

3. 3. 1 海底の地震性堆積物を用いた地震発生間隔の研究

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約
 - 1) 平成 23 年度
 - 2) 平成 24 年度
 - 3) 平成 25 年度

(2) 平成 24 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献

3. 3 海底堆積物調査等

3. 3. 1 海底の地震性堆積物を用いた地震発生間隔の研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 海底の地震性堆積物を用いた地震発生間隔の研究

(b) 担当者

	所属機関	役職	氏名
独立行政法人	産業技術総合研究所地質情報研究部門	副研究部門長	池原 研
独立行政法人	産業技術総合研究所地質情報研究部門	研究グループ長	荒井 晃作
独立行政法人	産業技術総合研究所地質情報研究部門	研究員	田村 亨
独立行政法人	産業技術総合研究所地質情報研究部門	研究員	天野 敦子
独立行政法人	産業技術総合研究所地質情報研究部門	研究員	佐藤 智之
独立行政法人	産業技術総合研究所地質情報研究部門	特別研究員	宇佐見和子

(c) 業務の目的

東北地方太平洋沖の海域において、海底堆積物採取を実施し、2011年東北地方太平洋沖地震による海底の変動に伴って形成された堆積層の特徴を把握する。また、海底堆積物コア中の斜面崩壊堆積物を認定し、その堆積年代分析を実施して平成23年の地震以前の地震発生履歴の検討を行う。

(d) 3カ年の年次実施業務の要約

1) 平成23年度：

海洋研究開発機構が実施する調査航海に参加し、震源域近傍の日本海溝並びに海溝海側斜面域から海底堆積物コアを採取した。その堆積構造解析を実施し、平成23年度の地震による堆積層の認定とその特徴の把握を行った。また、より以前の同様な構造を有する堆積層の識別から、過去における同様な地震の発生履歴の検討を行った。調査航海と採取試料の解析は海洋研究開発機構との密接な連携の下に共同して実施した。

2) 平成24年度：

海洋研究開発機構が実施する調査航海に参加し、青森県-福島県沖の海域から海底堆積物コアを採取する。また、平成23年度の本プロジェクトによる調査航海や平成23年3～4月に予定されているドイツ船の調査航海などにより採取された堆積物コアもあわせて、その堆積構造解析を実施し、平成23年度の地震による堆積層の認定とその特徴の把握を行う。また、堆積物コア中の同様な構造を有する堆積層の識別から、過去における同様な地震の発生履歴の検討を行う。

3) 平成25年度：

平成24年度までに採取された海底堆積物コアの堆積構造解析を実施し、平成23年度の地震による堆積層の認定とその特徴の把握を行う。また、堆積物コア中の同様な構造

を有する堆積層の識別から、過去における同様な地震の発生履歴の検討を行う。調査航海と採取試料の解析は海洋研究開発機構との密接な連携の下に共同して実施する。

(2) 平成 24 年度の成果

(a) 業務の要約

東北地方沖で発生する地震に伴って形成される地震性堆積物を海底堆積物中から認定し、その堆積間隔から過去の地震発生履歴を推定するために2011年東北地方太平洋沖地震震源域周辺の海底堆積物の解析を行った。「みらい」のMR12-E01航海及び「ゾンネ」のS0219A航海で震源域近傍の日本海溝域で採取された海底堆積物コア試料には最表層の2011年の地震によると考えられるタービダイトを含めて、厚いタービダイト層が3層、確認された。コア中に挟在する火山灰層の分析や有機物を用いた放射性炭素年代測定、微化石分析の結果からこれらのタービダイト層が完新世のものであることが確認された。火山灰層の対比結果に基づくと、これらの厚いタービダイト層は仙台平野の津波堆積物の層序と類似する。日本海溝底の堆積物は過去の巨大地震をよく記録している可能性が示唆された。

(b) 業務の実施方法

東北沖海域における過去の地震発生履歴の検討のため、2011年東北地方太平洋沖地震震源域近傍で採取された海底堆積物試料の解析を行った。試料としては、本研究課題で昨年度実施した海洋研究開発機構の調査船「みらい」によるMR12-E01航海と昨年度～本年度にかけて実施されたドイツの調査船「ゾンネ」によるS0219A航海で採取された試料を用いた。特に、Fujiwara *et al.* (2011)により地震前後での海底地形変化が報告されている日本海溝底付近(図1)で採取された試料を中心に分析を進めた。試料は肉眼観察のあと、5×20×1cmのスラブ試料を連続的に採取し、軟X線透過画像を撮影して、堆積構造を観察した。また、堆積年代決定のため、堆積物中の有機物を用いた放射性炭素年代測定を「みらい」の2本のコアの24層準について行うとともに、得られた年代値の妥当性の検証のため、3層準について含まれる放散虫群集組成の検討を行った。さらに、「みらい」、「ゾンネ」のコアに挟在する火山灰層の化学分析と鉱物組成分析を実施した。これらの結果を総合して、堆積年代を推定した。

