

3. 2 海底堆積物調査

3. 2. 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) 5 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
 - 4) 平成 26 年度
 - 5) 平成 27 年度

(2) 平成 23 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. 2 海底堆積物調査

3. 2. 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	副研究部門長	池原 研
地質情報研究部門	研究グループ長	荒井 晃作
地質情報研究部門	研究員	佐藤 智之

(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) 5ヵ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：

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。平成23、24年度の結果も踏まえ、自航式深海底サンプル採取システム(NSS)によるピンポイント採泥を含めた調査を行う。平成23、24年度の本プロジェクトによる調査航海や他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、堆積物コア中の地震性堆積物の識別とその堆積年代の決

定から、過去における地震発生履歴の検討を行う。

4) 平成 26 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。本プロジェクトでの調査結果などを踏まえ、NSS によるピンポイント採泥を行う。また、本プロジェクトによる調査航海や関連する他の調査航海などにより本海域から採取された堆積物コアについて堆積物コア中の地震性堆積物の識別とその堆積年代の決定から、過去における地震発生履歴の検討を行う。

5) 平成 27 年度：

本プロジェクトによる調査航海や他の調査航海などにより採取された堆積物コアについて、堆積物コア中の地震性堆積物の識別とその堆積年代の決定を進めるとともに、本プロジェクトなどで取得したデータを取りまとめ、海底堆積物に記録された地震発生履歴を解明する。

(2) 平成 23 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航海で震源域近傍の日本海溝域で採取された表層堆積物試料には2011年の地震によると考えられるタービダイトが確認された。これは明瞭な基底と極細粒砂から上方に細粒化する構造をもち、最上部に珪藻軟泥を乗せるユニットから構成され、このようなユニットが複数累重する構造をもっていた。これは一つの地震イベントにおいて、複数の混濁流が時間をおいて日本海溝に流れ込んだことを示唆する。同様な構造は淡青丸による海溝陸側下部斜面から採取された試料にも認められた。このような構造をもつタービダイトは日本海溝から採取されたピストンコア試料の中にも認められ、過去の地震イベントを示す可能性が高い。

(b) 業務の実施方法

過去の地震性堆積物の認定のため、2011年東北地方太平洋沖地震と津波による海底変動に伴って形成された海底の地震性堆積物の特徴と分布を把握する目的で、今年度は二つの調査研究を実施した。一つは、海洋研究開発機構との密接な連携の下、同機構の調査船「みらい」による調査航海 MR12-E01 に参加し、震源域近傍の日本海溝周辺から海底堆積物コアを採取した。もう一つは、淡青丸の KT-11-17 航海で震源域周辺からマルチプルコアラーにより採取された表層堆積物試料の解析である。これらにより、2011年の地震によるタービダイトの特徴とその空間的变化をとらえることを行った。

「みらい」の航海では、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周辺の6地点(図1、表1)で5mあるいは10mピストンコアラーによる海底コア試料の採取を行った。採取された試料は、5mピストンコアラーでは440.9(PC01)、458.2(PC02)、461.2cm(PC05)、10mピストンコアラーでは948.6

(PC03)、961.1 (PC04)、917.2cm (PC06)であった (図 2)。ピストンコアラでは最表層の軟らかい堆積層を飛ばす恐れがあるので、これらの採泥時には長尺のグラビティコアラをパイロットコアラとして使用し、最表層の堆積物の回収につとめた。回収された試料について、船上において非破壊物性測定、岩相観察、色測定を行った。

