

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 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. 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2011年東北地方太平洋沖地震以前の地震発生履歴の検討を行う。

(d) 3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実施した。

2) 平成24年度：

海洋研究開発機構が実施した調査航海に参加し、岩手県-宮城県沖の海域から海底堆積物コアを採取した。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月に実施された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った。

3) 平成25年度：

海洋研究開発機構が実施した調査航海に参加し、日本海溝陸側斜面下部の平坦面で海底堆積物コアを採取した。また、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った。さらに、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 25 年度の成果

(a) 業務の要約

平成24年度まで並びに本年度新たに三陸沖から採取された海底堆積物コアを対象に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、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を検討した。これらのコアの岩相観察、堆積構造解析、年代測定を行い、100～500年の地震性堆積層の平均堆積間隔を得た。また、調査海域の南部では北部や中部よりも地震性堆積層の堆積頻度が高く、堆積間隔も短いことがわかった。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。

(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からその北方で採取された海底堆積物試料の解析を行った。本年度は特に、地震性堆積物の堆積間隔の決定と広域性の確認を中心に検討を行った。試料としては、本研究課題で平成 24 年度に実施した調査船「なつしま」による NT13-02 航海並びに海洋研究開発機構による調査船「なつしま」の NT13-19 航海で採取された試料を用いた。特に、三陸沖海溝陸側斜面の広い範囲から試料が採取できた NT13-19 航海のコア試料について優先的に分析を進めた。試料は肉眼観察のあと、 $5 \times 20 \times 1$ cm 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、堆積物に挟在する火山灰層の組成並びに含まれる火山ガラスの屈折率測定を行い、既知の火山灰層との同定・対比を試みた。さらに堆積物中の有機物を用いた放射性炭素年代測定を実施した。これらの結果を総合して、堆積年代を推定し、地震性堆積物の平均堆積間隔を求めた。