また、昨年度の結果で2011年東北地方太平洋沖地震によって形成されたイベント堆積物が確認されたので、その堆積過程を検討するため、淡青丸のKT-11-17航海で採取された表層堆積物試料2試料について、底生有孔虫群集の検討を行った。

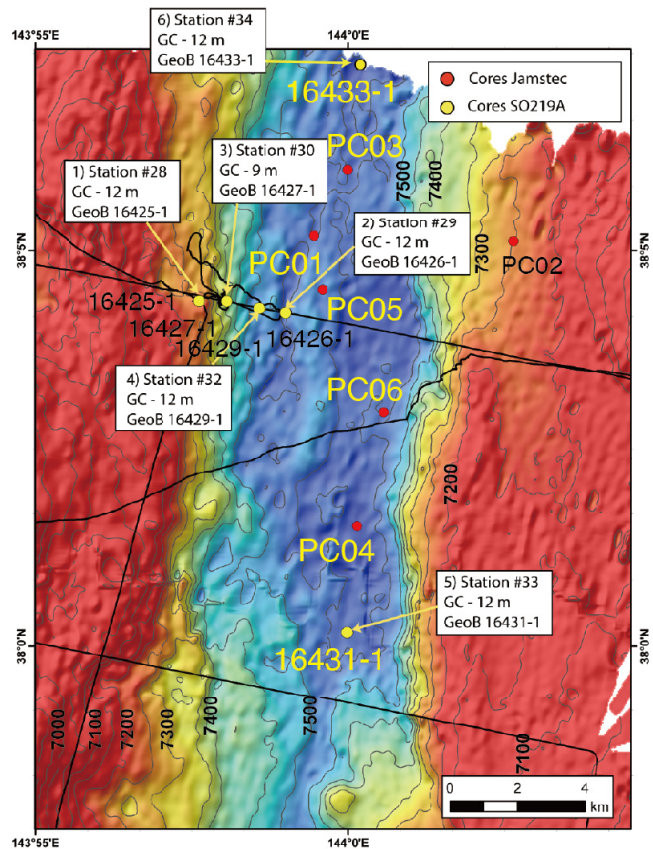


図1 「みらい」MR12-E01航海及び「ゾンネ」SO219A航海における日本海溝底での試料採取地点

赤丸が「みらい」、黄色丸が「ゾンネ」の採泥点。コア番号を黄色の文字で示した地点が日本海溝底からの試料採取地点。

(c) 業務の成果

海溝型地震の震源の多くは海底下にある。このため、もっとも大きな地震動とそれに伴う変動は海底で起こると考えられる。海底での大きな地震動は海底堆積物粒子の再配列を起こし、粒子間の間隙を埋める水（間隙水）の圧力を上昇させ、堆積物を不安定にし、海底地すべりを発生しやすくする。また、浅海に侵入した津波は海底の傾斜変換点でエネルギーを集中させ、海底表層堆積物を巻き上げる可能性がある。震源近傍の海底では地震によって表層堆積物を巻き上げるプロセスも想像されている（Sakaguchi *et al.*, 2011）。このような地震に伴う海底での土砂の輸送／再配置は海底地すべりや堆積物の巻き上げ起源の堆積物粒子を含んだ周囲の海水よりも密度の大きい水塊として、重力の効果により海底斜面を流れ下る密度流である混濁流によると考えられる。混濁流からの粒子の堆積は平常時に堆積する泥と異なる粒度組成や堆積構造を持つことが知られているので、海底堆積物中から混濁流起源の堆積層であるタービダイトを認定し、その堆積年代を決めることで過去の地震の発生時期を特定できる可能性がある（Adams (1990)；池

原 (2000a) ; Goldfinger *et al.* (2003) ; 池原ほか (2004) ; 池原・宇佐見 (2007) など)。本課題では、2011年東北地方太平洋沖地震震源域を対象に、海底堆積物中のタービダイトからこの海域における地震発生間隔を解明することを目的とする。