また、淡青丸のKT-11-17航海で採取された表層堆積物試料のいくつかについて、X線CT装置を用いた堆積構造の三次元解析を行った。

(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震動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も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 (2000); Goldfinger *et al.* (2003); 池原ほか (2004); 池原ほか (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航海の結果、6地点のパイロットコアラ試料のうちPC02地点を除く5地点の試料からその最表層に2011年の地震によると考えられる堆積層(タービダイト)を認定した。これらは明瞭な基底をもち、極細粒砂から上方に細粒化する構造を有する。また、その最上位に珪藻遺骸からなる軟泥を乗せる。この構造は、非破壊物性測定プロファイルの上方への密度及び帯磁率の減少、間隙率の増加と対応する (図 3)。色プロファイルのa*値はこの変化に対応して減少(緑っぽくなる)、b*値はわずかに増加(黄色っぽくなる)する。そして級化するユニットが複数累重する構造をもつ (図 3)。肉眼記載と物性測定プロファイルに微妙な違いがあるが、これらはより細かな組成の変化に対応している可能性がある。生物源粒子を最上部に乗せる特徴を持つタービダイトは熊野沖や別府湾の細粒タービダイトからも知られている (Ikehara *et al.*, 2011) ので、このような構造は細粒タービダイトの一般的特徴の一つである可能性が高い。一方、このような累重構造が形成されるには次の混濁流の流入以前にタービダイト泥が沈積しているか、タービダイト泥を沈積させる高濁度の水塊が次の混濁流の水塊の密度よりも十分に大きいことが必要になる。Ikehara *et al.* (2011)は熊野沖のタービダイト泥の分析結果からタービダイト泥を沈積させる海底直上の水塊が“フルイドマッド (fluid mud)”の状態であったことを推定したが、今回の結果から、地震直後には密度の異なる“フルイドマッド”が累重した水塊構造をもっていた可能性が示唆される。これらが、

2011年の地震による堆積物であるかは未確認であるが、堆積物が非常に軟らかい（含水率が高い）こと、最表層に表面酸化層が見られないこと、最上部のユニットの表面が試料最表面に一致することから、2011年の地震による堆積物である可能性が高い。これらのタービダイトの組成や構造の特徴は、これらが珪藻質堆積物からなる海底斜面から粒子供給を受けた混濁流からの堆積物であることを示唆する。また、複数のユニットが累重することは混濁流の発生が複数回起こり、複数の混濁流が時間をおいて日本海溝の試料採取地点に到達してタービダイトを堆積させたことを示している。すなわち、2011年の地震において複数の混濁流が発生し、その少なくともいくつかは日本海溝には流入したことが明らかとなった。

