

海底の地震・津波堆積物

— 巨大地震・津波による海底の擾乱と 擾乱記録を用いた巨大地震・津波履歴の解明 —

池原 研*、宇佐見 和子

巨大地震や津波は海底にも擾乱を与える。2011年東北地方太平洋沖地震以降の海底調査はこの地震と津波が沿岸域から海溝底に渡る広い海底に大きな影響を与えたことを示した。地震や津波による擾乱によって発生した混濁流から堆積したタービダイトの形成も認められている。タービダイトが堆積物中に保存される環境であれば、海底堆積物中のタービダイトを用いた巨大地震や津波の発生履歴の検討が可能である。混濁流の発生場所や発生原因、流下経路の検討やタービダイトを用いた地震・津波の発生履歴研究用の試料の適切な採取場所の選択にはその基礎となる海底表層堆積物データや試料が有用であり、網羅的な海洋地質情報の整備が重要である。

キーワード: 海底堆積物、海底環境、擾乱、地震、タービダイト、海洋地質図

Submarine earthquake- and tsunami-induced event deposits

—Disturbance of the sea floor by huge earthquakes and their related tsunamis,
and the use of disturbance records in marine sediments for the history of past huge earthquakes and tsunamis—

Ken IKEHARA* and Kazuko USAMI

Huge earthquakes and tsunamis have agitated and disturbed the sea floor. Many marine geological surveys after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake indicated large disturbances of the sea floor by the earthquake and its related tsunami across a wide area from the coastal to the Japan Trench floor. Resuspension of marine surface sediment by the earthquake and tsunami might generate turbidity currents. Deposition of turbidites, which are deposits from turbidity currents, has been recognized. Therefore, earthquake- and tsunami-induced turbidite is a potential tool for understanding the history of past huge earthquakes and tsunamis. For the estimation of the origin and evolution of earthquake- and tsunami-induced turbidity currents and the selection of suitable locations for turbidite paleoseismology, marine geological information such as samples and characteristics of surface sediments and their depositional mode is useful and important.

Keywords: Marine sediment, sea floor environments, turbulence, earthquake, turbidite, marine geological map

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）とそれに伴う巨大津波では、東北地方太平洋沿岸を中心とした東日本～北海道の沿岸域に大きな被害が発生した。また、想定外と言われたこの地震・津波も地層記録から見るとその先例があったことが陸域の津波堆積物からわかっており^[1]、地層記録の解読が巨大地震・津波の履歴の理解に重要であることが改めて認識された。一方で、地層記録の解析結果が防災計画に十分に活かされていなかった問題点も指摘された^[2]。陸上の津波堆積物の一部には通常時や嵐の時の波浪では移動不可能な水深域に由来する粒子が入っていることがあり^[3]、津波により海

底堆積物が擾乱され、陸上に打ち上げられることがあることは間違いないと考えられる。実際、後述する2011年以降の東北沿岸から沖合域の調査観測の結果によれば、仙台湾から三陸、八戸沖の沿岸・陸棚域をはじめ、三陸沖前弧斜面域から日本海溝底まで広い範囲で海底堆積物の再懸濁や再移動・再堆積現象が報告されている^[4-9]。このことは、このような再堆積現象が残される場であれば、海底においても陸上の津波堆積物と同様に、過去の巨大地震・津波が地層記録として残され、履歴解読に利用できる可能性を示唆している。そして実際に日本海溝底堆積物の記録から過去の地震発生履歴が陸上の津波堆積物記録との比較を踏まえて検討されてきている^[7]。

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7

Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan * E-mail: k-ikehara@aist.go.jp

Original manuscript received September 14, 2017, Revisions received November 16, 2017, Accepted November 17, 2017

一方、海岸から沿岸域は構造物の建設や漁業、レジャー等に人間が利用するなど、人間生活に密接に関係する場である。さらに、より沖合の陸棚から上部斜面の水深帯でも漁業活動は行われており、海岸から沖合までの海底環境が地震・津波によりどのように変化するかを知っておくことは地震・津波がこれらの人間活動に影響を与えるかの推測に重要である。しかし、海底環境がある地震・津波イベントによってどのように変わったか、またその後どう回復したかを具体的に示した例は数少ない。

ここでは、2011年東北沖地震・津波後の研究の現状を踏まえ、地震・津波による海底の擾乱やそれに伴う海底堆積物の再懸濁・再堆積の過程をまとめる。そして、地震時に形成される堆積物（以後、地震イベント堆積物と呼ぶ）を用いた地震発生履歴研究の現状について概観した後、これらをより正確に理解するための基礎情報としての海底堆積物情報の整備の重要性を指摘したい。その上で、海底堆積物中の地震・津波記録を用いた履歴研究で今後行うべきことに言及する。

2 地震・津波による海底堆積物の再移動・再懸濁・再堆積と海底環境の変化

地震による海底での大規模な土砂輸送現象の存在は、北米大西洋岸での1929年グランドバンクス地震（マグニチュード7.2）の際に明らかとなった。この地震では海底斜面に複数敷設された海底ケーブルが次々に切断され、海底斜面崩壊に伴う混濁流の発生が推定された^[10]。混濁流とは土砂粒子が混ざった海水の流れの乱流で粒子を維持しながら重力的に斜面を流れ下る重力流^[11]である（図1A）。グランドバンクス地震での混濁流の流速は、海底ケーブル間の距離と切断時間の差から斜面域で最も速く28.4 m/s、沖合の深海平坦面で8.3～6.2 m/s程度と計算されている^[10]。そしてその後、混濁流の流下した範囲からタービダイト（混濁流から堆積した堆積物：図1B）が確認され、地震に伴う海底斜面の崩壊→混濁流の発生と流下→タービダイトの堆積、という一連の現象が発生したことが明らかにされた^[12]。同様な地震時における海底ケーブルの連続的な破断事故は複数報告されており^{[13][14]}、2011年東北沖地震の際にも発生している^[15]。また、地震直後の海底調査において震源域周辺の海底面にタービダイトの堆積が報告される例も多く^{[16][18]}、タービダイトの形成原因の一つに地震があることは明らかである。

2011年東北沖地震・津波は海底に大きな影響を与えたことが多くの報告から明らかになっている。まず、津波と地震に伴う地殻変動による海岸線の変化は目視や空中写真、衛星画像から容易に認識でき、地震直後からマスコミ

を含めて多くの報告がなされている。海岸に続く沿岸域の地形変化は仙台湾において浅深測量結果から推定され、海岸域と合わせた堆積物の堆積・侵食量の地理的分布が推定された^[19]。海底堆積物の採取結果は、2011年東北沖地震・津波起源と考えられる堆積物が堆積域と推定された場所で厚く、侵食域と推定された場所で薄いことを示し、浅深測量の結果と堆積物採取の結果が基本的によく一致することがわかった^[20]。仙台湾南部でも高分解能音波探査記録と堆積物コアから海底の津波堆積物の存在が報告されている^[21]。一方、三陸のリアス式海岸を構成する内湾では気仙沼湾の湾口海底において津波による堆積地形の形成が報告されている^[22]ほか、広田湾、越喜来湾、唐丹湾等において津波堆積物の形成があったことがわかっている^[23]。また、女川湾のような泥質の底質からなる湾では津波堆積物は明瞭な砂層となって存在し、これらが堆積後の底生生物の活動により破壊されていく様子が確認されている^[24]。同様な泥層の中に挟在する砂層は仙台湾北部においても2011年の地震以前に報告され、嵐起源の砂層とされてきた^[25]。しかし、2011年以降の調査結果を踏まえると、少なくともその一部は津波起源の砂層である可能性が高い。仙台湾外側の陸棚では、混濁流の繰り返しにより形成された堆積層が報告されている^[6]。ここで確認された一連の細粒タービダイトは、その下部がセシウム134を含まない細粒タービダイト、上部がセシウム134を含む細