「みらい」のMR12-E01航海(5地点)と「ゾンネ」のS0219A航海(2地点)で震源域近傍の日本海溝底から採取されたコア試料は基本的に同じ岩相層序を示す(図2)。すなわち、1) 3枚の厚い上方に細粒化するタービダイト層(上位からタービダイト1~3)の存在、2) タービダイト2と3の間での薄層火山灰の挟在、3) タービダイト3の泥質部分での石灰質微化石の存在、という共通した岩相層序を持っている。このうち、海底直下に位置するタービダイト1は、2011年の地震/津波によって形成されたものであることは昨年度に報告した。より下位に位置するタービダイト2と3もタービダイト1と基本的に同じ構造を持ち、地震/津波によって形成されたものである可能性がある。したがって、この2つのタービダイトの堆積年代を決めることが重要となる。堆積年代決定のため、3つの分析を行った。一つはタービダイト2と3の間に挟在する薄層火山灰の分析である。構成する火山ガラスの化学分析結果(図3)は、この火山灰が十和田火山起源であることを示した。十和田火山からの火山灰としては、十和田-a火山灰(To-a: AD915)、十和田-中撤火山灰(To-Cu: 約6000年前)、十和田-八戸テフラ(To-H: 約15000年前)、十和田-大不動テフラ(To-Of: 32000年以上前)などの可能性が考えられる(町田・新井、2003)。コアが採取された日本海溝底は水深が7500m以上と北西太平洋の炭酸カルシウム補償深度とされる4000~4500m(井岡ほか、1994)よりも深く炭酸塩が溶解してしまうため、通常海底堆積物の年代決定に使う浮遊性有孔虫遺骸を用いた放射性炭素年代測定を使うことができない。このため、堆積物中に含まれる有機物を用いた放射性炭素年代測定を行うこととした。有機物の放射性炭素年代値は混入する古い有機物の影響で真の年代値よりも古くなることが知られている(池原、2000b)が、炭酸塩に乏しい亜寒帯域の堆積年代決定に用いられている(例えば、Itaki and Ikehara、2004)。「みらい」で採取された2本のピストンコアPC03とPC06のそれぞれ12層準の泥について年代測定を行ったところ、表1の結果を得た。PC03では12層準のうちの5層準の試料、PC06では12層準のうちの1層準の試料はタービダイト層中からの試料である。タービダイト層中の泥試料の年代値が他のものに比べて古くなっていることがわかる(図4)。これはタービダイトを堆積させた混濁流の流下時に下位のより古い堆積物(有機物)を取り込んだ結果と推定される。コアPC06の3つ目の層準以下の年代値は深度の増加とともにほぼ一定に古くなっており、堆積速度は0.2cm/年と計算される。一方、コアPC03はタービダイト2と3の間の年代値にばらつきが大きい、0.25~0.65cm/年の値が計算される。また、いずれの値も7000年を超えず、すべてが完新世の年代を示している。さらにこれらが完新世の堆積物であることを確認するため、3層準において放散虫群集組成の検討を行った。北西太平洋では、最終氷期最盛期から完新世にかけての海洋環境変化を反映して放散虫群集が変化し、完新世堆積物には最終氷期の堆積物に多産する*Cycladophora davisiana*の量が減る。三陸沖では最終氷期最盛期の*C. davisiana*の相対産出頻度は20%以上に対して、完新世では10%以下となる(Ohkushi *et al.*、2003)。検討したPC03の火山灰層準、PC06の火山灰層準とコア基底の計3層準での*C. davisiana*

の相対産出頻度はそれぞれ、1.0%、1.2%、3.7%であり、これらがすべて完新世の堆積物であることを示した。有機物の放射性炭素年代測定と放散虫分析結果からこの2本のコアの堆積年代が完新世であることを示したので、タービダイト2と3の間に挟在する十和田火山起源の火山灰は、To-a か To-Cu のいずれかであることがわかる。To-a の火山ガラスの SiO₂ 含有量は To-Cu よりも若干高い (75~77% 対 73~75%)。今回の海域試料の火山ガラスの化学組成は SiO₂ 含有量が 75-77% であり (図3)、To-a のそれとして矛盾ない。以上の結果から 2011 年の震源域周辺では完新世に最低でも 3 回の大きな地震イベントがあったことを示唆する。