また、石灰質微化石の保存が著しく悪い三陸沖の深海底堆積物のより高精度な堆積年代決定を目指して、光ルミネッセンス年代測定法の本海域堆積物への適用の検討を行った。

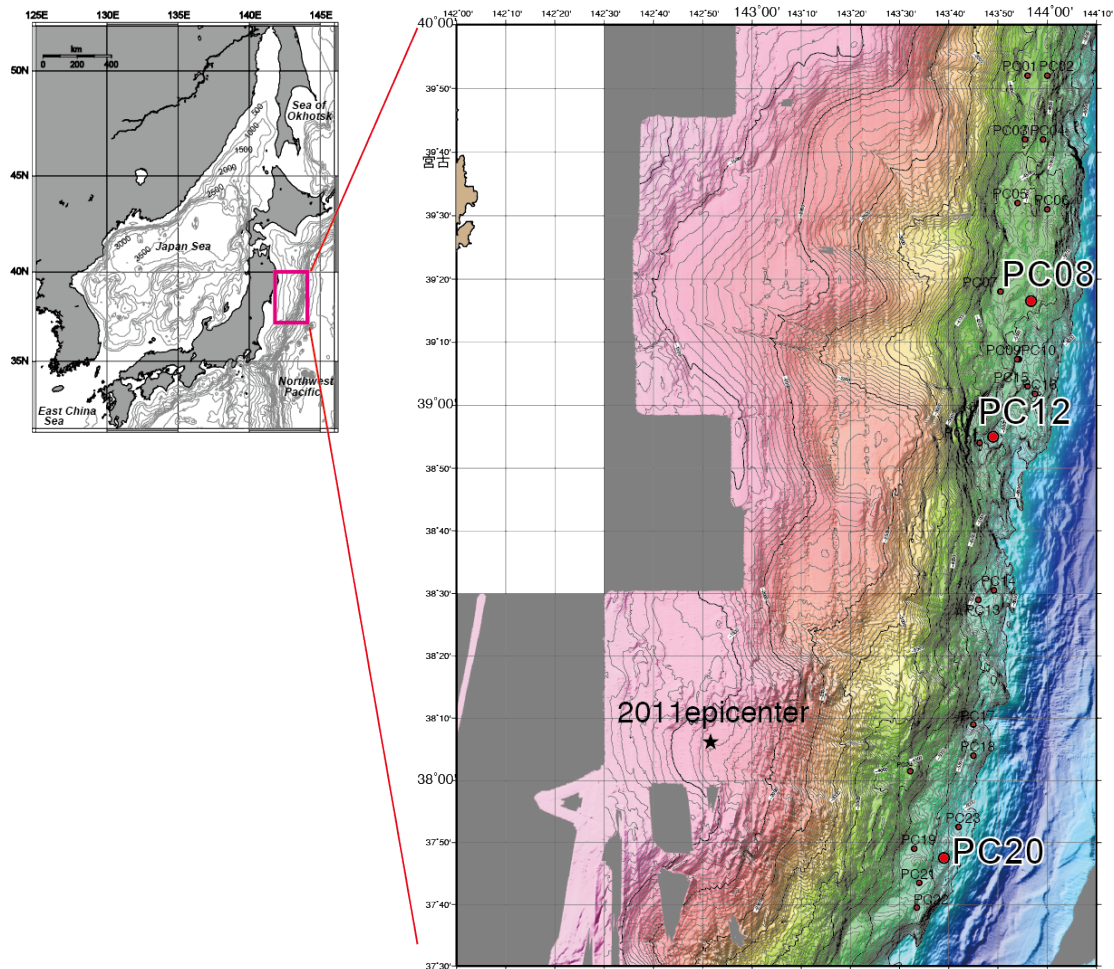


図1 「なつしま」NT13-19 航海における日本海溝陸側斜面域での試料採取地点
本航海で24本のピストンコア試料が採取された。太字で示したのが、
図2～4で例示したコアの採取地点。星印は2011年東北地方太平洋沖地震
の震源位置。

(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、最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 (Arai *et al.*, 2013; Ikehara *et al.*, in press)。震源近傍の海底では震動によって表層堆積物を破壊し、巻き上げたり、変形させるプロセスも提唱されている (Sakaguchi *et al.*, 2011; Ikehara *et al.*, in press)。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。また、ある地震によるタービダイトの分布は、地震発生域（余震域）を大きく越えて分布しない（例えば、下川・池原, 2002）ので、ある一つの地震イベントによるタービダイトの分布の広さは地震発生域（余震域）の広さを反映する可能性がある。もしこの関係が正しければ、タービダイトを広域対比することで過去の地震の大きさを推定することが可能となる。このためには、想定される震源域の外側までに渡った範囲から試料を採取し、タービダイトを対比することが必要となるが、これまでこのような検討は十分になされていない。このため本研究では、その基礎となるタービダイトの広域対比を目指して、日本海溝沿いの広い範囲から採取されたコアの分析を進めた。

表1 NT13-19 航海で採取された海底堆積物コア中のタービダイトの挟在状況

| Core | Core length (m) | No of turbidite in core | No. of turbidite(#/m) | Core | Core length (m) | No of turbidite in core | No. of turbidite(#/m) |
|------|-----------------|-------------------------|-----------------------|------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| PC01 | 2.53 | 7 | 2.8 | PC13 | 2.91 | 1 | 0.3 |
| PC02 | 5.56 | 18 | 3.2 | PC14 | 5.46 | 18 | 3.3 |
| PC03 | 2.65 | 7 | 2.6 | PC15 | 3.48 | 8 | 2.3 |
| PC04 | 5.02 | 5 | 1.0 | PC16 | 5.34 | 6 | 1.1 |
| PC05 | 3.53 | 3 | 0.8 | PC17 | 3.23 | 24 | 7.4 |
| PC06 | 5.24 | 7 | 1.3 | PC18 | 5.54 | 19 | 3.4 |
| PC07 | 2.85 | 8 | 2.8 | PC19 | 3.48 | 13 | 3.7 |
| PC08 | 5.34 | 16 | 3.0 | PC20 | 4.72 | 42 | 8.9 |
| PC09 | 3.58 | 6 | 1.7 | PC21 | 3.07 | 26 | 8.5 |
| PC10 | 5.36 | 35 | 6.5 | PC22 | 5.55 | 24 | 4.3 |
| PC11 | 3.34 | 5 | 1.5 | PC23 | 3.16 | 2 | 0.6 |
| PC12 | 5.52 | 9 | 1.6 | PC24 | 3.582 | 3 | 0.8 |