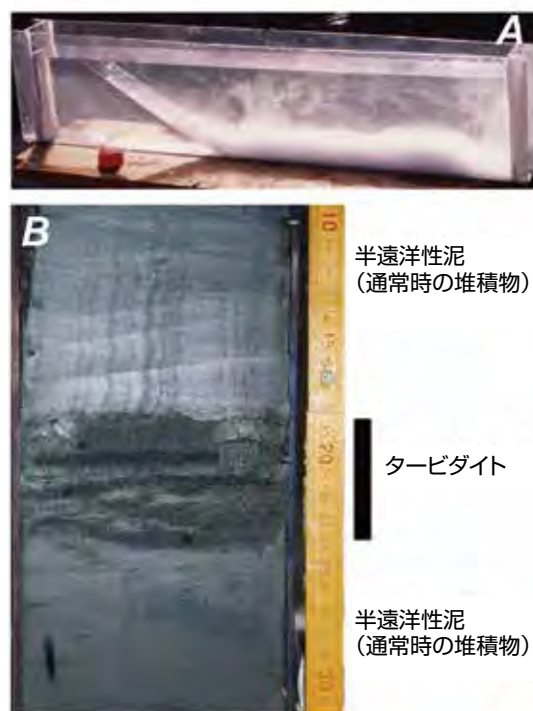


図1 水槽で作られた混濁流(A)と海底堆積物コア中に見られる混濁流からの堆積物であるタービダイト(B)

粒タービダイトの2階建構造からなっており（図2A、B）、下部は地震・津波直後、上部は福島第一原発事故後の地震・津波から少なくとも数日後に堆積したものと考えられている。このことは、詳細は不明であるが地震・津波後の数日あるいは数十日に渡って仙台湾内は堆積物が懸濁した環境下であり、本震に引き続き余震等でも混濁流が発生したことを示唆する。浅海域における堆積物の移動・再堆積現象は震源域に近い仙台湾や三陸沖に限らない。Toyofuku *et al.*^[8] は八戸沖において水深 200 m 付近まで堆積物の再移動現象が起きたことを報告した。津波は広範囲に波及するので、その海底への影響域も広範囲に渡ったと推定できる。三陸沖では陸棚付近の堆積物がより沖合の水深約 900 m の深海域まで輸送されたことが堆積物中に含まれる底生有孔虫の分析から明らかになった^[26]。興味深いのは、ここでのタービダイトも2階建構造を有し、下位のタービダイトは近傍のほぼ同じ水深帯を起源に持つのに対し、上位の最表層部分のタービダイトのみが浅海の底生有孔虫を含むということである。そしてこれは、下位のタービダイトは地震による擾乱により、上位のタービダイトは引き続き津波による浅海域での擾乱により形成されたものと解釈された。すなわち、一連に見える堆積層であっても地震とそれに引き続き津波という異なる複数の堆積プロセスから形成されたものであることを示す。このような浅海域からもたらされた混濁流は海底に設置された観測機器を押し流し、また測器中に泥を混入させるなどでトラブルを引き起こした^[5]^[27]。このように震源域近傍だけでなく、津波が遡上した広範囲の陸域の沖合の浅海域に擾乱を起こすのが、巨大津波の特徴と言える。

2011年東北沖地震・津波の影響は浅海域にとどまらない。Noguchi *et al.*^[28] は前弧斜面域で底層水が濁っていることを報告した。Arai *et al.*^[5] は前弧斜面域の水深約 1000 m で津波起源の混濁流の流下を報告し、Ikehara *et al.*^[29] は外側陸棚から中部斜面の水深 5500 m までの広い範囲の海底表層にイベント堆積物が存在することを示した。McHugh *et al.*^[9] は三陸沖の mid-slope terrace と呼ばれる水深 5000 ~ 6000 m の平坦面上で 2011 年地震・津波起源のイベント層が広く分布することを報告した。さらに、Oguri *et al.*^[4] は日本海溝底でも底層水の懸濁を報告し、海底表層にセシウム 137 や過剰鉛 210 に富むイベント堆積物の堆積を報告した。Ikehara *et al.*^[7] もその近傍の複数の地点から同様の堆積物を確認し、その堆積構造から細粒タービダイトとして堆積したものと結論づけた。

Noguchi *et al.*^[28] や Oguri *et al.*^[4] が 2011 年の地震時に報告した地震時の底層水の懸濁現象は他の地震でも観測されている。Ashi *et al.*^[30] は 2004 年紀伊半島沖地震（マグニチュード 7.4）後の南海トラフ陸側斜面の海盆で底層水の懸濁と海底直上に懸濁物濃度が非常に高い懸濁水の存在を報告し、この厚さを 2 m 程度を推定した。この結果は、約 2 m の深さの泥水の池（泥池と呼ぶ）が海底の凹みに沿って形成され、そこから泥が沈積して地震イベント堆積物を形成するというプロセスの存在を想像させる。さらに Ashi *et al.*^[31] は凹地の面積と泥池の厚さ、凹地に泥を供給し得る斜面の面積から斜面を覆う未固結堆積物の数 cm 程度が再懸濁することでこの泥池が形成できるとした。このように地震動により海底最表層の未固結堆積物が再懸濁して混濁流を発生させることでタービダイトを形成させるプロセ