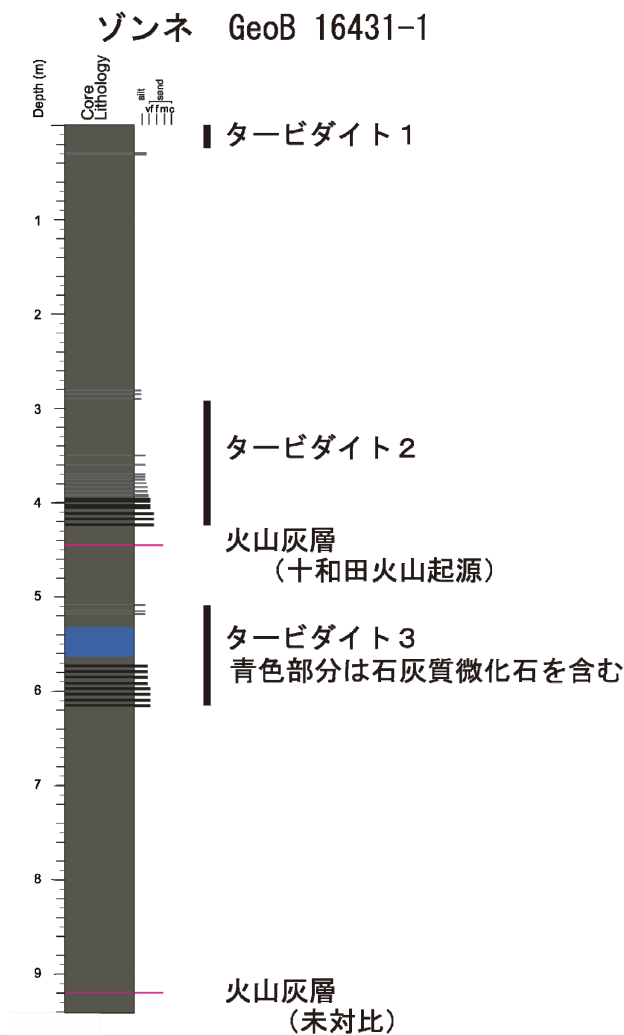
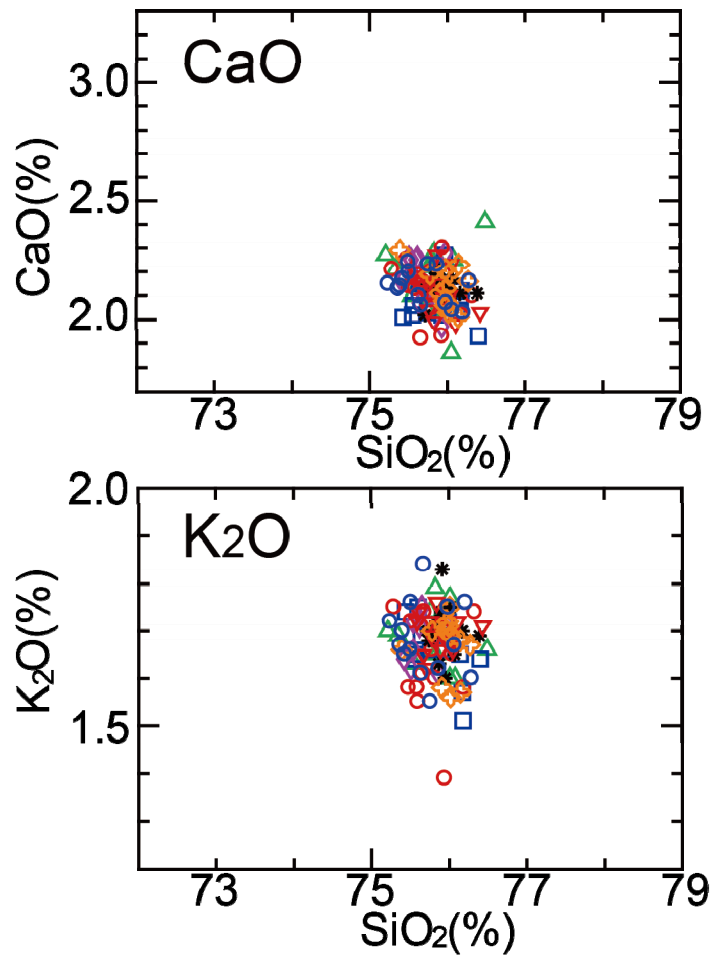


図2 「ゾンネ」 S0219A 航海で採取された海底堆積物コアの柱状図
日本海溝底のコアは基本的に同じ岩相層序を示す。



JT42(△)とJT48(□)とJT40(◇)とJT71(○)と
JT73(*)とJT72(▽)とJT39(+)とJT53(○)

図3 日本海溝底のコアのタービダイト2と3の間に挟在する火山灰層の火山ガラスの分析結果

JT39; 16431-1, JT40 & JT42; 16433-1, JT48; 16442-1, JT53; 16444-1, JT71; PC03, JT72; PC04, JT73; PC06。ただし、16442-1 コアは斜面域、16444-1 コアはより南の日本海溝底から採取されたコア。

表1 「みらい」MR12-E01 航海 PC03 コアと PC06 コアの有機物を用いた放射性炭素年代測定結果

Core	Depth	Conventional 14C Age	Sediment Type	Core	Depth	Conventional 14C Age	Sediment Type
MR12-E01 PC03	39.0-41.0	2640	30 HP	MR12-E01 PC06	49.0-51.0	3470	30 HP
	78.4-80.4	3040	30 HP		89.0-91.0	6160	30 TM
	138.4-140.4	3150	30 HP		140.0-142.0	2960	30 HP
	178.8-180.8	5370	40 TM		160.0-162.0	3550	30 HP
	276.8-278.8	5690	30 TM		220.0-222.0	3460	30 HP
	377.1-379.1	6130	30 TM		320.2-322.2	4110	30 HP
	456.5-458.5	3480	30 HP		420.2-422.2	4230	30 HP
	469.5-471.5	4390	30 HP		524.8-526.8	5250	30 HP
	577.0-579.0	2930	30 HP		628.3-630.3	5900	30 HP
	657.0-659.0	3580	30 HP		734.3-736.3	6200	30 HP
	777.5-779.5	8920	40 TM		878.3-880.3	6480	40 HP
	878.2-880.2	7830	40 TM		919.2-921.2	6820	40 HP