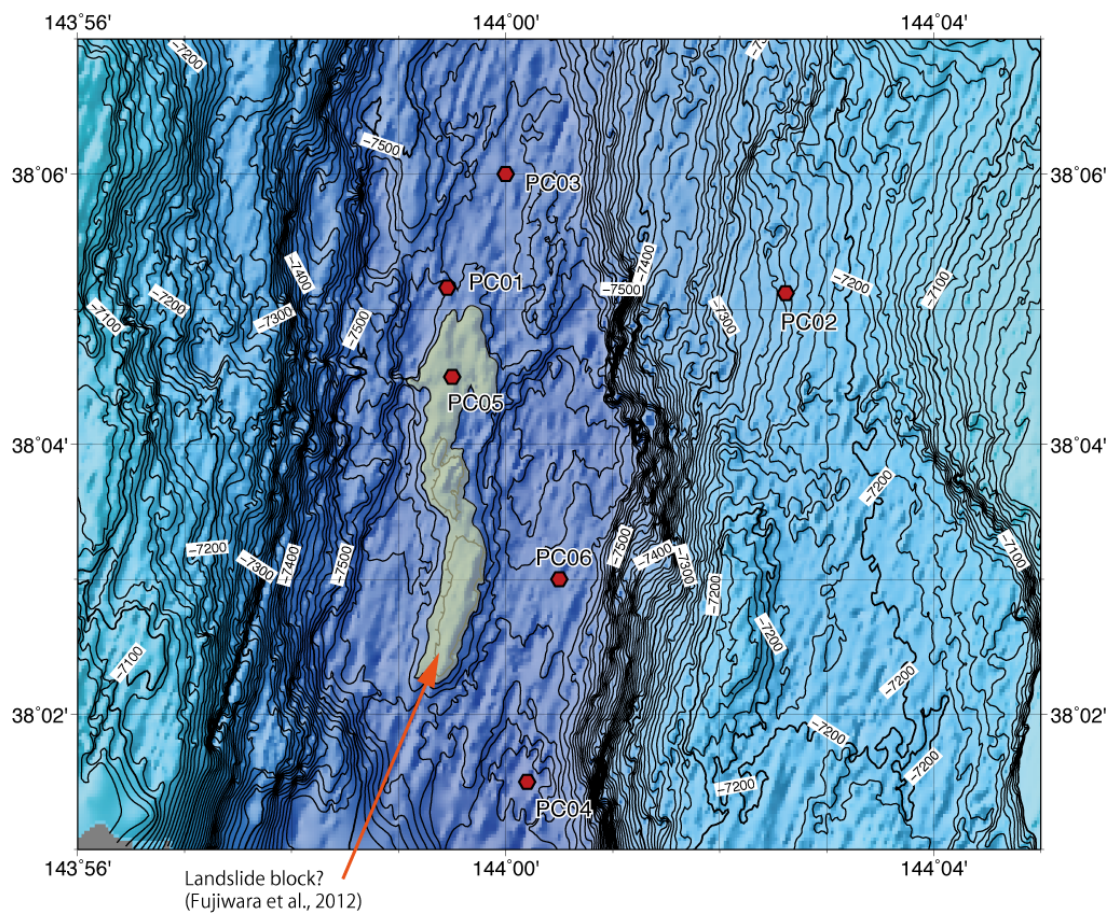


図1 「みらい」MR12-E01航海の海底堆積物試料採取地点

表1 「みらい」MR12-E01航海の試料採取地点

Table A Coring Summary_MR12-E01 cruise

Date (UTC) (yyymmdd)	Core ID	Corer type*	Location	Lat. (TP**)	Lon. (TP**)	Lat. (Ship)	Lon. (Ship)	Depth (m)	Corebarrel length (m)	Tension max. (t)	Core length (cm)
2012/2/21	PC01	Inner type PC	Off Saoniku (Camera 1)	38°05.1540'N	143°59.4602'E	38°05.1879'N	143°59.4466'E	7,546	5	8.0	440.9
	PL01	74 diam. corer							0.7		54.0
2012/2/21	PC02	Inner type PC	Off Saoniku (Camera 2)	38°05.1239'N	144°02.6097'E	38°05.1192'N	144°02.6381'E	7,249	5	8.4	458.2
	PL02	74 diam. corer							0.7		53.2
2012/2/22	PC03	Inner type PC	Off Saoniku (North 3)	38°05.9916'N	143°59.9781'E	38°06.0426'N	143°59.9913'E	7,541	10	8.0	948.6
	PL03	74 diam. corer							0.7		98.0
2012/2/28	PC04	Inner type PC	Off Saoniku (South 4)	38°01.4348'N	144°00.2359'E	38°01.5168'N	144°00.1446'E	7,554	10	8.3	961.1
	PL04	74 diam. corer							0.7		75.0
2012/2/28	PC05	Inner type PC	Off Saoniku (Top 10)	38°04.4927'N	143°59.4269'E	38°04.5068'N	143°59.5845'E	7,517	5	8.0	469.7
	PL05	74 diam. corer							0.7		86.0
2012/2/29	PC06	Inner type PC	Off Saoniku (Front 9)	38°03.0143'N	144°00.4309'E	38°02.9667'N	144°00.5661'E	7,541	10	8.0	923.2
	PL06	74 diam. corer							0.7		78.0

*Weight of the PC is 900 kg.

**TP* is position by the transponder, PC01-PC03 are Glass buoy type above 3,000 m from PC, PC04-PC06 are Titan type above 200 m from PC.