「なつしま」の NT13-19 航海（24 地点：図1）で日本海溝陸側斜面下部の平坦面（mid slope terrace）から採取されたコア試料は基本的に珪藻質細粒堆積物からなる。採取された多くのコアでは、下面が侵食的で、上方へ細粒化し、砂質部では平行葉理やリップル葉理が発達する粗粒層（図2～4）が認められる。これらの堆積構造の特徴は、Stow and Shanmugam (1980) の細粒タービダイトの構造と一致するので、混濁流から形成されたタービダイトと解釈される。この斜面域では、現在の陸上の河川に直結する海底谷はほとんど認められず、全体にプランクトン起源（珪藻質）であり、浅海域からの直接の堆積物供給は少ないと考えられるので、このタービダイトの堆積原因は、海域での地震による斜面崩壊である可能性が高い。実際、2011 年東北地方太平洋沖地震の際にも、地震後に日本海溝沿いの複数箇所では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ている（白崎ほか, 2012）。したがって、これらのタービダイトは地震起源である可能性が高い。タービダイトのコア中での挟在頻度は、ばらつきは大きいものの、海域の北部（宮古沖）で低く（おおよそ2枚/m）、南部で高い（5枚/m）傾向にあった（表1）。ただし、海域南部でも PC23 ではタービダイトの挟在が少なく、平坦面のどこでもタービダイトがたまっているわけではないことを示す。

これらのタービダイトの堆積年代決定のため、3つの分析を行った。一つはコア中に挟在する火山灰の分析である。火山灰に含まれる鉱物組成、構成する火山ガラスの形態と屈折率（表2：年代は町田・新井，2003による）から、白頭山起源の白頭山-苦小牧テフラ（B-Tm：10世紀）、榛名山起源の榛名-伊香保テフラ（Hr-FP：6世紀）、十和田火山起源の十和田-aテフラ（To-a：AD915）、十和田-中掇テフラ（To-Cu：約6,000年前）、濁川カルデラ起源の濁川テフラ（Ng：約15,000年前）、鳴子山起源の鳴子-柳沢テフラ（Nr-Y：41,000～63,000年前）が確認された。二つ目の方法として、堆積物中に含まれる浮遊性有孔虫遺骸を用いた放射性炭素年代測定を試みた。肉眼で浮遊性有孔虫が含まれると確認された層準について、堆積物の洗い出しを実施したが、年代測定に十分な量の有孔虫が得られなかった。これはコアが採取された水深が5,000m程度と北西太平洋の炭酸カルシウム補償深度とされる4,000～4,500m（井岡ほか，1994）よりも深く炭酸塩が溶解してしまうためと考えられる。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により、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）。9本のコアの60層準について年代測定を行ったところ、表3の結果を得た。測定試料は、タービダイト部分は古い有機物の混入の可能性があることから避け、通常時の堆積物（半遠洋性泥）から選定した。得られた年代値をコア深度に対してプロットすると図5のようになる。この図から、有機物の放射性炭素年代値の多くはコア深度に対して単調に増加すること、直線をコアトップに延長させて交点の年代を求めると2,000年程度となり、明らかに真の年代より古い値を示すことがわかる。一方、挟在する榛名-伊香保テフラの上下層準の年代値のみを拾い出すと、3,110～3,230年となり、ほぼ同じ年代値を示す。榛名-伊香保テフラは6世紀のものとされ（町田・新井，2003）、奥野ほか（2009）はAD555-615としている。今回得られた榛名-伊香保テフラ層準の有機物の放射性炭素年代値とテフラの年代値の差は1,900年程度となり、これはコアトップで推定される年代値に近い。このことは、この海域の完新世の有機物の年代は実際の年代よりも2,000年程度古く出ること示している。

以上の堆積年代に関するデータのうち、もっとも年代として信頼度における完新世テフラの年代をもとに、その上位に挟在するタービダイトの平均堆積間隔を求めると、多くのコアにおいて100-500年の間隔が得られた。ただし、海域北部のPC05とPC09では、1,500-2,000年と長い間隔を持つ。PC05とPC09を除いて、海域の南北で堆積間隔を比較すると、コア中でのタービダイトの挟在頻度を反映して、南で短く（平均161年）、北で長い（平均344年）傾向が認められた。この平均的な堆積間隔の持つ意味は今後さらに検討されるべきであるが、少なくとも堆積間隔に地域的な違いがありそうであることがわかったことは地震発生の地域性あるいは地震動に対する海底斜面の応答様式の地域性を示唆し、今後の研究に重要な知見と考えられる。