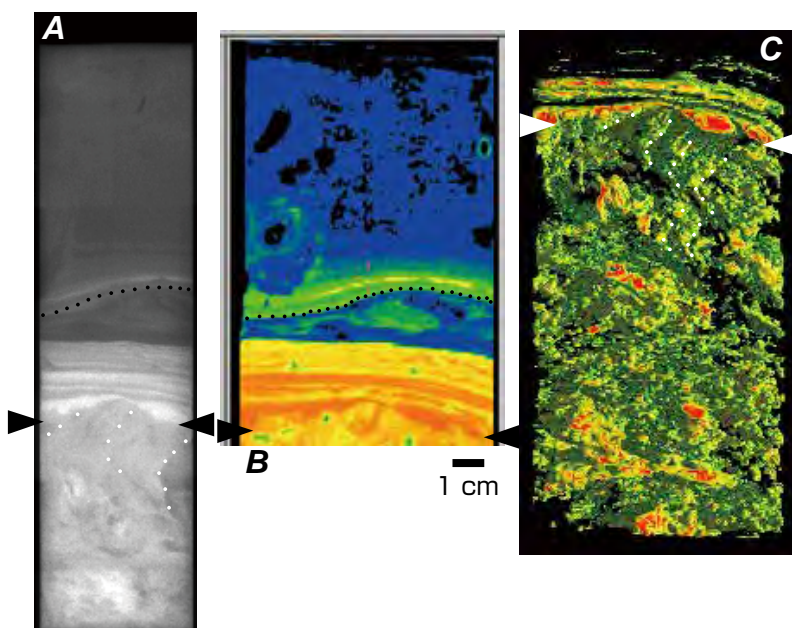


図2 仙台湾で採取された2011年東北沖地震の津波により形成された堆積物（A：軟X線透過画像、B：上部層のX線CT画像、C：下部層のX線CT画像）堆積物は二つのユニットから構成され、上部層（図の矢印より上部）は全体として上方に細粒化する細粒タービダイトからなり、これは内部侵食面（一連の堆積物中に形成される下位の堆積物を削り込む面：黒点線）を境に上部と下部の二つのタービダイトの重なりからなる。上部と下部のタービダイトもそれぞれ上方に細粒化する（砂から泥への粒度変化に対応して、図2Aでは白から黒へ、図2Bではオレンジ・黄色から青へ変化する）。下部層は生物擾乱に富む半遠洋性泥からなるがその上部には地震動による変形構造（白点線）が見られる。X線CT装置では三次元データが非破壊で得られるので地震動変形構造が容易に観察できるが、堆積構造の詳細を観察するにはやや解像度が低い。

ス（図 3B）の存在は、チリの湖のタービダイトの有機物含有量や堆積物の色調測定結果^[32]から、また日本海溝陸側斜面の放射能測定結果^[9]からも言われるようになってきている。では実際に地震動で海底堆積物の再懸濁が発生するか、については、Oguri *et al.*^[33]による三陸沖の継続的海底観察から 2011 年東北沖地震の余震（マグニチュード 7.3）の際に底層水の懸濁と懸濁した粒子の堆積現象が確認されている。図 3A に示したような海底地すべりや水中土石流の末端相としてのタービダイトの堆積は、海底地形図で確認できる多数の海底地すべり様の馬蹄形地形の存在もあり、地震時の海底の斜面崩壊が地震性タービダイトの形成に必須であるという暗黙の前提を研究者に共有させていたかもしれない。しかし表層堆積物の再懸濁プロセスによれば、地震性タービダイトの形成に大きな海底地すべりの発生は必ずしも必要ないことになる。さらに、堆積速度が地震発生頻度に対して十分に大きいならば、地震間に次の地震時に再懸濁し、タービダイトを構成する堆積物を斜面に貯めることができるので、地震の度にタービダイトを形成することが可能となる。例えば、日本海溝陸側斜面の堆積速度が 50 cm/千年の場合で平均的な地震発生間隔が 200 年であれば、地震間に斜面には 10 cm の堆積物がたまるので、次の地震でタービダイトを形成するための数 cm の表層堆積物は十分に供給できる。一方で堆積速度が 10 cm/千年の場合であれば、地震間にたまる堆積物は 2 cm であり、毎回の地震で堆積物が再懸濁すると斜面は侵食され含水率が低い古い堆積物が露出する。このため、毎回の地震によりタービダイトを形成することは困難になると推定される。

海底堆積物中の地震記録としてはこのほかに地震動による変形構造がある。地震動変形構造として報告されているものには現世の堆積物、地層を含めてさまざまなものがあ

る^[34]。Sakaguchi *et al.*^[35]は、南海トラフ陸側斜面での掘削コアの最上部に地震動によって表層堆積物が角礫状に割れる構造を報告し、過剰鉛 210 の測定から 1944 年東南海地震によって形成されたとした。Ikehara *et al.*^[6]は仙台沖の外側陸棚において、縦に配列する線状構造（図 2C）を報告し、これが地震動で形成されたと考えられている上総層群の泥岩中に観察される脈状構造^{[36][37]}と大きさや間隔が異なるものの形態や長さ/間隔比が同じであることを示した。さらに、この変形構造が 2011 年の津波によって形成されたイベント堆積物に覆われることから、2011 年の地震動によって形成されたものと考えた。このような地震動による変形構造を持った堆積物による地震発生履歴の推定はスイスの湖の堆積物でも行われている^[34]。

3 地震性タービダイトを用いた地震発生履歴の検討の現状

海底・湖底の堆積物中に挟在するタービダイトを用いた地震発生履歴の検討は世界各地で行われている^{[7][18][34][38]-[40]}。特にここ数年に発表された論文が多い。混濁流はすでに述べたような地震動や津波によるまき上げ・再懸濁以外にも暴風時のサージ状の流れ、洪水時に河川から排出されるハイパーピクナル流、暴風時の大波による繰り返し荷重による堆積物の液状化、堆積物の急激な堆積による間隙水圧の上昇、海底での地下水流出、火山噴火、地球外物質の落下等によっても生じ得る^{[39][41][42]}。したがって、堆積物中に認められるタービダイトがどんな原因で形成されたかを識別することが重要になるが、タービダイト自体の特徴から形成原因を特定するのは容易でない。河川や浅海域に起源を持つ混濁流では陸源や浅海起源の粒子を含むことが期待されるので、これらが形成原因の特定に使われることがある^[43]。例えば地震時に河口の水中三角州前置面が崩