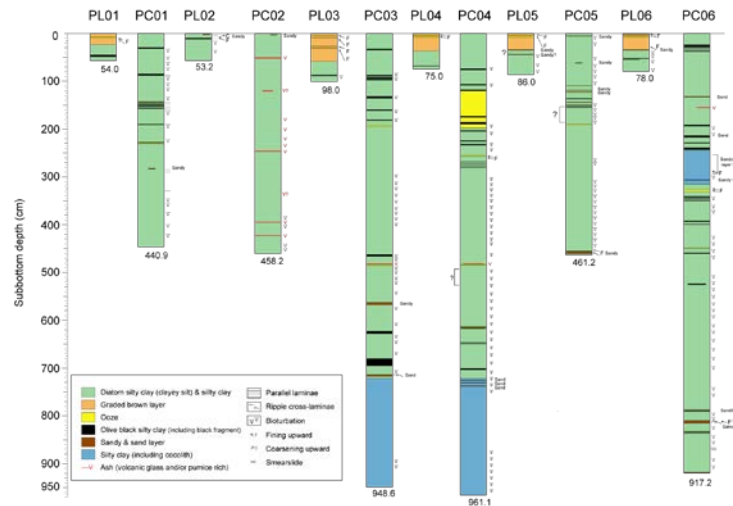


図2 「みらい」MR12-E01航海で採取された海底堆積物コアの柱状図
PCはピストンコーラー本体、PLはパイロットコーラーの試料を示す。

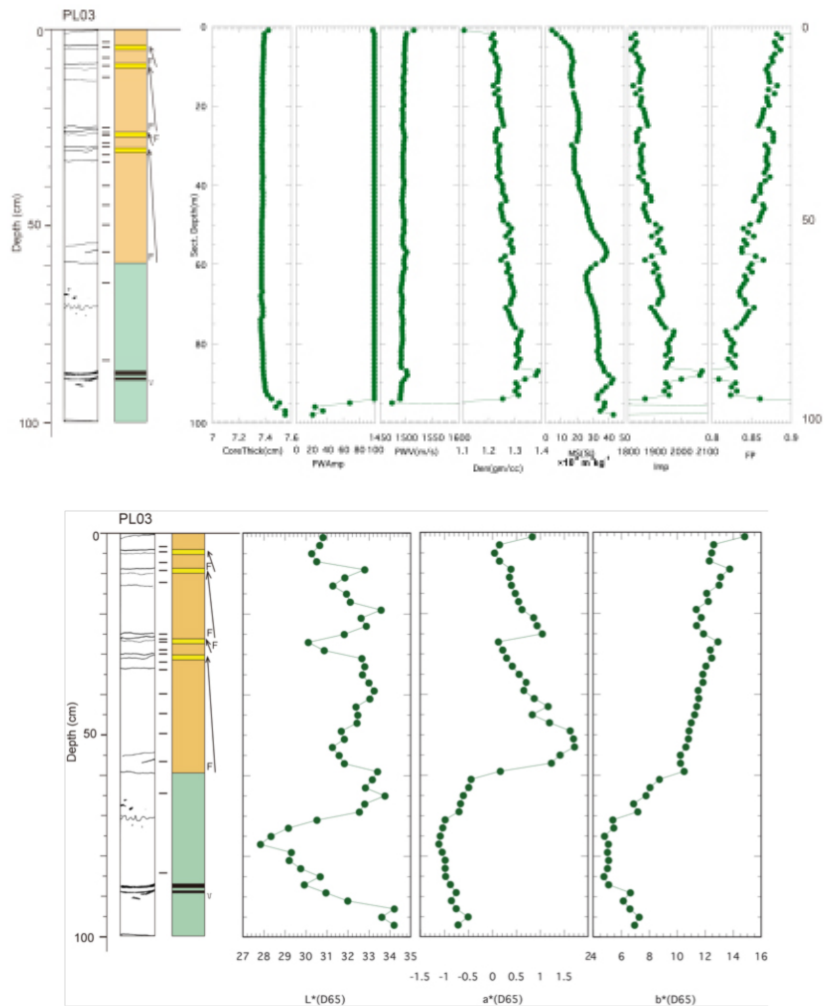


図3 「みらい」MR12-E01航海 PL03 コアに見られる 2011年東北地方太平洋沖地震によって形成されたと考えられるタービダイトとその物性及び色プロファイル
密度及び帯磁率が上方に減少する3つのユニットが累重している。色（特に a*値）もこれに対応して変化している。