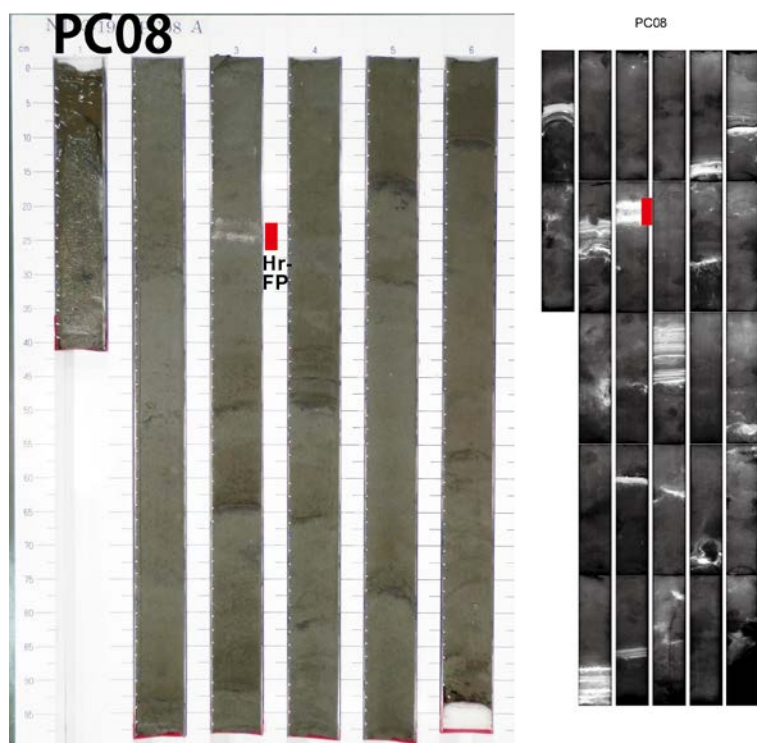


図2 NT13-19 航海で調査海域北部宮古沖から採取された海底堆積物コア PC08 中に挟在するタービダイト (コア写真 (左) と軟X線写真 (右))
 軟エックス写真で白っぽい部分が粗粒な部分 (タービダイト)。
 赤で示した部分が、榛名-伊香保テフラ (Hr-FP) の層準。

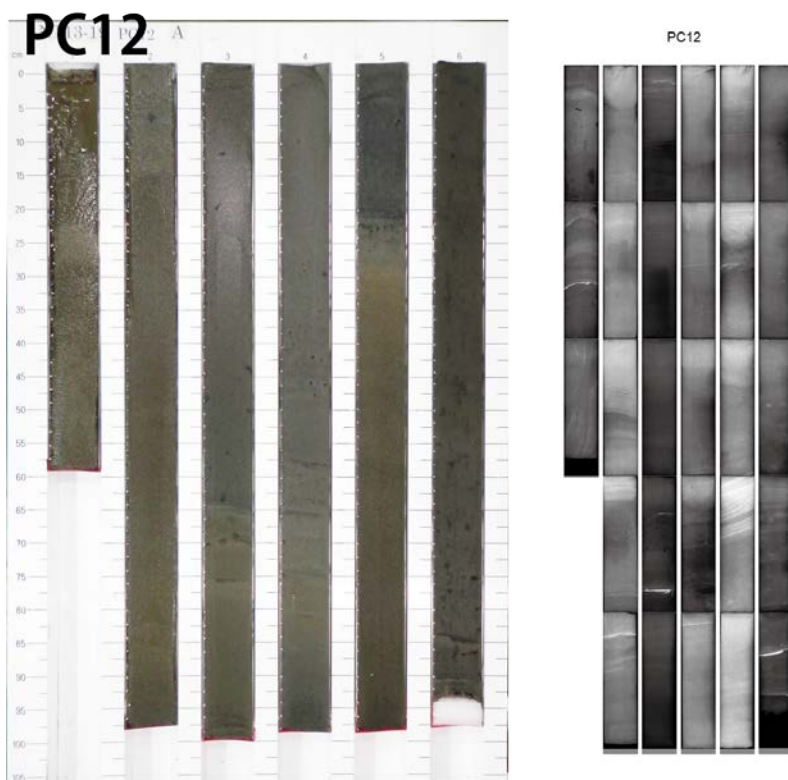


図3 NT13-19 航海で調査海域中部気仙沼沖から採取された海底堆積物コア PC12 中に挟在する細粒タービダイト (コア写真 (左) と軟X線写真 (右))