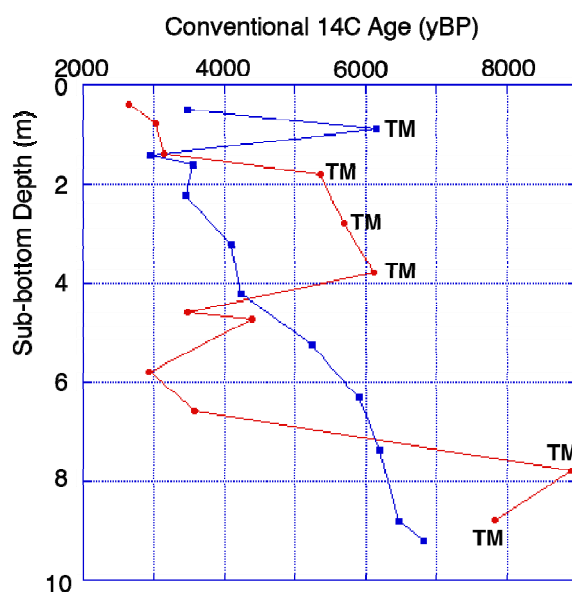


図4 「みらい」MR12-E01 航海 PC03 (赤) と PC06 (青) の有機物の放射性炭素年代から求めた堆積速度曲線
タービダイト泥 (TM) では古い年代が得られている。

以上のような日本海溝底堆積物の岩相層序と年代の結果を仙台平野の遡上型津波堆積物の層序と比較してみる。仙台平野では、To-a 火山灰の下位に 869 年貞観津波堆積物、上位に 1-2 枚の津波堆積物の存在が確認されている (澤井ほか、2008)。同様な津波堆積物の層序は石巻平野でも確認される (宍倉ほか、2007)。To-a 火山灰の上位の津波堆積物は、仙台平野では 1611 年慶長津波 (澤井ほか、2008) に、石巻平野では 14 世紀と 14 世紀以降 (1611 年慶長津波?) の津波 (宍倉ほか、2007) によって形成されたとされており、その正確な形成時期についてはまだ検討すべきであるが、仙台～石巻地域においては To-a 火山灰の上下に津波堆積物があるのは共通している。今回得られた日本海溝底の厚いタービダイト層も To-a 火山灰を挟んで 2 枚認められ、仙台～石巻地域の津波堆積物の層序と類似している。これらが互いに対比できるとすると、日本海溝底のタービダ

イト3が貞観津波に、タービダイト2が慶長津波あるいは14世紀の津波に対応する可能性が指摘できる。この対応関係の確認のためには、仙台平野でのTo-a火山灰を海域コアの火山灰と同様な手法で分析し、両者が同じものであることをまず確認することが必要である。

2011年の地震時においては、三陸沖の広い範囲で地震／津波に伴うイベント堆積物の形成が確認された (Ikehara *et al.*, 2011; 池原ほか, 2011)。これらを詳細に観察すると、いずれも明瞭な侵食面をもつものの、侵食面直上のイベント層下部に平行葉理あるいは斜交葉理をもつ砂層が存在し、上方に細粒化してイベント層上部が泥となるタービダイト型の構造をもつもの (図5) と侵食面の上に薄い均質な泥だけが乗るもの (図6) に分けられるタービダイト型のもものは三陸沖前弧斜面域から仙台沖外側陸棚まで広い範囲に分布し、2011年の地震／津波による混濁流の発生が広範囲で起こったことを示している。これは地震後に複数箇所でも混濁流によると考えられる海底ケーブルの切断事故が起こったこと (白崎ほか, 2012) と調和的である。タービダイト型のものについては、海底を土砂が長距離移動してきた可能性があるため、典型的な2地点の試料について、底生有孔虫群集を用いてタービダイトの給源推定を行った。結果は、水深843mの地点5についてはタービダイト層下部の砂層部分は下位の通常時の堆積物 (半遠洋性泥) と組成上に有意な違いは認められず、採取地点とほぼ同じ水深の土砂が移動したものと判断できた (図7A)。しかし、この地点の最上部の泥からはほぼ同じ水深を示す群集だけでなく、陸棚域を示す群集も含まれていることがわかった。このことは2011年の地震／津波によって、三陸沖の陸棚域において底質を巻き上げて混濁流を発生させるようなプロセスがあったことを示唆する。一方、水深1446mの地点6においては、タービダイトと半遠洋性泥の間で底生有孔虫群集に明瞭な違いが認められた (図7B)。タービダイト中で増加する種は Matoba (1976) による三陸沖の表層堆積物中での水深分布 (図7C) と比較すると水深900m付近で多産する種であり、タービダイトを構成する粒子はこのあたりの水深から供給されたものと推定される。