2011年の地震時における複数の混濁流の発生は、後者の淡青丸 KT-11-17 試料の解析からも言える。淡青丸で2011年7～8月に採取された12地点の試料についての本課題実施前の解析から、一つの試料中で複数の混濁流の流下によると考えられる複数の内部侵食面をもつタービダイト砂層（図4）の存在や組成の異なるタービダイト泥の堆積が既に報告されている（Ikehara *et al.*, 2011; 池原ほか, 2011）。これらは混濁流が同じ地点を複数回にわたって流下したことで混濁流が一つの場所だけでなく広い範囲で発生したことを示唆する。また、「みらい」航海で日本海溝から採取されたものと同様の上方細粒化及び低密度化を示し、最上部に珪藻質堆積物を乗せる級化ユニットが複数累重すると解釈できる構造も下部斜面の堆積物に認められた（図5）。三陸沖海域は海洋表層での一次生産が高く、前弧海盆から斜面域には珪藻質の堆積物が広く分布している。このような堆積物を起源とする混濁流からの堆積物（タービダイト）は起源の堆積物組成を反映して、薄い砂層と珪藻質のタービダイト泥、そして最後に懸濁した底層水から沈積した珪藻軟泥が乗るような構造が一般的である可能性が高い。淡青丸の表層堆積物試料の一部については、 ^{134}Cs が表層で検出され、タービダイト下の半遠洋性泥で検出されないこと、最表層の泥に生物擾乱が認められないことから、2011年の地震時のものであることがほぼ確実である（池原ほか, 2011）。「みらい」の結果も含めた以上の結果は、2011年東北地方太平洋沖地震の地震／津波により震源域周辺の広域で、また浅海域から海溝底までの広い水深帯で、タービダイトが形成されたことを示している。

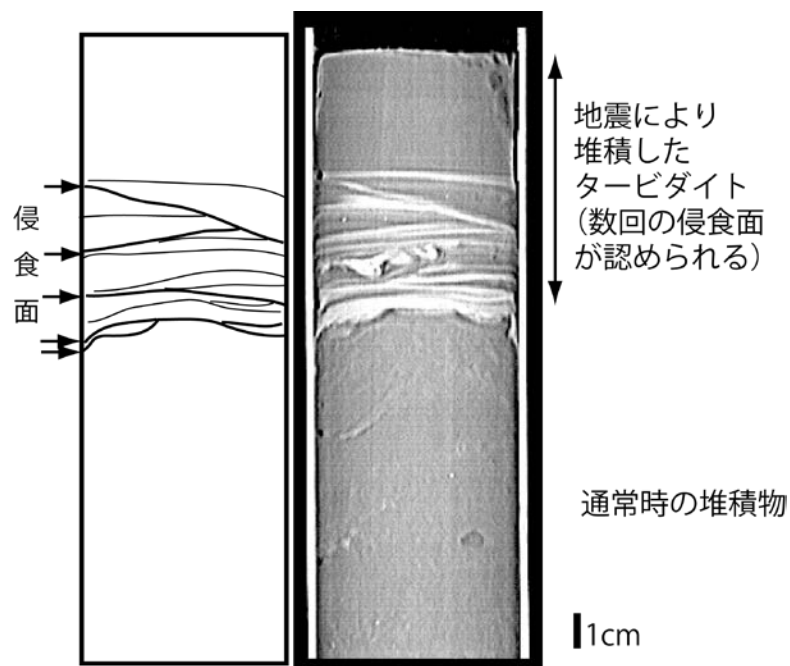


図4 牡鹿半島東方沖から淡青丸 KT-11-17 航海で採取された表層堆積物試料の X線透過画像とそのスケッチ（Ikehara *et al.*, 2011 を日本語に翻訳）タービダイト砂の中の複数の侵食面は複数回の混濁流の流下を示唆する。