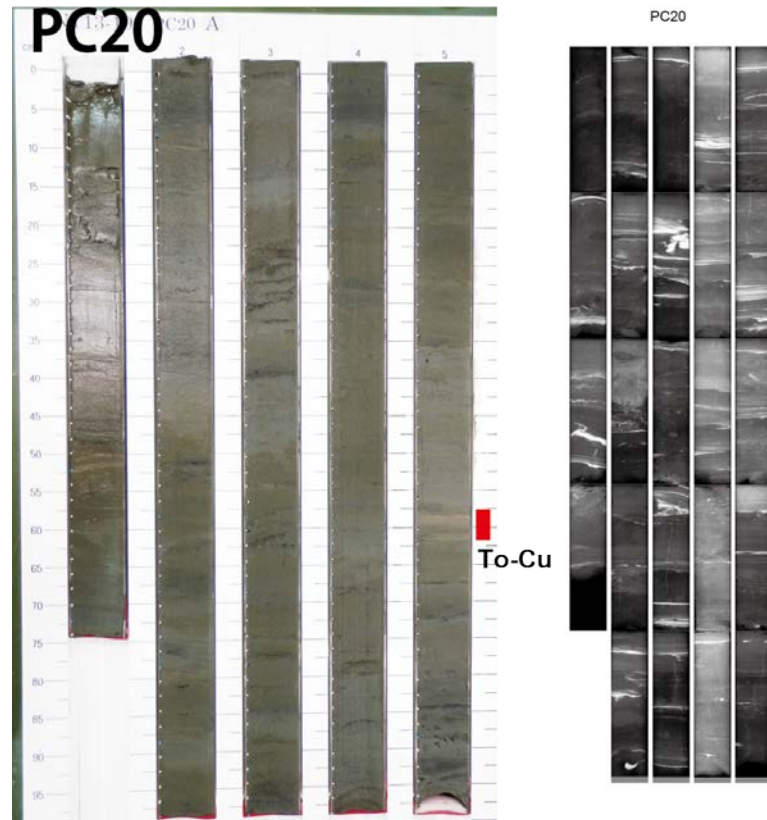


図4 NT13-19 航海で調査海域南部仙台沖から採取された海底堆積物コア PC20 に挟在する細粒タービダイト（コア写真（左）と軟X線写真（右））
PC08 や PC12 に比べて、タービダイトの挟在頻度が高い。赤で示した部分が、十和田-中掇テフラ（To-Cu）の層準。

表2 NT13-19 航海で採取された海底堆積物コア中に挟在する火山灰層の分析結果

| Core | Interval (cm) | Correlation | Core | Interval (cm) | Correlation |
|------|---------------|----------------------|------|-----------------|-----------------------------|
| PL01 | 16 - 17 | B-Tm | PC14 | 450.2 - 451 | Mainly To-Cu |
| PC02 | 441 - 444 | Hr-FP | PC15 | 310 - 311 | Hr-FP |
| PC05 | 121 - 123 | To-Cu | PC16 | 393 - 394.8 | Hr-FP |
| PL05 | 69 - 71 | Hr-FP | PC17 | 103 - 109 | To-a |
| PC06 | 132 - 133 | Hr-FP | PC18 | 227 - 364 - 365 | Ng (+To-Cu) Ng |
| | 500 - 501 | Mixed (mainly To-Cu) | PC19 | 245 - 246 | To-a |
| PC07 | 168 - 170 | Hr-FP | PC20 | 409 - 431 - 433 | Mainly Ng (+To-Cu) To-Cu |
| PC08 | 62 - 65 | Hr-FP | PC21 | 173 - | Nr-Y? |
| PC09 | 40 - 42 | Hr-FP | PC22 | 535 - 537 | Mixed (To-a?) |
| | 167 - 168 | Hr-FP | | | |
| | 182 - | Mixed | | | |