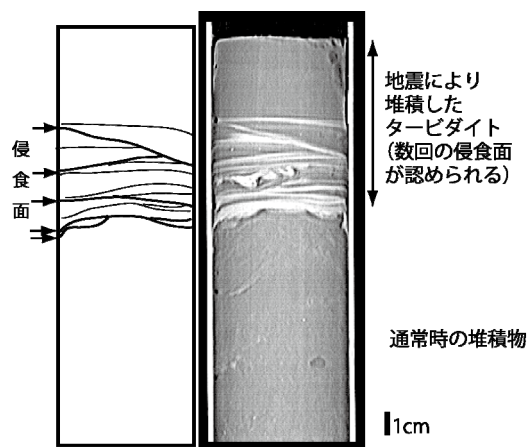


図5 牡鹿半島東方沖から淡青丸 KT-11-17 航海で採取された表層堆積物試料の X 線透過画像とそのスケッチ (Ikehara *et al.*, 2011 を日本語に翻訳)
 基底の侵食面の上位に内部侵食面をもつ砂層が乗り、その上にタービダイト泥が乗るタービダイト型のイベント堆積層である。

KT-11-17 St.19

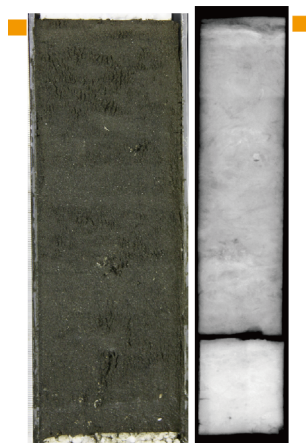


図6 三陸沖外側陸棚から淡青丸 KT-11-17 航海で採取された表層堆積物試料の写真と軟 X 線透過画像
 軟 X 線透過画像の幅が 5cm。黄色で示した部分が 2011 年のイベント堆積層。