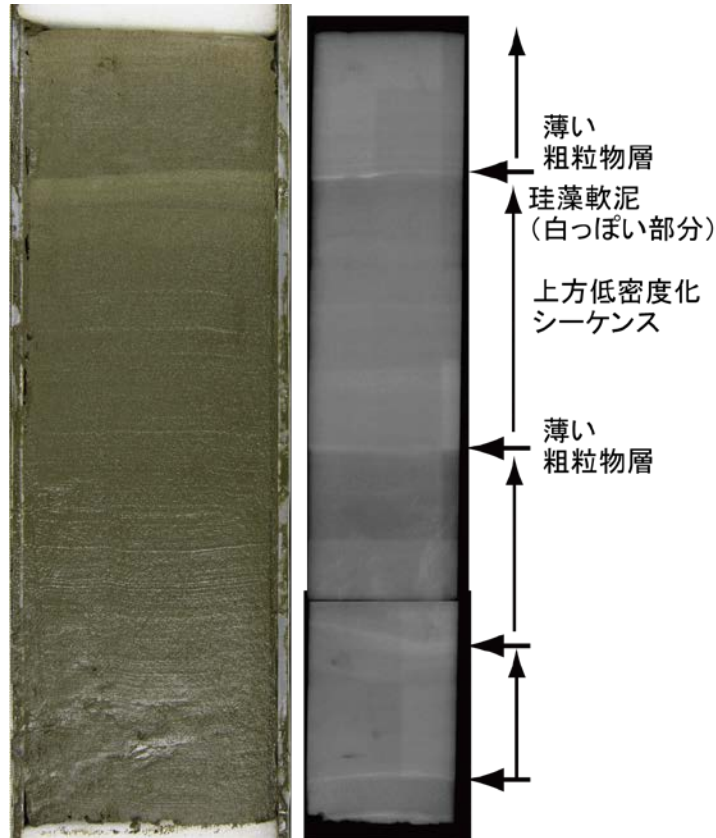


図5 三陸沖海溝陸側斜面下部から淡青丸 KT-11-17 航海で採取された表層堆積物試料の写真と軟 X 線透過画像。軟 X 線透過画像の幅が 5cm。画像の縦横比は 1 : 1。

「みらい」航海で採取された海底堆積物コア中にはパイロットコア表層の 2011 年の地震によるタービダイトと似た特徴を持つ砂層が確認された。すなわち、基底が明瞭で級化構造をもち、最上部に珩藻質の泥を乗せ、場合によってはそのユニットが累重する構造をもつタービダイトがコアのより深部にも確認された(図2)。このようなタービダイトの存在は過去における 2011 年と同様な地震の発生を示唆するものの可能性がある。すなわち、タービダイトの堆積年代の決定方法の問題はあるにしても、日本海溝域においても、南海トラフ(池原、2001)、北海道西方沖(下川ほか、2002)、千島海溝(Noda *et al.*, 2004、2008)同様、タービダイトを用いた地震発生履歴の解読の可能性が今回初めて示唆されたと言える。

タービダイトを古地震記録として使う際には、タービダイトの堆積が地震によるものであるかどうかの確認が必要となる(例えば、池原、2000)。今回の結果から広域かつ浅海から深海までの様々な水深帯における混濁流の同時発生は地震性タービダイトの一つの特徴である可能性が示唆された。その一方で一つのイベントで形成されるタービダイトの多様性もわかった。すなわち、一つの基準だけである場所のタービダイトが地震性であるか否かを判断できない場合があるということである。その場の堆積環境などに応じたタービダイトの地震性/非地震性の判断基準の確立が今後の課題の一つである。

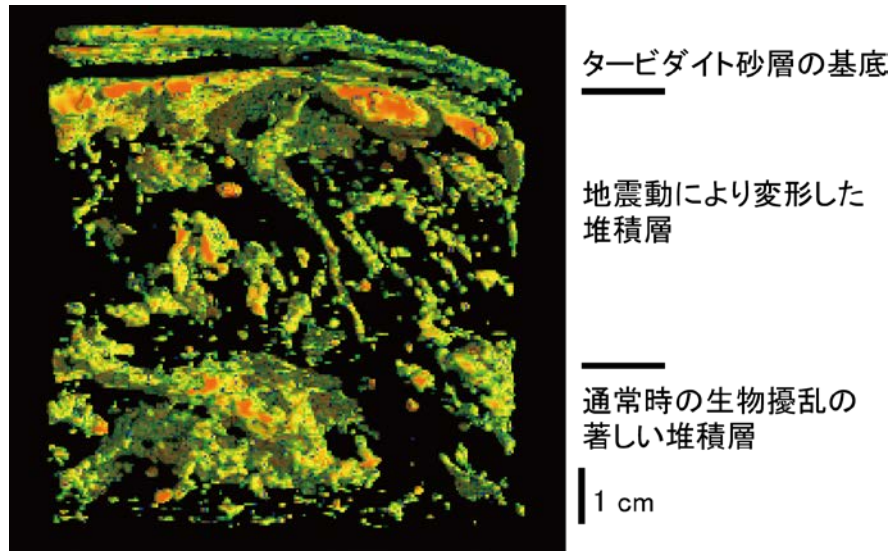


図6 仙台沖から淡青丸 KT-11-17 航海で採取された表層堆積物試料にみられる地震動により変形した堆積層の X 線 CT 三次元画像。青から緑，オレンジ，赤に向かって密度が大きくなる。