白頭山起源の白頭山-苦小牧テフラ (B-Tm)、榛名山起源の榛名-伊香保テフラ (Hr-FP)、十和田火山起源の十和田-a テフラ (To-a)、十和田-中掇テフラ (To-Cu)、濁川カルデラ起源の濁川テフラ (Ng)、鳴子山起源の鳴子-柳沢テフラ (Nr-Y)

表3 NT13-19 航海の海底堆積物コアの有機物を用いた放射性炭素年代測定結果

| Core | Interval (cm) | conventional 14C age | error | Core | Interval (cm) | conventional 14C age | error |
|-----------|---------------|----------------------|-----------|-----------|---------------|----------------------|-------|
| PC08 | 109 - 112 | 2420 | 30 | PC16 | 20 - 23 | 2150 | 30 |
| | 159 - 162 | 3160 | 30 | | 30 - 33 | 1840 | 30 |
| | 166 - 169 | 3210 | 30 | | 109 - 112 | 1880 | 30 |
| | 209 - 212 | 3510 | 30 | | 207 - 210 | 2310 | 30 |
| | 259 - 262 | 4110 | 30 | | 307 - 310 | 2650 | 30 |
| | 309 - 312 | 4330 | 30 | | 357 - 360 | 3240 | 30 |
| PC09 | 50 - 53 | 3230 | 30 | PC17 | 388 - 391 | 3130 | 40 |
| | 87 - 90 | 3820 | 30 | | 396 - 399 | 3110 | 30 |
| | 187 - 190 | 5870 | 40 | | 407 - 410 | 3500 | 30 |
| | 237 - 250 | 6860 | 30 | | 457 - 460 | 3460 | 30 |
| PC10 | 20 - 23 | 2000 | 30 | 507 - 510 | 3750 | 30 | |
| | 58 - 61 | 2360 | 30 | PC18 | 195 - 198 | 3710 | 30 |
| | 130 - 133 | 3110 | 30 | | 244 - 247 | 3870 | 30 |
| | 140 - 143 | 3230 | 30 | 49 - 52 | 2670 | 30 | |
| | 158 - 161 | 3440 | 30 | 74 - 77 | 3190 | 30 | |
| | 258 - 261 | 4470 | 30 | 228 - 231 | 6430 | 40 | |
| 308 - 311 | 5080 | 30 | 324 - 327 | 9920 | 50 | | |
| PC14 | 408 - 411 | 5890 | 40 | 359 - 362 | 12100 | 50 | |
| | 20 - 23 | 2170 | 30 | 368 - 371 | 12380 | 50 | |
| | 40 - 43 | 2180 | 30 | 380 - 383 | 12900 | 50 | |
| | 64 - 67 | 3270 | 30 | 428 - 431 | 15690 | 60 | |
| | 111 - 114 | 3220 | 30 | 476 - 479 | 17610 | 70 | |
| | 166 - 169 | 3750 | 30 | 524 - 527 | 21410 | 100 | |
| PC15 | 452 - 455 | 7030 | 40 | PC22 | 122 - 125 | 7060 | 40 |
| | 466 - 469 | 7010 | 40 | | 220 - 223 | 13430 | 60 |
| | 518 - 521 | 8180 | 40 | | 320 - 323 | 20790 | 100 |
| | 20 - 23 | 1450 | 30 | | 417 - 420 | 27960 | 160 |
| | 72 - 75 | 1730 | 30 | | 520 - 523 | 34670 | 290 |
| | 221 - 224 | 2610 | 30 | | 527 - 530 | 32110 | 250 |
| 321 - 324 | 3250 | 30 | 538 - 541 | 36180 | 370 | | |