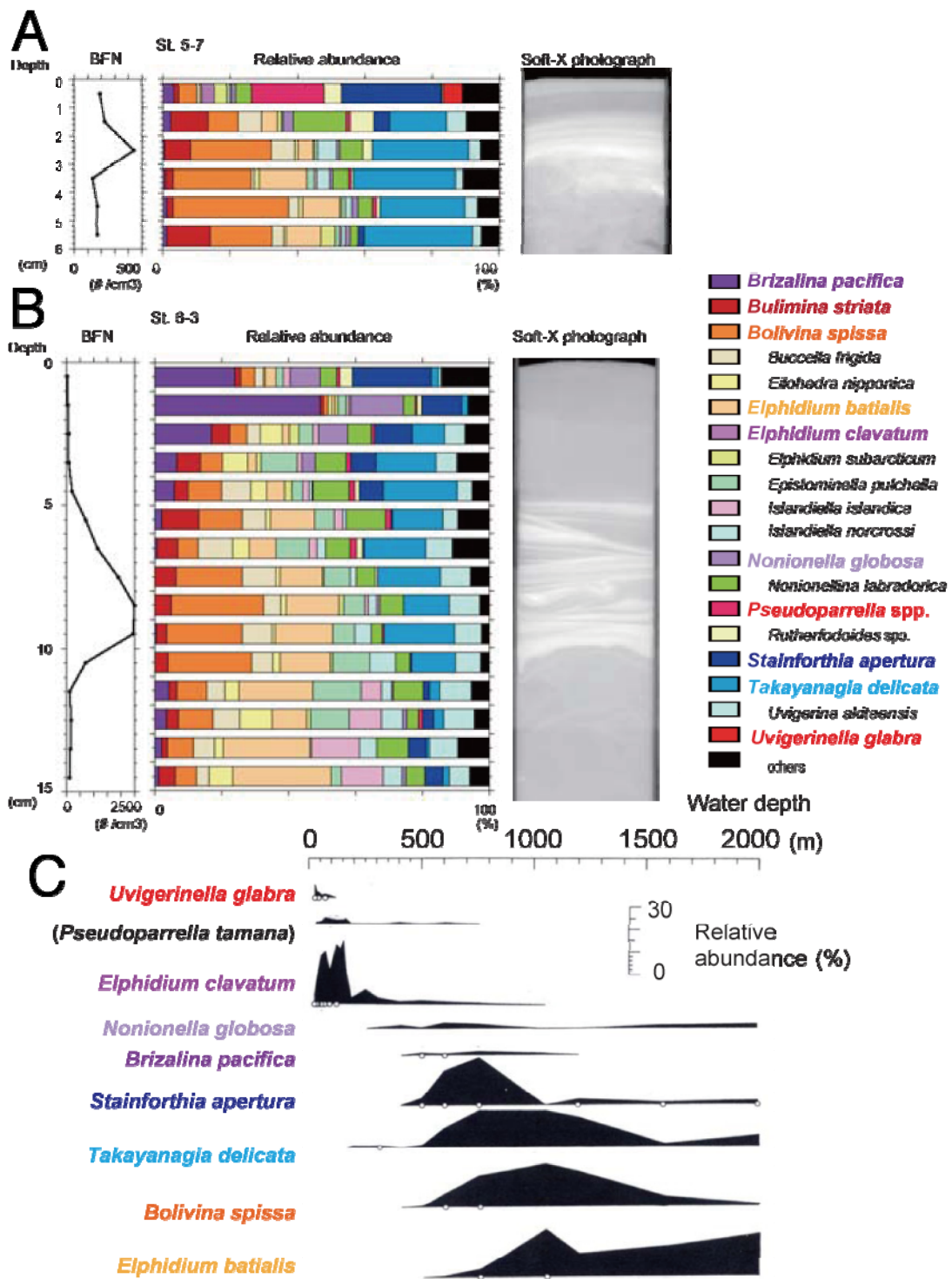


図7 三陸沖斜面域の2地点の底生有孔虫群集分析結果
 A; KT11-17 st.5 の分析結果、B; KT11-17 st.6 の分析結果、C; Matoba (1976)による三陸沖表層堆積物中の底生有孔虫群集。

2011年の地震／津波による海底地形変化やベッドフォームの形成、イベント堆積物の形成は気仙沼湾などの内湾 (Haraguchi *et al.*, 2013 など) から仙台湾陸棚上 (Ikehara *et al.*, 2011)、前弧斜面域から日本海溝底にまで渡る広い範囲で認められている (池原, 2012)。イベント堆積物の厚さから地震や津波の規模を推定することは困難であるが、大きな地震では強震動を受ける場が広くなり、また巨大津波では広範囲で浅海域の海底に擾乱を与えることが予想される。したがって、イベント堆積物の分布の広域性は地震の規模を推定する一つの方法になる可能性がある。過去の地震／津波堆積物の広域的な分布を把握するために、海洋研究開発機構の調査船「なつしま」による三陸沖海域の調査航海 (2013年1月21日～2013年2月9日) を海洋研究開発機構との密接な連携のもとに実施した。航海では岩手～福島沖の前弧斜面域で海底堆積物コアを採取する予定であったが、天候不良のため、三陸沖の8地点から試料採取されたにすぎない。採取されたコアの肉眼記載は図7に示した。コア中には多数の火山灰が挟在するので、今後の分析により今回採取されたコア間及び既存コア並びに陸上の地層記録との対比と堆積年代推定が可能になると期待される。また、仙台沖斜面から採取されたコア PC08 にはコア最表層だけでなくコアの下位にも砂層が確認され、過去の地震／津波イベントを記録している可能性がある。今後、年代測定を含めた分析を実施し、解析を進める予定である。

(d) 結論ならびに今後の課題

以上のように、「みらい」の MR12-E01 航海並びに「ゾンネ」の S0219A 航海で 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域近傍の日本海溝底から採取された堆積物コア試料には、3枚の厚いタービダイト層が確認された。このうちの最表層のものは 2011 年の地震／津波に対応して形成されたものである。また、コアに挟在する火山灰層の化学組成、堆積物中の有機物による年代測定、放散虫群集の結果はこれらの堆積物が完新世であること、厚いタービダイト層が仙台平野の津波堆積物に対比される可能性があることを示した。現時点では、日本海溝底の堆積物について 100 年精度での年代決定は困難であるが、より正確な年代決定が可能となれば、この対比の可否を評価できると考えられる。日本海溝は沈み込む太平洋プレートのホルスト-グラベン構造に応じて小さな海盆が連なって形作られている。このため、地震や津波時にある斜面や海底谷から日本海溝底に供給された土砂は海盆を隔てる地形的高まりを大きく越えて堆積しにくいと考えられる。すなわち、ある海盆の堆積物中での地震性タービダイトの存在は、その近傍で地震に伴う海底変動が発生したことを示しているであろう。日本海溝底の複数の海盆におけるタービダイトを適切に対比し、さらにそれと陸域の津波堆積物を正確に対比することは、津波を発生させた地震や海底変動の発生域の特定に貢献する可能性があるため、今後さらに検討を進める必要がある。

2011 年の地震／津波によるイベント堆積物は三陸沖の沿岸域から海溝底まで広い範囲で確認された。地震や津波による広域的な混濁流の発生がその広範囲でのイベント堆積物の同時形成に重要な役目を果たしたと考えられる。特に、浅海域に侵入した津波が海底堆積物を巻き上げて高懸濁水を作り、その崩壊によって混濁流が発生した可能性がある。Sugawara and Goto (2012) による津波の数値計算結果は水深数百 m の海底でも

