2006)、Komatsubara and Fujiwara (2007) が記述している。

3. 津波堆積物と他のイベント堆積物の識別

津波の波長と周期は、ストームなどの風波に比べて 100 倍以上も長いので、その違いが堆積物にも反映されているはずである。このことに注目して、藤原ほか (2003a)、藤原 (2004) は、南関東の完新世の内湾（水深 10 m 程度）の地層の研究から津波の堆積モデルを考案した。Fujiwara and Kamataki (2007) は、この堆積モデルを改良し、津波が内湾に侵入していく過程で、湾口から湾奥へとどのような堆積物が残されるかを示した。また、この堆積モデルは、遡上した津波堆積物にも適用できることが、1703 年元禄関東地震津波堆積物の研究を通じてわかってきた (Fujiwara *et al.*, 2005; 藤原ほか, 2006)。改良された堆積モデルを図 3 で説明する。

図 3-A は、津波堆積物の模式的な堆積モデルで、水底と陸上の両方に適用できる。これには次に示す津波の 3 つの特徴が反映されている。津波の波形を模式的に示す

図 3 津波の波形を考慮した模式的な堆積モデル

A : 累積構造が完全に保存された場合の津波堆積物の堆積モデル, B : 津波波形,

C : 1 回の押し波・引き波のサイクルによる堆積プロセス。

Fig. 3 Schematic tsunami depositional model considering the tsunami waveform
A : Depositional model showing a whole succession of tsunami deposit, B : Tsunami waveform, C : Depositional process in a cycle of up- and return-flow.

と図3-Bのようで、第1の特徴は波同士の間隔(周期)が長く、一つ一つの波が「独立」している。堆積モデルでは、津波堆積物はマッドドレイプで区切られ「独立」した堆積ユニットの重なりからなる。

津波波形の第2の特徴は、波長が非常に長いことで、押し波(図中の奇数)と引き波(偶数)は、それぞれ陸側と海側へ向かう強い流れを沿岸に起こす。堆積モデルに含まれる個々の堆積ユニットは、流れから堆積したことを示す堆積構造を含み、流れの減衰を反映して上方細粒化している。また、押し波と引き波による堆積ユニットが交互に重なっている。

波形の第3の特徴は、波の反射や干渉などのために、2番目または3番目の押し波がしばしば最大となることである。堆積モデルでは、中部に挟まる堆積ユニットが最も粗粒で厚く、そこから上位へと津波の減衰に対応して細粒で薄い堆積ユニットが重なる。津波の収まった後には、浮かんでいた木片などがゆっくりと沈んで、津波堆積物の最上部に重なる。

図3-Cは、図3-Aに含まれる押し波と引き波の一セットの堆積物の形成プロセスで、左から右へと時間の経過に沿って並べた。この図では最初の堆積ユニットは、押し波による流れが減衰する過程で形成され、上部ほど弱い流れで形成された堆積構造(リップルなど)が見られる。押し波が収まって引き波が始まるまでの間に、浮遊物が降下してマッドドレイプができる。引き波が始まると次第に海側への流れが強まり、下位の地層の一部を侵食する。流れが収まる過程で次の堆積ユニットが形成される。

個々の堆積ユニットの形成プロセスは、津波堆積物の識別にも重要な情報なので、図4でもう少し詳しく説明する。個々の堆積ユニットは、流れの減衰過程で堆積した堆積構造を持つこと、次の流れの発生までに時間間隔があることを示すマッドドレイプ(またはそれに相当する浮遊物の集積層)に覆われることが重要な特徴である。また、陸上で堆積した津波堆積物では、陸側への細粒化・薄層化を示す。

図4-Aは内湾底での津波による堆積の例である。内湾に到達した津波は、周辺からさまざまなサイズの物質を取り込んで、それらが混合した流れを起こす。津波が湾奥へ侵入して流速が減少しはじめると、流れが支えて運べる粒子の全容量(Capacity: Hiscott, 1994)が減少し、運びきれなくなった粗い粒子が順次堆積して津波堆積物が形成される。この過程で、流れの強さと粒子サイズに応じた堆積構造(プレーンベッド、各種の斜交層理、