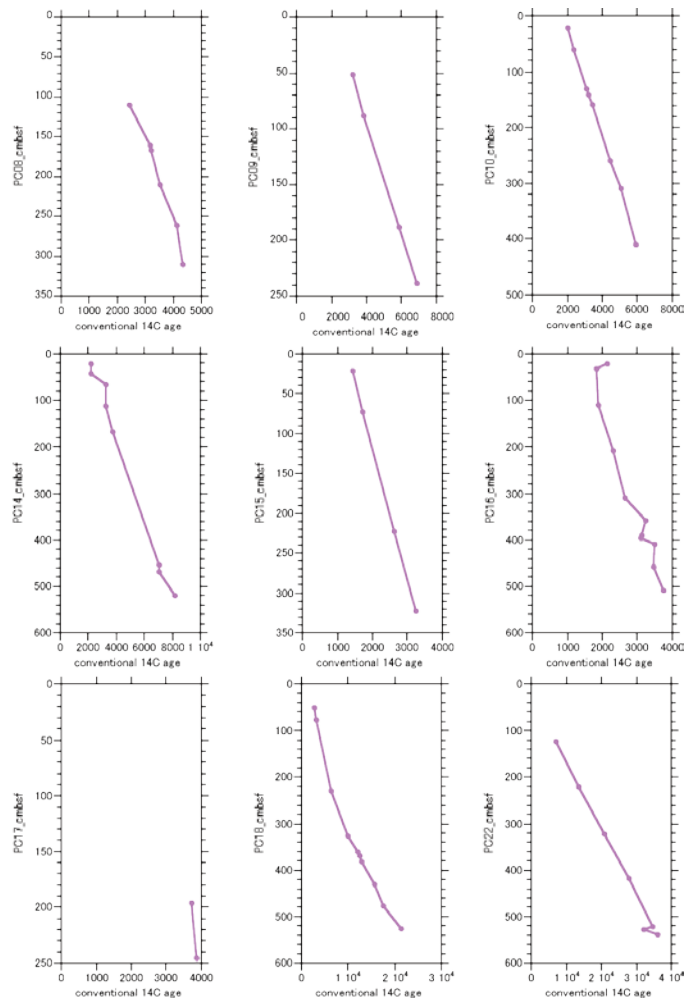


図5 「なつしま」NT13-19 航海の有機物の放射性炭素年代値の深度プロット
 左上より PC08, PC09, PC10, PC14, PC15, PC16, PC17, PC18, PC22。