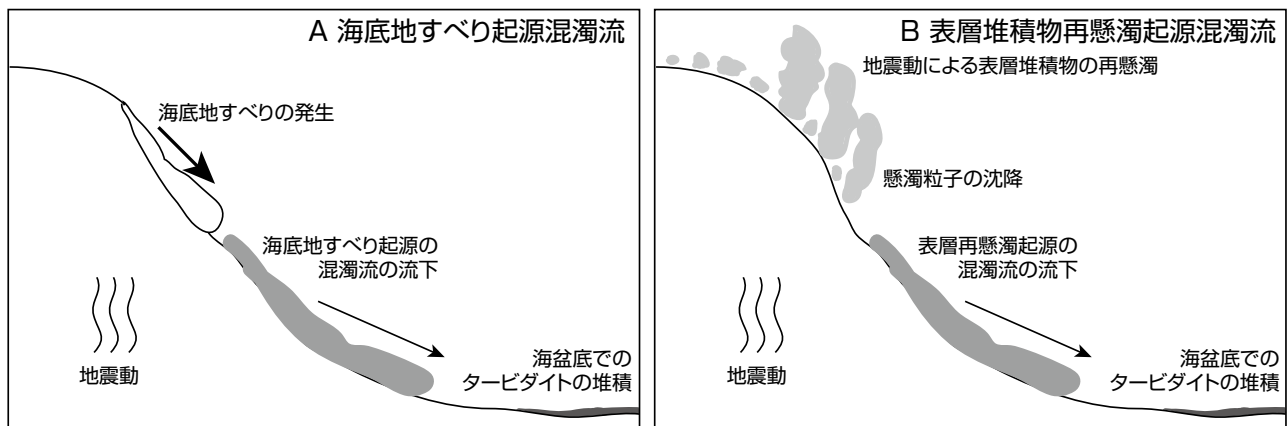


図3 地震性タービダイトの二つの堆積モデル

(A) 地震動により海底斜面が崩壊する海底地すべり起源と (B) 地震動により未固結表層堆積物がまき上がる表層堆積物再懸濁起源。

壊すれば河川堆積物とはほぼ同じ組成の粒子が流下するので、粒子組成のみから形成原因の特定は困難である。このため現状では、堆積物採取地点が河口から続く海底谷から離れている、あるいは海底谷のない孤立した凹地内にあるなど、浅海からの影響が少ない地形・堆積学的設定に基づいて、挟在するタービダイトを地震性とする場合が多い。このため、海溝陸側斜面に断層運動に伴って形成される凹地（スロープ海盆）がタービダイトによる地震発生履歴の検討のための好適地の一つと考えられている^[44]。また、ある大きさ以上の地震の度にタービダイトが形成され、それが堆積物記録として保存されることも重要な要素である。ある場所においてどのくらいの地震でどのような地震イベント堆積物が形成されるかはほとんどわかっていない。しかしすでに述べたように、表層堆積物が再懸濁・再堆積してタービダイトを形成するような場では再懸濁する堆積物量よりも十分に大きい量の堆積物が地震間に斜面域に堆積する必要がある。また、地震イベント堆積物が海底の物理的侵食や底生生物の活動による擾乱から逃れ、より確実に堆積物記録として残るためには地震間にその場所にたまる堆積物量は多くて、侵食の影響や底生生物による擾乱を受けやすい海底表面から遠ざけられる方が良い。実際には海底地形や堆積状況等からこのような場所を選定して、高品質の分析用の試料を得ることが非常に重要である^{[39][44][45]}。どこで採った試料でも地震発生履歴の検討に使えるわけではない。

タービダイト等の地震イベント堆積物を用いた地震発生履歴の推定では、適切な場所から採取された試料（海底堆積物コア）について、試料中に挟在する地震イベント層の範囲を認定し、地震イベント堆積物の堆積年代を決めることで過去の地震発生年代を決めていく（図4）^[39]。さらに同時に形成された地震イベント堆積物の平面的広がりから震源位置や破壊領域の大きさを推定する。イベント層の範囲の認定には肉眼やX線透過画像・X線CT画像で観察される堆積構造や堆積物の色調、粒度変化、バルク密度や帯磁率変化、鈹物組成や化学組成変化等が使われてきた（図4）^[39]。含有される微化石や有機物組成等も指標になる場合がある。これらを組み合わせた地震イベント層の識別がまず必須である。

海底堆積物の年代決定に最も普通なのは堆積物中の浮遊性有孔虫遺骸を用いた放射性炭素年代測定法である。他には、挟在する火山灰の既知火山灰との対比、地磁気永年変動曲線、古地磁気強度変化曲線、微化石層序、浮遊性・底生有孔虫の酸素同位体層序、堆積物中の有機物を用いた放射性炭素年代測定等がある。このうち最も年代決定精度が高いのは、噴火年代が決められている歴史噴火の火山灰であるが、それ以外は最も普通に使われる浮遊性有孔虫の放射性炭素年代測定法でも数十年（数千年前まで）から数百年（数万年前）の誤差を持つ。最近是个々の年代値の確率分布からベイズ統計理論を利用して、誤差を考慮したより確からしいイベントの年代を求める試みがな

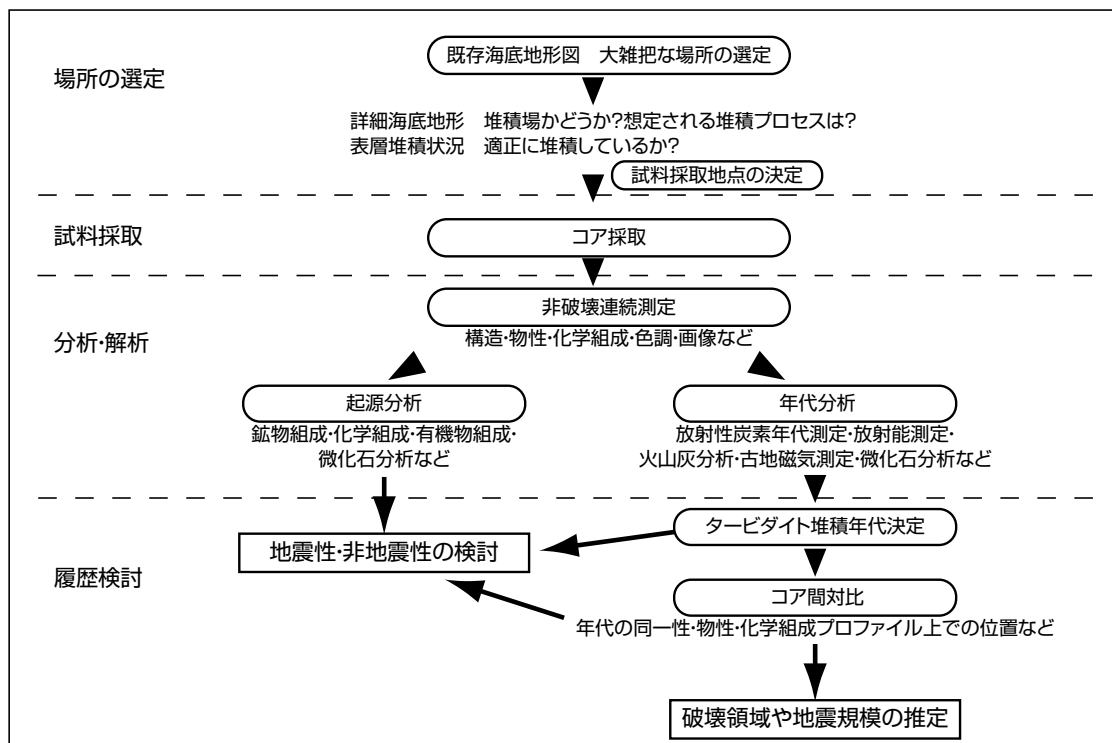


図4 地震性タービダイトを用いた地震発生履歴の推定の方法

されているが、確からしいイベントの年代を得るためにはできるだけ多くの年代測定値があるに越したことはない。

試料間のイベント層のより確からしい対比は、互いに対比される火山灰のような絶対的同時面を基準とし、放射性炭素年代を参照しつつ、地磁気永年変動曲線や色調値、物性値、元素濃度のような連続データ（プロファイル）上での位置から行うのが望ましい。そして、可能な限り高分解能の数値データを得るのが好ましい。このためには非破壊測定が有利である。現在はさまざまな非破壊分析装置があるので、これらを組み合わせた多項目高解像度のプロファイルを組み合わせて、イベントの対比を行い、これにできるだけ多数の年代目盛を加えることで地震イベントの対比と年代決定の精度の向上が期待される。

試料間での地震イベントの対比ができると、ある地震でのタービダイトの堆積範囲の見積もりが可能となる。地震直後の海底調査の結果からすると、地震性タービダイトの分布範囲は地震による破壊領域とその近傍に限られることが多いので^{[17][18]}、ある地震による地震性タービダイトの堆積域から破壊領域の位置と地震規模の推定が可能になると期待される。また、地震動変形構造には地震動の大きさとの関連が指摘されているものもある^[46]。地震性タービダイトや地震動変形構造の地理的分布から地震規模を推定す

る試みもなされている^[34]。これができると、地震発生時期だけでなく、地震発生場所と規模の推定も可能になるが、現状では地震性堆積物の正確な対比手法の確立が大きな課題である。