リップル葉理など)が形成される。津波が最も内陸まで進入した段階では、流速が急減するため“Capacity”も急減し、多量の浮遊物が沈殿してマッドドレイプが形成される。

図4-Bは遡上した津波堆積物の例で、津波の遡上過程で流速の減衰と同時に、特に内陸側で水深も急減する点が図4-Aと異なる。流速と水深の減少によって流れの“Capacity”が陸側でより減少することが、陸側へ薄層化・細粒化する堆積物を形成する主因と考えられる。

ここに示した津波による堆積モデルは、本来きわめて複雑な津波による侵食、運搬、堆積作用を単純化して示したので、異論があるかもしれない。また、図3-Aに示した累積構造がすべて形成・保存されることは稀である。しかし、図3-Aが一つの理想的構造であること、それに堆積・保存条件によるバリエーションや変形が生じることを承知していれば、この堆積モデルは津波堆積物の識別に有用である。

一方、周期の短い風波では図3のようなマッドドレイプで区切られて押し波、引き波が繰り返す累積構造は形成されにくい。ストーム波の周期は内湾では数秒、外洋でもせいぜい20秒足らずであり、水底では次々と訪れる波で侵食と堆積が絶えず繰り返している。

内部に上方細粒化する複数の堆積ユニットが重なる構造は、水中土石流(Sohn, 2000)や、洪水堆積物の一種であるハイパーピクナル流堆積物(Hyperpycnite sequences: 例えば, Mulder *et al.*, 2003; 齋藤ほか, 2005)にも見られ、津波堆積物との識別に注意が必要である。特に後者は、洪水流量の増減に応じた複数の粗粒・細粒の堆積層が侵食面で区切られて累積し、図3-Aとよく似た構造を持つ。しかし、両者とも重力流から堆積したもので、古流向のサイクリックな反転が見られない点などで、津波堆積物とは異なる。このように、津波堆積物の解釈には、堆積場の環境や流れの特徴に関する考察も欠かせない。

図3-Aが津波堆積物の基本的なモデルとして有効であることを支持するデータとして、津波堆積物が何枚かの級化する堆積ユニットからなり、その枚数が目撃記録や検潮記録から復元された堆積場周辺での主要な波の来襲回数と、かなりよく一致する例がある。それらは、1929年グランドバンクス地震津波(Tuttle *et al.*, 2004)、1960年チリ津波(今野, 1961)、1964年アラスカ地震津波(Carver and McCalpin, 1996; Clague *et al.*, 2000)、1993年北海道南西沖地震津波(Nanayama *et al.*, 2000)、1998年バプアニューギニア津波(Gelfenbaum and Jaffe,

図 4 津波による堆積プロセス（押し波の場合で代表）

A：内湾底に堆積した津波堆積物，B：遡上した津波堆積物。

津波堆積物の形成はおもに、津波が起こした流れが減衰する過程で、流れが支えて運べる全粒子の量（キャパシティ）が減少することに起因している。

Fig. 4 Depositional process by tsunami wave (a case of up-flow)

A : Bay floor, B : On land.

Deposition from tsunami waves is controlled mainly by decreasing capacity of the decelerating flow to carry particles of all sizes in inundation process.