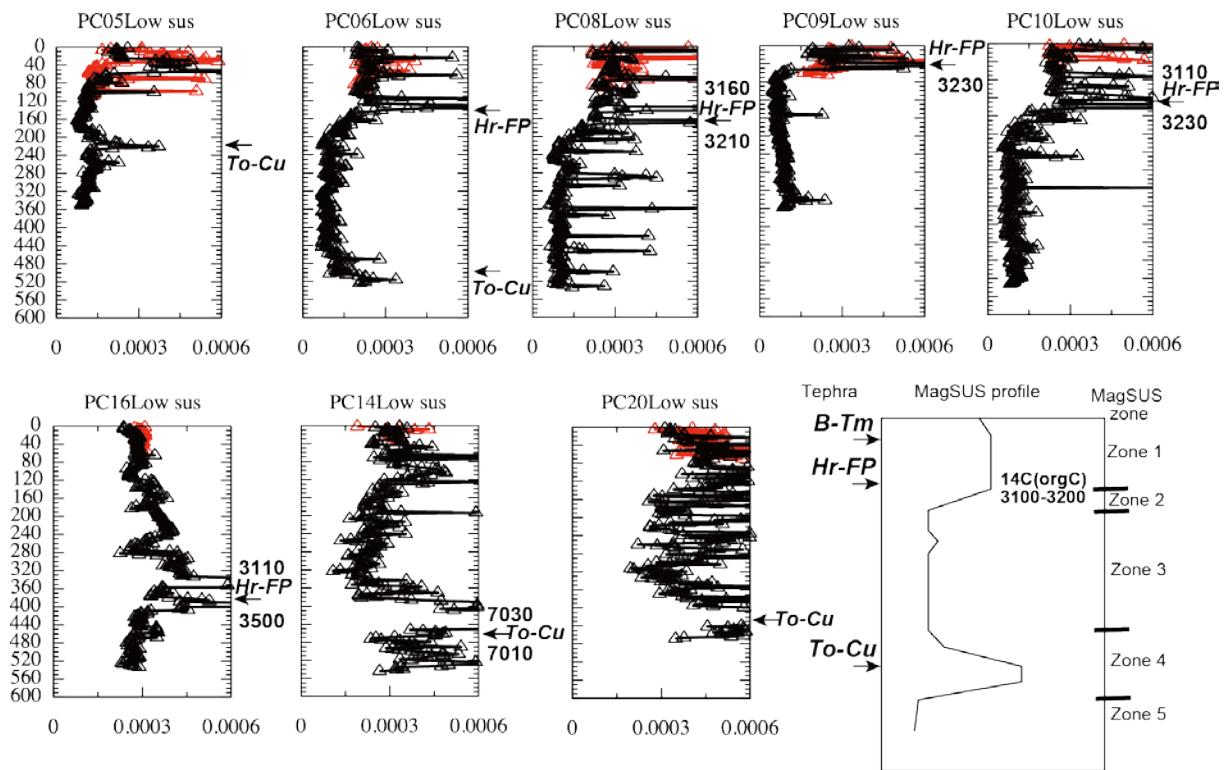


図6 海洋研究開発機構による帯磁率測定結果と火山灰挟在位置の関係

完新世テフラが得られている海底堆積物コアについて、海洋研究開発機構による帯磁率測定結果に火山灰の挟在層準を入れると図6のようになる。帯磁率は深度方向に特徴的な変化を示し、コア最上部でやや高い値を示すものの（ゾーン1）、ある層準から緩やかに減少し（ゾーン2）、低い値を保つ（ゾーン3）。その後やや高い値を示したあと（ゾーン4）、また低い値をとる（ゾーン5）。火山灰の挟在層準はこの帯磁率の変化の似た層準にある。すなわち、榛名-伊香保テフラは複数のコアでゾーン1の最下部に、十和田-中坳テフラはゾーン4の中に位置する。このことは、このような帯磁率変化がこの海域で同時に起こっており、コア間の対比に利用できる可能性を示唆する。この帯磁率変化の原因は明らかではないが、三陸沖堆積物が主に帯磁率の低い珪藻質堆積物からなることから、珪藻遺骸の含有率の変化に起因している可能性がある。この場合、三陸沖での完新世海洋環境変化が関与している可能性が高く、三陸沖で広範囲に使える年代指標となる可能性がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

以上のように、「なつしま」NT13-19 航海で日本海溝陸側斜面の平坦面（mid slope terrace）から採取された海底堆積物コアには、地震性と考えられるタービダイトが多数挟在していることがわかった。また、調査海域の北部と南部でタービダイトの挟在頻度や堆積間隔が異なり、南部ほど頻度が高く、間隔が短い可能性が示唆された。現時点では、これらの堆積物について100年精度での年代決定は困難であるため、挟在するタービダイト同士の対比は困難であるが、より正確な年代決定が可能となれば、同じ地震・津波イベ

ントで発生したタービダイトの分布範囲の推定が可能になると考えられる。これはこれまで困難であった過去の地震破壊領域の広さ、ひいては地震の規模の推定に使えるかもしれない。このためには、炭酸塩の保存の悪い海域の海底堆積物の高精度の堆積年代決定手法の開発が必要である。風成塵起源の細粒石英を用いた光ルミネッセンス年代測定は、このような海域の堆積物の年代決定に有効と考えられる手法の一つである。現在、光ルミネッセンス法による三陸沖堆積物の年代測定を進めているが、しっかりとしたシグナルがとらえられており、この手法が適用できる可能性を示している。火山灰層序や有機物の放射性炭素年代測定、海洋環境変動に伴うプランクトン群集変化や堆積物物性変化などと新しい手法を組み合わせることにより、より精度の高い年代モデルの構築が可能になると期待される。

また、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、海底表面の底生生物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。一方、大型の底生生物は浅海域により多く生息すると考えられるので、水深などの海底環境の違いもイベント層の保存度に関係する可能性がある。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.
- Arai, K., 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**, 1195-1198, 2013.
- 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, 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.
- Ikehara, K., 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 Geol.*, in press.
- 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.
- 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.
- 奥野 充・及川輝樹・下司信夫・八塚慎也・星野安治・中村俊夫, 榛名二ツ岳伊香保テフ
ラの 14C ウィグルマッピング, 日本火山学会講演要旨集, 153, 2009.
- 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.
- 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
本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 95-108, 東大出版, 2002.
- 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.
- Stow, D.A.V. and G. Shanmugam, Sequence of structures in fine-grained turbidites:
Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments, *Sed. Geol.*, **25**, 23-42,
1980.