4 地震時に海底で起こる現象のより良い理解のためのバックグラウンドデータの重要性

地震や津波により海底で堆積物の再懸濁・再移動・再堆積が起こっていることは2011年東北沖地震後の調査研究の例ですでに示した。しかし、本当にそれが2011年の地震や津波で形成されたかどうかを明確に示すのはなかなか困難である。また、海底での堆積物の移動量を定量的に捉えることも難しい。この一つの原因は、ほとんどの海底堆積物の調査研究が大地震・津波や洪水といった地質・気象イベントの後には行われても、通常時の海底を面的に捉えるような調査が行われることが少ないことによる。イベント後の調査結果と比較できるイベント前のデータがイベント時に海底で起こる現象のより定量的な理解に重要である。

産総研は日本周辺海域の海洋地質図作成にかかる調査研究を1970年代から実施しており、その中で表層堆積図を整備してきた（図5）。表層堆積図は、表層堆積図の区

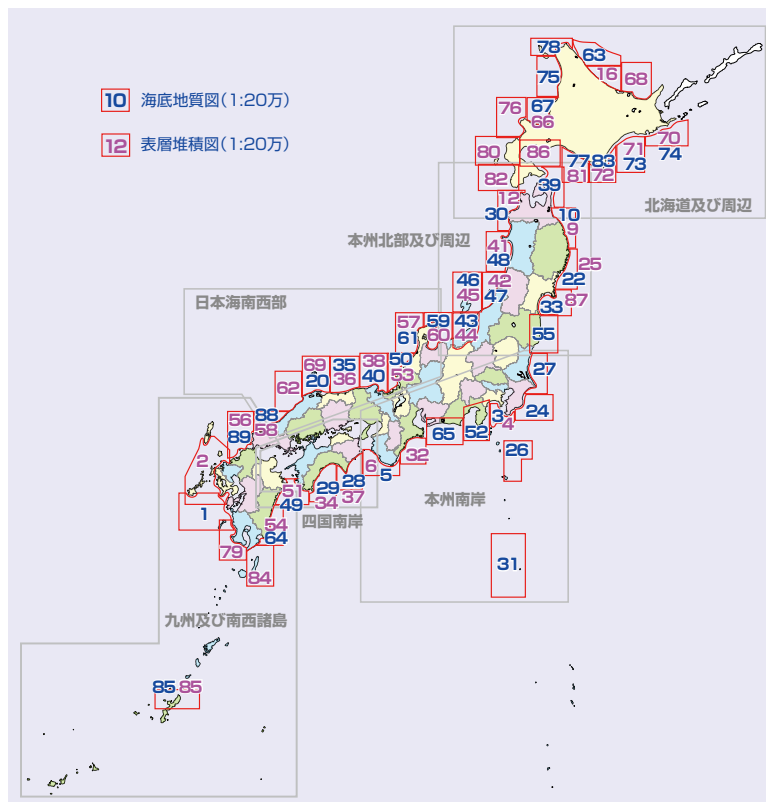


図5 産総研による海洋地質図の出版状況
赤い数字の入った枠が1/20万表層堆積図の出版済み区画。青い数字の入った枠は1/20万海底地質図、灰色枠は1/100万海底地質図の出版済み区画。産総研地質調査総合センター HPより。

画の海域面積や水深、航海日数によって間隔は変わるが、4～7マイル（7.4～13 km）程度の間隔で格子状に配置された採泥点から採取された海底堆積物の粒度や組成の分析結果に、海底写真や表層地層探査記録の解析結果を加え、単に堆積物の分布を示した底質図ではなく、過去数万年程度に渡る堆積物の移動・堆積過程も表現する地球科学図である。20万分の1の縮尺で作成される1枚の表層堆積図のためには100点程度の採泥点が設定される。通常の海洋地質調査での採泥作業は特定の目的を解明するために行うことが多いが、表層堆積図作成のための採泥では均等で画一的な海底堆積物情報の取得のため、堆積図の区画内において均等な間隔で採泥点が配置される。さらに必要に応じて、特定の現象の解明のための試料採取や補足的な採泥が実施される。このような海底堆積物情報を系統的に取得している機関は日本では産総研以外にない。

この表層堆積図のデータは地震や津波、洪水等のイベントの海底への影響評価にも利用できる。2011年東北沖地震・津波の例では、産総研が三陸から仙台湾沖で表層堆積図作成のために取得した海底写真が地震・津波前後の底生生物の変化の解析に用いられ、この海域での主要な底生生物であるクモヒトデの分布に変化があったことが明らかにされた^[47]。また2011年東北沖地震・津波前後での仙台湾の表層堆積物の比較は、仙台湾全域で津波による表層堆積物のまき上げと再堆積が起こったことを示した^[48]。その後の分析結果も踏まえると、表層堆積物は最大で10 cm以上がまき上げられ、堆積物が懸濁した状況は少なくとも数日以上は続いたと考えられる。このような地震・津波前後の表層堆積物の比較はそれぞれのイベントにおいて何が起こったか、あるいは起こらなかったかの事実を明確に指示する。これらの事実の積み重ねは今後の巨大地震・津波時に海底のどこで何が起こりそうかの推定にも利用できると期待される。

網羅的に整備された海底堆積物試料と情報は、地震や津波起源の混濁流の発生源の推定にも利用可能である。地震・津波による海底の擾乱によりどこで発生した混濁流がどのように流下し、どこにタービダイトを堆積させたかを知ることはより正確なタービダイトを用いた地震発生履歴の検討に重要であるが、現時点では発生源と流下経路を正確に推定した例はほとんどない。混濁流は流下する過程で、混濁流中に含む堆積物粒子の一部を堆積させ、その一方で流れの先端部では表層堆積物を混濁流に取り込む^[11]。このため、混濁流から堆積したタービダイトを構成する粒子のすべてが混濁流の発生源を示すわけではない。しかし一方で、発生源の粒子をすべて失っているわけではない。これは例えば、四国沖南海トラフ底のタービダイトが

その起源である600 km以上離れた富士川の粒子を含んでいる^[49]という事実を示される。したがって、混濁流の発生源や流下経路の推定には発生源と流下経路になり得る範囲の堆積物試料や組成に関する情報が重要になる。表層堆積図作成のために網羅的に採取された表層堆積物試料については粒度や粒子組成のほか、化学組成についても分析され、公表されている^[50]。近年の粒子供給源の推定には主要元素のほか、さまざまな微量元素やそれらの同位体比が用いられている^[51]。地震や津波前のこれらの化学組成の地理的分布の情報は、混濁流の発生源や流下経路の推定にも役立つと期待される。

5 まとめと今後の展望

最終氷期最盛期以降の海水準上昇や陸域からの土砂供給による海岸線の後退や前進、海岸地形の変化の影響を受ける陸上の津波堆積物に比べて、海水準上昇の影響を受けにくい深海底堆積物はより長い時間での地震・津波発生履歴の記録媒体として期待される^[50]。このため世界各地で海底の地震性堆積物を用いた地震発生履歴の解読が試みられている。しかし、試料採取場所が水深数千 m以上になる深海底の海底の状況をしっかりと把握し、適切な場所から高品質な試料を得るのは簡単ではない。すでに述べたように、高精度・高解像度の海底地形データと地層断面記録から適切な場所を選び出すことがまず必要になる。産総研の海洋地質図とその元となるデータ・試料群はこれらの場所選定の基礎データとなる。そのためには海洋地質図作成のための調査研究の一層の充実と成果の迅速な公表が必要である。この基礎データの上で地震性堆積物採取のための調査が行われることが効率的である。また、海洋地質図作成のための日本列島主要4島周辺の調査は終了したが、その調査域（図5）は日本周辺の地震発生域と比べると陸側に偏っている。巨大地震の発生が想定される海域についての基礎的海洋地質情報の整備が今後望まれる。