2003), 2004 年スマトラ島沖地震津波 (例えば, Moore *et al.*, 2006 ; 海津, 2006) である。上記のグランドバンクス地震津波堆積物やチリ津波堆積物では、堆積ユニットを区切るマッドドレイプも見られる。

この堆積モデルを層厚、粒度、堆積構造などバリエー

ションの広い津波堆積物に適用できるように改良していくには、さまざまな条件での再現実験が必要であり、それは水路実験や数値シミュレーションとの連携によって解決されるだろう。

V. 防災面での進歩

地層中の津波堆積物の研究を基礎として、将来発生するイベントの規模をどのように予測し、防災計画に応用していくかを、先に述べた北海道東部の太平洋岸から見つけた巨大津波の例で紹介する。

まず津波堆積物の情報から、この超巨大津波は約 500 年間隔で発生しており、最近の事例は 17 世紀であることが示された(例えば、平川ほか, 2000; Nanayama *et al.*, 2003)。次に、17 世紀の事例について根室から十勝に至る広い範囲で遡上範囲(例えば、平川ほか, 2000; Nanayama *et al.*, 2003)や、波高分布(平川ほか, 2005)が推定された。そして、復元された波高や遡上範囲(浸水範囲)の分布を矛盾なく説明すべく、津波遡上シミュレーションが繰り返され、超巨大な津波の原因は、十勝沖と根室沖の複数の震源域が連動して Mw 8.5 程度の巨大地震が発生したためと推定された(佐竹ほか, 2004; 佐竹・七山, 2004)。これらの一連の成果は、「津波浸水履歴図」として集大成された(佐竹・七山, 2004)。これらの成果を受けて、この「500 年間隔の津波」は、内閣府の中央防災会議によって日本海溝・千島海溝周辺で発生する地震・津波のうち、防災対策の検討対象の 1 つとされた。

他の地域についても、津波堆積物に関するデータの質や密度に差異はあるが、北海道東部と同様に「浸水履歴図」などの作成が今後の目標の一つである。

VI. ま と め

津波堆積物の研究について、その進歩の足跡、おもな成果、残された課題を整理した。津波堆積物は、堆積プロセスを反映してさまざまな堆積構造を持つことがわかってきたが、その記載例はまだ少ない。窪地などに厚く堆積した津波堆積物を対象に、剥ぎ取り試料を作成することで、津波の特徴を示す堆積構造の解読が進むだろう。

津波堆積物から津波の水理量を復元することは、堆積学的な理解の不足と実験やシミュレーション技術の限界の両方があって、まだ難しい。津波堆積物がどのようなベッドフォームや内部構造を持つか、それが水平・垂直方向にどのように変遷するかを記載し、堆積プロセスを時間を追って解読することで、津波による流れの特徴が解明されるだろう。それができて初めて、実験やシミュレーションとの比較が意味を持ってくる。

津波堆積物の研究からはいつ、どこで、どのような地

震や津波が発生したかが解読可能であり、将来の防災・減災のためにそれを生かせるに違いない。しかし、地層の情報だけでは一部の専門家にアピールすることはできても、社会的に認識され、防災に役立つことは少ない。地層や地形の研究と、地震学、津波工学、社会学などの分野が広く連携することで、津波堆積物の持つ重要性和意義が大きく高まると期待される。

謝辞 小論をまとめるに当たり、平川一臣教授(北海道大学)、今村文彦教授(東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター)、後藤和久博士(同)、箕浦幸治教授(東北大学理学部)、志岐常正京都大学名誉教授との議論は有益でした。本論の内容は、産業技術総合研究所活断層研究センターでの日頃の議論からアイデアを得た部分も多い。北海道大学の西村裕一博士からの査読コメントによって本稿は改善されました。