未固結表層堆積物の巻き上げを生じさせえることを示しており、このようなプロセスの検討が地震／津波イベント堆積物の形成過程の理解に重要である。一方、一つの地震イベントによるタービダイトが多様な特徴を持つこともわかった。今後は、タービダイトの堆積の同時性と特徴の多様性を意識しつつ、それぞれの場所での堆積プロセスも含めた地震性堆積物の堆積過程の理解が必要である。このためには、底生有孔虫など堆積物粒子の給源水深や海底下深度を推定しうる指標の解析と数値計算の結合が必要になるであろう。

2011年の地震／津波によるイベント堆積物が今後どのように保存されていくかも今後の重要な研究課題である。三陸沖は海洋表層での一次生産が高く、海底表面のベントスの活動も活発である。生物活動はイベント層を破壊し、地層記録として残さない方向に働く可能性が高い。海底の地震／津波イベント堆積物を用いた過去の地震／津波発生履歴の検討を進める上でも、2011年のイベント堆積物の経年変化をモニタリングしていくことが重要である。

(e) 引用文献

- Adams, J., Paleoseismicity of the Cascade subduction zone: evidence from turbidites off the Oregon-Washington margin, *Tectonics*, **9**, 569-583, 1990.
- Fujiwara, T., S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi and Y. Kaneda, The 2011 Tohoku-oki Earthquake: Displacement reaching the trench axis, *Science*, **334**, 1240, 2011.
- Goldfinger, C., C.H. Nelson, J.E. Johnson and the Shipboard Scientific Party, Holocene earthquake records from the Cascadia subduction zone and northern San Andreas Fault based on precise dating of offshore turbidites, *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, 555-577, 2003.
- Haraguchi, T., Goto, K., Sato, M., Yoshinaga, Y., Yamaguchi, N. and Takahashi, T., Large bedform generated by the 2011 Tohoku-oki tsunami at Kesennume Bay, *Japan, Mar. Geol.*, **335**, 200-205, 2013.
- 池原 研, 地震性堆積物を用いた地震発生年代と発生間隔の解析, *地調月報*, **51**, 89-102, 2000a.
- 池原 研, 海底堆積物中の浮遊性有孔虫と有機炭素を用いた放射性炭素年代値の比較, *地調月報*, **51**, 299-307, 2000b.
- 池原 研, 地震／津波による浅海域での粒子輸送・堆積現象：過去の地震／津波イベントの理解のための海底堆積物研究の現状と課題, *堆積学研究*, **71**, 141-147, 2012.
- 池原 研・片山 肇・辻野 匠・荒井晃作・板木拓也・保柳康一, 深海底タービダイトを用いた地震発生間隔推定における堆積作用理解の重要性-北海道沖日本海東縁海洋海山周辺の場合-, *地質学論*, **58**, 111-122, 2004.
- 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**, 477-490, 2007.
- Ikehara, K., 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 Fifth International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences*, **74**, 2011.
- 池原 研・宇佐見和子・ロバート・ジェンキンズ・芦寿一郎・入野智久・渡辺 豊・氏家 崇, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震により堆積したタービダイトの特徴, *2011 年日本堆積学会長崎大会講演要旨*, 48-49, 2011.
- 井岡 昇・池原 研・田中裕一郎・山崎俊嗣, 西太平洋の堆積物の特徴: 海洋における炭素循環研究のために, *月刊海洋*, **26**, 375-378, 1994.
- Itaki, T. and Ikehara, K., Holocene changes of the Okhotsk Sea Intermediate Water and their relation to atmospheric circulation, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24309, doi: 10.1029/2004GL021384, 2004.
- 町田 洋・新井房夫, 新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺], 336p, 東大出版, 2003.
- Matoba, Y., Recent foraminiferal assemblages off Sendai, northeast Japan, in Schafer, C.T. and Pelletier, B.R. (eds.) First International Symposium on Benthic Foraminifera of Continental Margins, Part A, Ecology and Biology, Maritime Sediments, Spec. Publ., 1, 205-220, 1976.
- Ohkushi, K., Itaki, T. and Nemoto, N., Last Glacial-Holocene change in intermediate-water ventilation in the Northwestern Pacific, *Quat. Sci. Rev.*, **22**, 1477-1484, 2003.
- Sakaguchi, A., G. Kimura, M. Strasser, E. J. Screaton, D. Curewitz and M. Murayama, Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, *Geology*, **39**, 919-922, 2011.
- 澤井祐紀・宍倉正展・小松原純子, 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, *活断層・古地震研究報告*, **8**, 17-70, 2008.
- 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**, 17-20, 2012.
- 宍倉正展・澤井祐紀・岡村行信・小松原純子・Than Tin Aung・石山達也・藤原 治・藤野滋弘, 石巻平野における津波堆積物の分布と年代, *活断層・古地震研究報告*, **7**, 31-46, 2007.
- Sugawara, D. and Goto, K., Numerical modeling of the 2011 Tohoku-oki tsunami in the offshore and onshore of Sendai Plain, *Japan, Sed. Geol.*, **282**, 110-123, 2012.