高品質な試料が採取できたら、可能な限り高分解能での分析がなされる必要がある。すでに述べたように、最近発展の著しい非破壊測定装置を複数組み合わせることにより、迅速かつ高分解能のデータから、イベント層の認定が可能となっている。迅速な分析は多数の試料の分析を可能にし、より確からしいデータの構築に貢献する。産総研でもこのような分析システムを構築することが望まれる。一方で、通常時の堆積物とは異なる堆積過程から形成されたイベント層は、通常時の堆積物とは異なる粒度・粒子組成や構造を持つと考えられる。これらの違いは堆積物の見かけにも違いを生じさせるであろう。分析データだけに頼らず見かけ上の違いの有無を理解する「堆積物を見る眼」を養う

ことも重要である。「堆積物を見る眼」はたくさんのさまざまな堆積物を意識を持って見ることで養われる。また、非破壊測定 of 異常値や変化パターンを実際の試料と見比べることを繰り返すことによって経験値が増す。非破壊測定 of データだけでイベント層を捉えるのではなくそれが堆積物のどういう違いや変化によるのかを常に意識することが重要である。さらに非破壊測定 of 結果の解釈では古環境変遷等一見地震履歴の研究には関係ないように思えるところで得た知識が役に立つことも多々あった。「堆積物を見る眼」を養うには、単に一つのことの経験を積むというだけでなく、幅を広げる努力も重要である。特に若手研究者はできる限りたくさんの経験を積むことが大事だと考える。

西太平洋のプレート境界域に位置し、地震大国である日本では過去の地震や津波の発生履歴を知ることが安心・安全な生活の基礎情報であると考えている。海域の地質学的情報をしっかりと収集し、解説して、これに貢献していきたいと考えている。

参考文献

- [1] 阿部壽, 菅野喜貞, 千釜章: 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, *地震*, 43, 513–525 (1990).
- [2] 岡村行信: 西暦869年貞観津波の復元と東北地方太平洋沖地震の教訓—古地震研究の重要性と研究成果の社会への周知の課題, *Synthesiology*, 5 (4), 234–242 (2012).
- [3] 内田淳一, 阿部恒平, 長谷川四郎, 藤原治: 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 (6), 533–540 (2007).
- [4] K. Oguri, K. Kawamura, A. Sakaguchi, T. Toyofuku, T. Kasaya, M. Murayama, K. Fujikura, R. N. Glud and H. Kitazato: Hadal disturbance in the Japan Trench induced by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Scientific Reports*, 3, 1915, doi: 10.1038/srep01915 (2013).
- [5] K. Arai, H. Naruse, R. Miura, K. Kawamura, R. Hino, Y. Ito, D. Inazu, M. Yokokawa, N. Izumi, M. Murayama and T. Kasaya: Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geology*, 41 (11), 1195–1198 (2013).
- [6] K. Ikehara, T. Irino, K. Usami, R. Jenkins, A. Omura and J. Ashi: 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*, 358, 120–127 (2014).
- [7] K. Ikehara, T. Kanamatsu, Y. Nagahashi, M. Strasser, H. Fink, K. Usami, T. Irino and G. Wefer: Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years, *Earth and Planetary Science Letters*, 445, 48–56 (2016).
- [8] T. Toyofuku, P. Duros, C. Fontainer, B. Mamo, S. Bichon, R. Buscail, G. Chabaud, B. Deflandre, S. Gouber, A. Grémare, C. Menniti, M. Fujii, K. Kawamura, K. A. Koho, A. Noda, Y. Namegaya, K. Oguri, O. Radakovitch, M. Murayama, L. Jan de Nooijer, A. Kurasawa, N. Ohkawara, T. Okutani, A. Sakaguchi, F. Jorissen, G.-J. Reichart and H. Kitazato: Unexpected biotic resilience on the Japanese seafloor caused by the 2011 Tohoku-Oki tsunami, *Scientific Reports*, 4, 7517, doi:10.1038/srep07517 (2014).
- [9] C. M. McHugh, T. Kanamatsu, L. Seeber, R. Bopp, M.-H. Cormier and K. Usami: Remobilization of surficial slope sediment triggered by the A.D. 2011 Mw9 Tohoku-Oki earthquake and tsunami along the Japan Trench, *Geology*, 44, 391–394 (2016).
- [10] B. C. Heezen and M. Ewing: Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake, *American Journal of Science*, 250, 849–873 (1952).
- [11] E. Meiburg and B. Kneller: Turbidity currents and their deposits, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 42, 135–156 (2010).
- [12] D. J. W. Piper, P. Cochonat and M. L. Morrison: The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar, *Sedimentology*, 46 (1), 79–97 (1999).
- [13] B. C. Heezen and M. Ewing: Orleansville earthquake and turbidity currents, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 39 (12), 2505–2514 (1955).
- [14] S.-K. Hsu, J. Kuo, C.-L. Lo, W.-B. Doo, C.-Y. Ku and J.-C. Sibuet: Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan, *Terrestrial, Atmospheric, and Oceanic Sciences*, 19 (6), 767–772 (2008).
- [15] 白崎勇一, 伊藤啓司, 桑水流正邦, 清水健二: 海底ケーブル障害から見える海底地盤変動, *海洋調査技術*, 24 (1), 17–20 (2012).
- [16] T. Nakajima and Y. Kanai: Sedimentary features of seismoturbidites triggered by the 1983 and older historical earthquakes in the eastern margin of the Japan Sea, *Sedimentary Geology*, 135 (1-4), 1–19 (2000).
- [17] 池原研, 宇佐見和子: 1993年北海道南西沖地震の地震性タービダイトの堆積機構, *第四紀研究*, 46 (6), 477–490 (2007).
- [18] J. R. Patton, C. Goldfinger, A. E. Morey, K. Ikehara, C. Romsos, J. Stoner, Y. Djadjadihardja, Udrek, S. Ardhyastuti, E. Z. Gaffer and A. Viscaino: A 6600 year earthquake history in the region of the 2004 Sumatra-Andaman subduction zone earthquake, *Geosphere*, 11 (6), 2067–2129, doi: 10.1130/GES01066.1 (2015).
- [19] 有働恵子, 田中仁, 真野明, 武田百合子: 東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性, *土木学会論文集B2(海岸工学)*, 69 (2), 1_1391–1_1395 (2013).
- [20] T. Tamura, Y. Sawai, K. Ikehara, R. Nakashima, J. Hara and Y. Kanai: Shallow-marine deposits associated with the 2011 Tohoku-oki tsunami in Sendai Bay, Japan, *Journal of Quaternary Science*, 30 (4), 293–297 (2015).
- [21] S. Yoshikawa, T. Kanamatsu, K. Goto, I. Sakamoto, M. Yagi, M. Fujimaki, R. Imura, K. Nemoto and H. Sakaguchi: Evidence for erosion and deposition by the 2011 Tohoku-oki tsunami on the nearshore shelf of Sendai Bay, Japan, *Geo-Marine Letters*, 35 (4), 315–328 (2015).
- [22] T. Haraguchi, K. Goto, M. Sato, Y. Yoshinaga, N. Yamaguchi and T. Takahashi: Large bedform generated by the 2011 Tohoku-oki tsunami at Kesenuma Bay, Japan, *Marine Geology*, 335, 200–205 (2013).
- [23] I. Sakamoto, Y. Yokoyama, M. Yagi, T. Inoue, S. Iijima, Y. Nkada, M. Fujimaki, K. Tanaka, K. Nemoto, T. Kasaya and Y. Fujiwara: Geo-environment change caused by the 3.11 tsunami disaster around the coastal area revealed by the marine geological investigation, In K. Kogure, M. Hirose, H. Kitazato and A. Kijima (eds.), *Marine Ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011*, 129–130, Tokai University Press (2016).
- [24] K. Seike, T. Kitahashi and T. Noguchi: Sedimentary features of Onagawa Bay, northeastern Japan after the 2011