引 用 文 献

- 阿部恒平・内田淳一・長谷川四郎・藤原 治・鎌滝孝信 (2004) 津波堆積物中の有孔虫組成の概要について—房総半島南部館山周辺に分布する完新統津波堆積物を例にして—。藤原 治・池原 研・七山 太編「地震イベント堆積物—深海底から陸上までのコネクション」: 77-86, 地質学論集, 58.
- Atwater, B.F. (1987) Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State. *Science*, 236, 942-944.
- Atwater, B.F., Musumi-Rokkaku, S., Satake, K., Tsuji, Y., Ueda, K. and Yamaguchi, D.K. (2005) The orphan tsunami of 1700; Japanese clues to a parent earthquake in North America. 133 p, U.S. Geol. Surv. in association with University of Washington Press.
- Bryant, E. (2001) *Tsunami: The underrated hazard*. 320 p, Cambridge University Press.
- Carver, G.A. and McCalpin, J.P. (1996) *Paleoseismology of compressional tectonic environments*. McCalpin, J.P. (ed.) *Paleoseismology*: 183-270, Academic Press.
- Clague, J.J., Bobrowsky, P.T. and Hutchinson, I. (2000) A review of geological records of large tsunamis at Vancouver Island, British Columbia, and implications for hazard. *Quaternary Science Reviews*, 19, 849-863.
- 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. *Sedimentary Geology*, 187, 127-138.
- 藤野滋弘・松本 弾・成瀬 元・藤田和彦・Suphawajruksakul, A.・Jarupongsakul, T. (2006) 陸上津波堆積物の堆積構造と堆積過程—タイ南西部におけるインド洋津波の例—。月刊地球, 28, 558-562.
- 藤原 治 (2004) 津波堆積物の堆積学的・古生物学的特徴。藤原 治・池原 研・七山 太編「地震イベント堆積物—深海底から陸上までのコネクション」: 35-44, 地質学論集, 58.
- 藤原 治 (2006) 津波堆積物からわかる過去の巨大地震。産業技術総合研究所編「きちんと分かる巨大地震」: 144-153, 白日社.
- Fujiwara, O. (in press) Bedforms and sedimentary structures characterizing tsunami deposits. Shiki, T., Tsuji, Y., Yamazaki, T. and Minoura, K. (eds.) *Tsunamiites—Features and implications* : 51-62, Elsevier.
- 藤原 治・平川一臣・入月俊明・鎌滝孝信・内田淳一・阿部恒平・長谷川四郎・高田圭太・原口 強 (2006) 1703 年元禄・1923 年大正関東地震に伴う房総半島南西岸の館山浜堤平野システムの発達過程。第四紀研究, 45, 235-247.
- 藤原 治・池原 研・七山 太編 (2004) 地震イベント堆積物—深海底から陸上までのコネクション—. 169 p, 地質学論集, 58.
- Fujiwara, O. and Kamataki, T. (2007) Identification of tsunami deposits considering the tsunami waveform : An example of subaqueous tsunami deposits in Holocene shallow bay on southern Boso Peninsula, central Japan. *Sedimentary Geology*, 200, 295-313.
- 藤原 治・鎌滝孝信・布施圭介 (2003b) 津波堆積物中の混合貝類化石群の形成プロセス—南関東における完新世の内湾の例—. 第四紀研究, 42, 389-412.
- Fujiwara, O., Kamataki, T., Hirakawa, K., Irizuki, T., Uchida, J., Abe, K. and Hasegawa, S. (2005) Tsunami waveform of the AD1703 Kanto earthquake reconstructed from the deposit. 2005 AGU Fall Meet., Program & Abst., T11A-0351.
- 藤原 治・鎌滝孝信・田村 亨 (2003a) 内湾における津波堆積物の粒度分布と津波波形との関連—房総半島南端の完新統の例—. 第四紀研究, 42, 67-81.
- 藤原 治・増田富士雄・酒井哲弥・布施圭介・斎藤 晃 (1997) 房総半島南部の完新世津波堆積物と南関東の地震隆起との関係。第四紀研究, 36, 73-86.
- 藤原 治・増田富士雄・酒井哲弥・入月俊明・布施圭介 (1999) 過去 10,000 年間の相模トラフ周辺での古地震を記録した内湾堆積物。第四紀研究, 38, 489-501.
- Fujiwara, O., Masuda, F., Sakai, T., Irizuki, T. and Fuse, K. (2000) Tsunami deposits in Holocene bay mud in southern Kanto region, Pacific coast of central Japan. *Sedimentary Geology*, 135, 219-230.
- 福田裕司・後藤和久・今村文彦・越村俊一 (2006) 津波による土砂移動の水理実験と数値解析の現状。月刊地球, 28, 563-567.
- Gelfenbaum, G. and Jaffe, B. (2003) Erosion and sedimentation from the 17 July, 1998 Papua New Guinea Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 1969-1999.
- Goto, K. and Imamura, F. (2007) Numerical models for sediment transport by tsunamis. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, 46, 463-475.
- 原口 強・中田 高・島崎邦彦・今泉俊文・小島圭二・石丸恒存 (1998) 未固結堆積物の定方位連続地層採取方法の開発とその応用。応用地質, 39, 306-314.
- 原口 強・鳥居和樹・藤原 治・島崎邦彦・今泉俊文 (2006) 東北地方三陸沿岸、大槌湾の津波堆積物。月刊地球, 28, 539-545.
- 平川一臣・中村有吾・越後智雄 (2000) 十勝地方太平洋沿岸地域の巨大古津波。月刊地球, 号外 31, 92-98.
- 平川一臣・中村有吾・西村裕一 (2005) 北海道太平洋岸の完新世巨大津波—2003 十勝沖地震津波との比較を含めて—. 月刊地球, 号外 49, 173-180.
- Hiscott, R.N. (1994) Loss of capacity, not competence, as the fundamental process governing deposition from turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, A64, 209-214.
- 今村文彦 (1996) 津波の数値シミュレーションと可視化技術。なかれ (日本流体力学会誌), 15, 376-383.
- 今村文彦・後藤和久 (2007) 過去の災害を復元し将来を予測するためのアプローチ—津波研究を事例に—. 第四紀研究, 46, 491-498.
- 鎌滝孝信・西村裕一 (2005) 2004 年スマトラ島沖地震津波調査報告。地学雑誌, 114, 78-82.
- 加藤祐三 (1987) 八重山地震津波 (1771) の遡上高。地震第 2 輯, 40, 377-381.