本年度の本課題の中で淡青丸試料について実施したものは X 線 CT 装置を用いた三次元構造解析のルーチン化である。タービダイトや水中土石流堆積物、海底地すべり堆積物などは流れや堆積層の移動方向があるので、流れの方向や特性に応じた堆積構造や粒子配列を示す。X 線 CT 装置による堆積構造の非破壊三次元解析は地震性タービダイトの起源や特定に有効である可能性がある。本年度は淡青丸で採取された試料のうち3つについて X 線 CT による画像データの取得とその解析を行った。その結果、タービダイトの堆積構造については目立った結果は得られなかったが、仙台沖の試料においてはタービダイトの下位の半遠洋性泥に明瞭な変形構造が確認された(図6)。タービダイト堆積直前の堆積物の変形には地震時の震動が大きく関与していた可能性が高い。地震動は地震に特有のものであるので、地震動による変形構造とその後のタービダイトなどの堆積をあわせることで、震源近傍の地震動の大きい場所であれば浅海から深海までのいずれの場所にでも適用できる地震性/非地震性の判断基準の一つを作ることができる可能性がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

以上のように、「みらい」の MR12-E01 航海並びに淡青丸の KT-11-17 航海で 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域周辺から採取された表層堆積物試料には、広い範囲、浅海域から海溝底までの広い水深範囲においてこの地震/津波に伴うイベント堆積物(タービダイト)の分布が確認された。このような広い範囲におけるイベント堆積物の同時形成は地震/津波による堆積物の特徴の一つであると考えられる。その一方、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。

また、日本海溝底から採取されたピストンコア試料には、最表層で認められた2011年の地震／津波イベント堆積物と同様な特徴を持つタービダイトが挟在していることがわかった。これは日本周辺の他の沈み込み帯周辺と同様に東北沖においても海底堆積物を用いた地震発生履歴の検討が可能であることを示している。一方、調査した日本海溝は水深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。ピストンコア試料には火山灰の挟在が認められているので、これらの分析により、堆積年代の概要をつかむことが重要である。今後、火山灰の同定・対比を急ぐ必要がある。特に、この地域での2011年の津波の前の巨大津波イベントとされる869年貞観津波の津波堆積物の上位には十和田山起源の十和田-a火山灰（To-a）が存在する（澤井ほか、2008）。海底においても2011年と同様あるいはそれ以上のイベント堆積物が形成された場合には、その直下にTo-aが挟在することが期待される。海底の地震堆積物と陸上の津波堆積物を統合的に解釈することが、海底堆積物中の地震性堆積物の認定とそれによる地震発生履歴の検討のためにも重要である。

(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.
- 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, 2000.
- 池原 研, 深海底タービダイトを用いた南海トラフ東部における地震発生間隔の推定, 地学雑, **110**, 471-478, 2001.
- Ikehara, K., J. Ashi, K. Usami, T. Irino, N. Nishida and M. Kuwae, Submarine Topography Control on Fine-Grained Turbidite Deposition: Examples from off Kumano Slope and Beppu Bay, Japan, *Abstracts of Fifth International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences*, **73**, 2011.
- 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例-, 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.

Noda, A., T. Tsujino, R. Furukawa and N. Yoshimoto, Character, provenance, and recurrence intervals of Holocene turbidites in the Kushiro Submarine Canyon, eastern Hokkaido forearc, Japan, *Mem. Geol. Soc. Japan*, **58**, 123-135, 2004.

Noda, A., T. TuZino, Y. Kanai, R. Furukawa and J. Uchida, Paleoseismicity along the southern Kuril Trench deduced from submarine-fan turbidites, *Mar. Geol.*, **254**, 73-90, 2008.

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.

下川浩一・池原 研, 堆積物に残された古地震, 大竹政和・平 朝彦・太田陽子編「日本海東縁海域の活断層と地震テクトニクス」: 95-108, 東大出版, 2002.