- off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: sediment mixing by recolonized benthic animals decreases the preservation potential of tsunami deposits, *Journal of Oceanography*, 72 (1), 141–149 (2016).
- [25] Y. Saito: Modern storm deposits in the inner shelf and their recurrence intervals, Sendai Bay, northeast Japan, In A. Taira, and F. Masuda (eds.), *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, 331–344, Terra Scientific Publishing, Tokyo (1989).
- [26] K. Usami, K. Ikehara, R. G. Jenkins and J. Ashi: Benthic foraminiferal evidence of deep-sea sediment transport by the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami, *Marine Geology*, 384, 214–224 (2017).
- [27] R. Miura, R. Hino, K. Kawamura, T. Kanamatsu and Y. Kaiho: Accidental sediments trapped in ocean bottom seismometers during the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Island Arc*, 23, 365–367 (2014).
- [28] T. Noguchi, W. Tanikawa, T. Hirose, W. Lin, S. Kawagucci, Y. Yoshida-Takashima, M. C. Honda, K. Takai, H. Kitazato and K. Okamura: Dynamic process of turbidity generation triggered by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13 (11), Q11003, doi:10.1029/2012GC004360 (2012).
- [29] K. Ikehara, K. Usami, R. Jenkins and J. Ashi: Occurrence and lithology of seismo-turbidites by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Abstracts of IGCP the Fifth International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 74 (2011).
- [30] J. Ashi, K. Ikehara, M. Kinoshita and KY04-11 and KH-10-3 shipboard scientists: Settling of earthquake-induced turbidity on the accretionary prism slope of the central Nankai subduction zone, In Y. Yamada *et al.* (eds.), *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 561–571, Springer (2012).
- [31] J. Ashi, R. Sawada, A. Omura and K. Ikehara: Accumulation of an earthquake-induced extremely turbid layer in a terminal basin of the Nankai accretional prism, *Earth, Planets and Space*, 66 (51), 1–9, doi:10.1186/1880-5981-66-51 (2014).
- [32] J. Moernaut, M. Van Daele, M. Strasser, M. A. Clare, K. Heirman, M. Viel, J. Cardenas, R. Kilian, B. Ladron de Guevara, M. Pino, R. Urrutia and M. De Batist: Lacustrine turbidites produced by surficial slope sediment remobilization: A mechanism for continuous and sensitive turbidite paleoseismic records, *Marine Geology*, 384, 159–176 (2017).
- [33] K. Oguri, Y. Furushima, T. Toyofuku, T. Kasaya, M. Wakita, S. Watanabe, K. Fujikura and H. Kitazato: Long-term monitoring of bottom environments of the continental slope off Otsuchi Bay, northeastern Japan, *Journal of Oceanography*, 72 (1), 151–166 (2016).
- [34] K. Kremer, S. B. Wirth, A. Reusch, D. Fah, B. Bellwald, F. S. Anselmetti, S. Girardclos and M. Strasser: Lake-sediment based paleoseismology: Limitations and perspectives from the Swiss Alps, *Quaternary Science Reviews*, 168, 1–18 (2017).
- [35] A. Sakaguchi, G. Kimura, M. Strasser, E. J. Scream, D. Curewitz and M. Murayama: Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, *Geology*, 39 (10), 919–922 (2011).
- [36] Y. Hanamura and Y. Ogawa: Layer-parallel faults, duplexes, imbricated thrusts and vein structures of the Miura Group: keys to understanding the Izu forearc-arc sediment accretion to the Honshu forearc, *Island Arc*, 2 (3), 126–141 (1993).
- [37] T. Ohsumi and Y. Ogawa: Vein structures, like ripple marks, are formed by short-wavelength shear waves, *Journal of Structural Geology*, 30 (6), 719–724 (2008).
- [38] C. Goldfinger, C. Hans Nelson, J. E. Johnson and the Shipboard Scientific Party: Deep-water turbidites as Holocene earthquake proxies: the Cascadia subduction zone and Northern San Andreas Fault systems, *Annals of Geophysics*, 46 (5), 1169–1194 (2003).
- [39] C. Goldfinger, C. Hans Nelson, A. E. Morey, J. E. Johnson, J. R. Patton, E. Karabanov, J. Gutierrez-Pastor, A. T. Eriksson, E. Gràcia, G. Dunhill, R. J. Enkin, A. Dallimore and T. Vallier: Turbidite event history – Methods and implications for Holocene paleoseismicity of the Cascadia subduction zone, *USGS Professional Paper*, 1661-F, US Geological Survey (2012).
- [40] H. Poudereux, J.-N. Proust and G. Lamarche: Submarine paleoseismology of the northern Hikurangi subduction margin of New Zealand as deduced from turbidite record since 16 ka, *Quaternary Science Reviews*, 84, 116–131 (2014).
- [41] 中嶋健: タービディティ・カーレントの発生機構—タービダイトを用いた海域地震発生間隔評価手法の確率に向けて—, *地質調査所月報*, 51, 79–87 (2000).
- [42] K. T. Pickering and R. N. Hiscott: *Deep Marine Systems: Processes, Deposits, Environments, Tectonics and Sedimentation*, AGU and Wiley, (2016).
- [43] A. Omura, K. Ikehara, K. Arai and Udrek: Determining sources of deep-sea mud by organic matter signatures in the Sunda trench and Aceh basin off Sumatra, *Geo-Marine Letters*, doi:10.1007/s00367-017-0510-x (2017) (in press).
- [44] 池原研: ターミナル小海盆タービダイト古地震学の一つのターゲット, *第四紀研究*, 54 (6), 345–358 (2015).
- [45] C. Goldfinger, S. Galer, J. Beeson, T. Hamilton, B. Black, C. Romsos, J. Patton, C. Hans Nelson, R. Hausmann and A. Morey: The importance of site selection, sediment supply, and hydrodynamics: A case study of submarine paleoseismology on the northern Cascadia margin, Washington USA, *Marine Geology*, 384, 4–46 (2017).
- [46] M. A. Rodriguez-Pascua, J. P. Calvo, G. De Vicente and D. Gómez-Gras: Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene, *Sedimentary Geology*, 135 (1), 117–135 (2000).
- [47] T. Yamakita, H. Yamamoto, K. Ikehara, H. Yokooka, Y. Fujiwara, S. Tsuchida, Y. Furushima, K. Oguri, M. Kawato, T. Kasaya, S. Watanabe, K. Fujikura and H. Kitazato: Earthquake and habitat mapping in the deep sea, *Abstract of the International Association for Impact Assessment 2016*, #34 (2016).
- [48] 池原研: 仙台湾陸棚域の表層堆積物: 2011年東北地方太平洋沖地震／津波の浅海域海底環境への影響, 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書, *地質調査総合センター速報*, 66, 409–413 (2014).
- [49] 平朝彦: 日本列島の誕生, 岩波新書, (1990).
- [50] 今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴真澄, 岡井貴司, 立花好子, 池原研, 片山肇, 野田篤, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃: *海と陸の地球化学図*, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, (2010).
- [51] Y. Saitoh, T. Ishikawa, M. Tanimizu, M. Murayama, Y. Ujiie, Y. Yamamoto, K. Ujiie and T. Kanamatsu: Sr, Nd, and Pb isotope compositions of hemipelagic sediment in the Shikoku Basin: Implications for sediment transport by the Kuroshio and Philippine Sea Plate motion in the late Cenozoic, *Earth and Planetary Science Letters*, 421, 47–57 (2015).