- 河名俊男・中田 高 (1994) サンゴ質津波堆積物の年代からみた琉球列島南部周辺海域における後期完新世の津波発生時期. 地学雑誌, 103, 352-376.
- Komatsubara, J. and Fujiwara, O. (2007) Overview of Holocene tsunami deposits along the Nankai, Suruga and Sagami Troughs, southwest Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 493-507.
- 小松原純子・藤原 治・鎌滝孝信 (2006) 南海・駿河および相模トラフ沿岸域における津波堆積物. 歴史地震, 21, 93-109.
- 今野円蔵編 (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. 40 p, 13 plates, 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, 52.
- 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. *Journal of Natural Disaster Science*, 23, 83-88.
- Minoura, K., Imamura, F., Takahashi, T. and Shuto, N. (1997) Sequence of sedimentation processes caused by the 1992 Flores tsunami : Evidence from Bali Island. *Geology*, 25, 523-526.
- 箕浦幸治・中谷 周・佐藤 裕 (1987) 湖沼底質堆積物中に記録された地震津波の痕跡—青森県市浦村十三付近の湖沼系の例—. 地震第2輯, 40, 183-196.
- Minoura, K., Nakaya, S. and Uchida, M. (1994) Tsunami deposits in a lacustrine sequence of the Sanriku coast, northeast Japan. *Sedimentary Geology*, 89, 25-31.
- Moore, A., Nishimura, Y., Gelfenbaum, G., Kamataki, T. and Triyono, R. (2006) Sedimentary deposits of the 26 December tsunami on the northwest coast of Aceh, Indonesia. *Earth Planets Space*, 58, 253-258.
- Mulder, T., Syvitski, J.P.M., Migeon, S., Faugeres, J.-C. and Savoye, B. (2003) Marine hyperpycnal flows : initiation, behavior and related deposits. A review. *Marine and Petroleum Geology*, 20, 861-882.
- Murakoshi, N. and Masuda, F. (1991) A depositional model for a flood-tidal delta and washover sands in the late Pleistocene Paleo-Tokyo bay, Japan. Smith, D.G., Reinson, G.E., Zaitlin, B.A. and Rahmani, R. (eds.) *Clastic tidal sedimentology* : 219-226, Canadian Society of Petroleum Geologists. Memoir, 16.
- 中田 高・島崎邦彦 (1997) 活断層研究のための地層抜き取り装置 (Geo-slicer). 地学雑誌, 106, 59-69.
- 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.
- 七山 太・重野聖之 (1998) Lunch box と速乾性ボンドを用いた未固結砂礫の定方位試料作成法. 地質ニュース, 523, 52-56.
- Nanayama, F. and Shigeno, K. (2006) Inflow and outflow facies from the 1993 tsunami in southwest Hokkaido. *Sedimentary Geology*, 187, 139-158.
- Nanayama, F., Shigeno, K., Satake, K., Shimokawa, S., Koitabashi, S., Miyasaka, S. and Ishii, M. (2000) Sedimentary differences between the 1993 Hokkaido-nansei-oki tsunami and the 1959 Miyakojima typhoon at Taisei, southwestern Hokkaido, northern Japan. *Sedimentary Geology*, 135, 255-264.
- Nishimura, Y. and Miyaji, N. (1995) Tsunami deposits from the 1993 southwest Hokkaido earthquake and the 1640 Komagatake eruption, northern Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 144, 719-733.
- Nomura, S. and Hatai, K. (1935) Catalogue of the shell-bearing mollusca collected from the Kesen and Motoyosi Districts, northeast Honshu, Japan, immediately after the Sanriku Tsunami, March 3, 1933, with the descriptions of five new species. Saito Ho-on Kai Museum Research Bulletin, 5, 1-47.
- 岡橋久世・吉川周作・三田村宗樹・兵頭政幸・内山 高・内山美恵子・原口 強 (2001) 鳥羽市相差の湿地堆積物中に見いだされた東海地震津波の痕跡とその古地磁気年代. 第四紀研究, 40, 193-202.
- 岡村 眞・栗本貴生・松岡裕美 (1997) 地殻変動のモニターとしての沿岸・湖沼堆積物. 月刊地球, 19, 469-473.
- 岡村 眞・都司嘉宣・宮本和哉 (2003) 沿岸湖沼堆積物に記録された南海トラフの地震活動. 月刊海洋, 35, 312-314.
- 齋藤 有・田村 亨・増田富士雄 (2005) タービダイト・パラダイムの革新的要素としてのハイパーピクナル流とその堆積物の特徴. 地学雑誌, 114, 687-704.
- 佐々木裕美・入月俊明・阿部恒平・内田淳一・藤原 治 (2007) 房総半島館山市巴川流域にみられる完新世津波堆積物および静穏時内湾堆積物中の貝形虫化石群

- 集. 第四紀研究, 46, 517-532.
- Satake, K. ed. (2005) Tsunamis : Case studies and recent developments. 343 p, Advances in natural and technological hazards research, 23, Springer.
- 佐竹健治・七山 太 (2004) 北海道太平洋岸の津波浸水履歴図. 数値地質図 EQ-01 (CD-ROM), 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 佐竹健治・七山 太・山木 滋 (2004) 17 世紀に北海道東部で発生した異常な津波の波源モデル (その 2). 活断層・古地震研究報告, 4, 17-29, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Sato, H., Shimamoto, T., Tsutsumi, A. and Kawamoto, E. (1995) Onshore tsunami deposits caused by the 1993 Southwest Hokkaido and 1983 Japan Sea Earthquakes. Pure and Applied Geophysics, 144, 693-717.
- 澤井祐紀・穴倉正展・岡村行信・アオン タン ティン・松浦旅人・高田圭太・藤井雄士郎・佐竹健治 (2006) 仙台平野を襲った巨大津波の浸水履歴. 日本地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集, S208-009.
- Shiki, T., Cita, M.B. and Gorsline, D.S. eds. (2000) Seismoturbidites, seismites and tsunamiites. 326 p, Sedimentary Geology, 135.
- 首藤伸夫 (2007) 津波による地形変化の実例と流体力学的説明の現状. 第四紀研究, 46, 509-516.
- Sohn, Y.K. (2000) Depositional processes of submarine debris flows in the Miocene fan deltas, Pohang Basin, SE Korea with reference to flow transformation. Journal of Sedimentary Research, 70, 491-503.
- Takada, K. and Atwater, B.F. (2004) Evidence for liquefaction identified in peeled slices of Holocene deposits along the lower Columbia River, Washington. Bulletin of the Seismological Society of America, 94, 550-575.
- Takashimizu, Y. and Masuda, F. (2000) Depositional facies and sedimentary successions of earthquake-induced tsunami deposits in Upper Pliocene incised valley fills, central Japan. Sedimentary Geology, 135, 231-240.
- 東京帝国大学地震研究所 (1934) 昭和 8 年 3 月 3 日三陸地方津浪に関する論文及報告. 271 p, 東京帝国大学地震研究所彙報, 別冊 1.
- 都司嘉宣・岡村 眞・松岡裕美・村上嘉謙 (1998) 浜名湖の湖底堆積物中の津波痕跡調査. 歴史地震, 14, 101-113.
- Tuttle, M.P., Anderson, T. and Jeter, H. (2004) Distinguishing tsunami from storm deposits in eastern North America : The 1929 Grand Banks Tsunami versus the 1991 Halloween Storm. Seismological Research Letters, 75, 117-131.
- 内田淳一・阿部恒平・長谷川四郎・藤原 治 (2007) 有孔虫殻にもとづく遡上型津波堆積物の供給源の推定とその流体力学的検証. 第四紀研究, 46, 533-540.
- 内田淳一・阿部恒平・長谷川四郎・藤原 治・鎌滝孝信 (2004) 有孔虫殻の淘汰作用からみた津波堆積物の形成過程—房総半島南部館山周辺に分布する完新統津波堆積物を例に—. 藤原 治・池原 研・七山 太編「地震イベント堆積物—深海底から陸上までのコネクション」: 87-98, 地質学論集, 58.
- 海津正倫 (2006) タイ国 Nam Khem 平野における津波の流動と津波堆積物. 月刊地球, 28, 546-552.