執筆者略歴

池原 研（いけはら けん）

1982年東京学芸大学教育学部卒業。同年通商産業省工業技術院地質調査所入所。2005年産総研地質情報研究部門海洋地質研究グループ研究グループ長。2009年同部門副研究部門長。2015年から同部門首席研究員。入所以来日本周辺海域を中心とした海洋地質調査に従事。専門は堆積学。複数の受託研究等を通じて海底の地震性堆積物の研究を主導している。この論文では、全体的な構成と執筆、及び表層堆積図データの活用項目を担当。



宇佐見 和子（うさみ かずこ）

2010年熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。2012年産総研地質情報研究部門特別研究員。2017年から同部門客員研究員。専門は微生物学及び堆積学。この論文では、地震時の海底堆積物の擾乱と地震性タービタイトによる地震発生履歴の議論を担当。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（牧野 雅彦：産業技術総合研究所）

この論文は、海底の地震・津波堆積物という地質学的な証拠をつかみ、過去の地震・津波発生履歴を明らかにすることによって地震防災に資する新しい科学的有用性について論じています。著者らは2011年東北地方太平洋沖地震以降、関係機関と協力しながら精力的にこの研究を進め多くの成果を上げてきました。

具体的には、1) タービタイトの形成プロセス、2) 仙台沖で採取された2011年東北沖地震の津波により形成された堆積物、3) タービタイトによる地震発生履歴の推定方法等について論じています。この研究をさらに進めるためには、高精度で高分解能の海底地形データと地層断面記録が必要であり、海洋地質情報の知的基盤整備が重要であると主張しています。

これらの研究は地震防災の観点から重要であり、シンセシオロジー論文として適切であると考えます。

回答（池原 研）

2011年東北地方太平洋沖地震とその津波は東北地方だけでなく、広い範囲に大きな被害を発生させました。今回紹介した海底堆積物を用いた地震発生履歴の研究はこの地震・津波以前から行われておりましたが、2011年の地震・津波以降の研究の進展は驚くべきものと思っております。地震・津波時に海底で起こることのいくつかの詳細が観察され、記録として残されてきています。まだまだ分からないことだらけではありますが、海洋地質研究から社会に貢献できるようさらに調査研究を進めていければと思っております。

コメント（後藤 雅式：産業技術総合研究所）

この論文は、安心・安全な生活に貢献することを念頭におき、海底堆積物中のタービタイトを分析することにより、巨大地震や津波履歴を解明するストラテジーに関するものです。先端的な調査・分析のみならず、通常データ収集の重要性、産総研の役割についても言及されています。専門外の人間が読んでも参考になる構成になっており、シンセシオロジー掲載の価値は十分あると考えます。

回答（池原 研）

調査研究の社会への貢献を念頭に執筆させていただきました。また、産総研でこれまで行ってきた研究とその研究財産をいかにこの研究に活かせるか、活かしていくべきか、思うところを書いたつもりです。

議論2 タービタイトの説明について

コメント（牧野 雅彦）

図1Aの斜面を流れる混濁流の水槽実験は引用かどうかこの論文には文献[11]とあるので。引用であれば図のキャプションにその旨を記載してください。

回答（池原 研）

この写真は水槽で発生させた混濁流を筆頭著者が撮影したもので、論文から引用した写真ではありません。引用はこの論文で混濁流とはどのようなものであるかを説明した部分になります。混乱を生じさせないように、この論文の引用の表示の場所を移動させました。

コメント（牧野 雅彦）

図2についてこの論文ではタービタイトの「2階建構造」、図のキャプションでは「内部浸食面」としています。「内部浸食面」について解説があれば形成プロセスがさらに分かりやすいと思います。

回答（池原 研）

ご意見を踏まえ、説明文について加筆・修正しました。

議論3 技術的課題について

コメント（牧野 雅彦）

海底の地震・津波堆積物の研究が最近大きく発展した原因として、解決できた何らかの技術的課題はありますか？

第3章に記載されていますが、もう少し整理して分かりやすくできないでしょうか？

回答（池原 研）

技術的要素としては、第5章に書きましたようにコア試料の物性・化学組成の非破壊計測があると思います。これは迅速かつ高分解能でデータを提供してくれます。

第3章では研究手法を説明しておりますので、ご指摘いただいた点については、非破壊計測が最近発展してきた技術であることを第5章に加筆しました。しかし、現状ではこのような測定データに頼り切って、実際のもの（コア）を見ない研究者が数多くいます。データとコアを見比べていくことで「堆積物を見る眼」が養われると考えていますので、その点も加筆しました。

コメント（牧野 雅彦）

図4で各要素技術を記載していますが、要素をつなぐ矢印が短いのでもう少し全体配置を考えて書くと分かりやすくなると思います。各技術のかたまりを四角形で囲めませんか？

回答（池原 研）

ご意見を踏まえ、図を修正しました。

質問（後藤 雅式）

「まとめと今後の展望」では、「堆積物を見る眼」を養うことの重要性に言及されています。そのためには意識を持って見る、経験を積むことが必要と記載されていますが、もう少し具体的に記載していただくことは可能でしょうか。恐らく、他の分野の研究者にも通ずることだと思いがたいかと思いますがどうでしょうか。

回答（池原 研）

なかなか言葉で言い表すことが難しいですが、一見関係しないと思われることが後々に互いに関係を持つてくることを多数経験してきました。単に経験を積むのももちろん大事ですが、一つ一つの課題にしっかり向き合ってやっていくことを重ねることが大

事だと思いますので、その点について加筆してみました。また、最近発展してきた非破壊計測の結果（データ）と実際のもの（コア）を見比べてどのような特徴の部分でデータが変化しているのかをきちんと押さえていくことも「堆積物を見る眼」を養う上で重要だと思いますので、その点についても加筆しました。