Seismic Tsunami Deposits : Major Advances over the Last 20 Years and Remaining Problems

Osamu Fujiwara*

Studies of tsunami deposits have greatly progressed, both in the earth sciences and in disaster prevention technology, during the last 20 years. Understanding of tsunami depositional processes has been advanced by both field surveys (including sedimentological and paleontological research) and numerical experiments using computers and flumes.

The long-term recurrence history of tsunamis reconstructed from the geological record contributes to estimating future events and mitigating earthquake and tsunami disasters. Tsunami histories, about 7,000 to 10,000 years long for eastern Hokkaido and the Sagami Trough, and over 3,000 years long for the Nankai Trough, have been reconstructed from the geological

records. Linkage of tsunami deposits, as indicators of tsunami height and inundation limits, and numerical tsunami simulations lead to progress in the use of fault models and estimation of tsunami inundation areas.

However, identification of tsunami deposits from other events, such as storms, is problematic, and accurate records of tsunami deposits are still few. Quantitative evaluation of tsunami wave heights, flow speeds, and inundation limits from their deposits will be the major targets for promoting the public use of paleo-tsunami data. Wide collaboration across various fields, such as geology, seismology, tsunami engineering, economics, and social science, will contribute to progress.

Keywords : recurrence history, subduction-zone earthquake, tsunami deposits, disaster prevention

* Active Fault Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, 305-8567, Japan. E-mail : o.fujiwara@aist.go.jp