

三陸沖海底堆積物最表層に認められた地震／津波イベント堆積物

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and tsunami event deposits found in off Sanriku surface sediments

池原 研^{1*}・宇佐見和子¹・ロバート ジェンキンス²・芦寿一郎³・入野智久⁴
Ken Ikehara^{1*}, Kazuko Usami¹, Robert Jenkins², Juichiro Ashi³ and Tomohisa Irino⁴

Abstract: Submarine event deposits formed by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and tsunami were collected from offshore of Sanriku coast with water depths of 122-5500 m. Most of the event deposits were fine-grained, and a few cm in thickness. Normally no bioturbation was observed. In some cores, upward fining graded structure was found from fine-very fine sand to clay or diatomaceous clay above an erosional surface. Different sediment composition of the event deposits suggested the different sediment source. The event deposit collected near the epicenter of the 2011 earthquake had several erosional surfaces suggesting the flowing down of several turbidity currents. Vertically oriented vein-structure like cracks found in hemipelagic muddy sand below the event deposit at off Sendai suggested the strong ground motion of the earthquake. These evidences indicate that submarine slope failures occurred in many locations, and that the 2011 earthquake caused seafloor disturbance at the wide region in the source area of the earthquake.

Keywords: event deposit, earthquake, tsunami, turbidite, marine sediment

1. はじめに

地震時には地震動による間隙水上昇に伴って海底斜面が崩壊することがある。また、地震に伴う津波は海底にも影響を与え、海底堆積物の再懸濁や輸送が発生することもある。遡上型津波堆積物や内湾の津波堆積物に浅海帯～上部漸海帯の底生微化石が含まれることがあること（今野編, 1961；藤原ほか, 2003；内田ほか, 2004, 2007；Nanayama and Shigeno, 2006；佐々木ほか, 2007 など）は津波による沖合海底での堆積物輸送の存在を示唆する。このような地震や津波によって形成されたイベント堆積物は、過去の同様なイベントの存在を推定するのに使われる。深海底であれば、斜面崩壊に伴って形成されるタービダイトが過去の地震の記録として使われる（池原, 1999, 2000, 2001；池原・宇佐見, 2007 など）。これら地震動や津波に対する海底堆積物の応答は、震動や津

波の大きさ、海底地形、底質の粒度や組成、堆積層の厚さ、海底斜面の傾斜などによって変わると考えられるので、各地の地震や津波毎にどのような場所でどのような現象が起き、結果としてどのような堆積物が形成されたかを知ることが重要である。例えば、伊豆東方沖地震では混濁流の発生が深海底総合観測ステーションの観測データから推定されている（岩瀬ほか, 1997, 1998；木下ほか, 2006）が、それに対応したタービダイトは表層堆積物中に認められず、これらが地層記録として残りにくいものであることが報告されている（Ikehara et al., 2012）。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波は東北地方から関東の太平洋岸を中心に大きな被害を与えた。海底に震央をもつM9.1のこの地震によるもとも大きな変動は海底にあったと予想される。例えば、Fujiwara et al. (2011) は震源域近傍の日本海溝で地震前後の海底地形変化があったことを示した。また、

* Correspondence

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

² 横浜国立大学 (Yokohama National University)

³ 東京大学大気海洋研究所 (Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo)

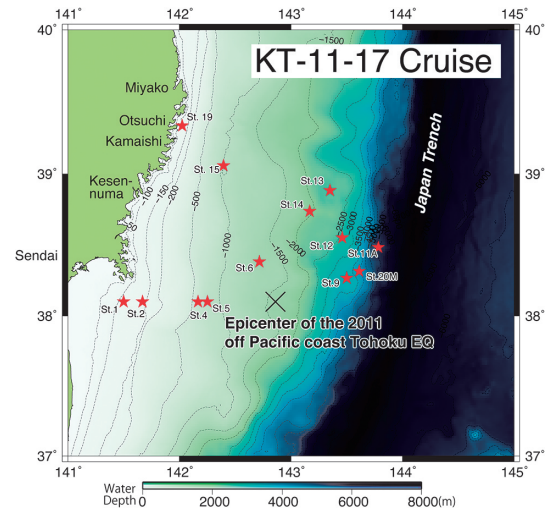
⁴ 北海道大学大学院地球環境科学院 (Graduate School of Environmental Sciences, Hokkaido University)

Kawamura et al. (2012) は地震時の海底斜面崩壊（海底地すべり）が津波を大きくさせた可能性を示した。しかし、日本海溝底を含む三陸沖の海底で実際に何が起こり、それに伴ってどのような堆積物／堆積層が形成されたかはまだ十分にわかっていない。また、地震や津波、そしてそれともなう海底での堆積／侵食現象が底生生物を含む海底環境にどのような影響を与えたかの把握も十分でない。

産業技術総合研究所では 1981 年に釜石沖（有田・木下, 1984）、仙台～日立沖（本座ほか, 1982）で海洋地質図作成のための海洋地質調査を実施した。また、1985 年には国立機関公害防止等試験研究の「開口性沿岸海域開発に伴う底質汚染予測技術に関する研究」の一環で仙台湾の調査も実施した（Saito, 1989a, b）。これらの地震前の海底堆積物データは地震後のそれと比較することで、2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波の海底への影響を検討するのに重要である。このため、これらの資料を活用し、地震・津波により海底で何が起こったかを明らかにする目的で、ジェンキンスを代表とした「東日本大震災による深海底生生物相への影響評価」の研究を東京大学大気海洋研究所が募集した震災対応課題申請に応募した。また、地震後に底層水の懸濁現象が認められることがある（例えば、Ashi et al., 2012）ので、この懸濁水とそこから形成された堆積層の形成過程の解明の目的で「地震動に伴う海底懸濁層の発生と堆積についての研究」を芦を代表として応募した。ここでは、この二つの課題に対応して 2011 年 7-8 月に実施された淡青丸の KT-11-17 航海で三陸沖海域から採取された表層堆積物試料にみられる 2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により形成されたイベント堆積物について報告する。

2. 調査航海と分析方法

淡青丸の KT-11-17 航海は 2011 年 7 月 29 日（台場）～8 月 5 日（八戸）の日程で実施された（主席研究員：浜崎恒二）。航海では、CTD 付採水器による採水、オケアン式グラブ採泥器とマルチプルコアラーによる表層堆積物採取が行われた。産総研での堆積物分析用にはこのうちのマルチプルコアラーにより採取された 13 地点からの試料が提供された。試料採取地点の水深は 122～5600m（第 1 表）であり、その位置は第 1 図に示した。



第 1 図 KT-11-17 航海におけるマルチプルコアラーによる採泥地点。

Fig.1 Locations of sampling sites by a multiple corer during KT-11-17 cruise.

船上で直上水をサイフォンで吸い出し、変形を生じさせない状態で産総研に輸送されたコア試料は、半割された後、写真撮影と肉眼観察を行った。また、軟X線透過画像による堆積構造解析用のスラブ試料や組成分析用のサンプルを分取した。肉眼観察で特徴的な構造が観察された 3 つの試料については、半割された試料について X 線 CT 装置による非破壊三次元構造解析を行った。なお、本試料についてはこのほかに、粒度分析、XRD による鉱物組成分析、放射能測定、剪断強度測定、含水率測定が、一部の試料については底生有孔虫遺骸群集組成分析と共同研究で有機炭素含有量、堆積有機物の安定炭素・窒素同位体比測定、堆積有機物組成の分析が実施済みあるいは実施予定である。

3. 結果と考察

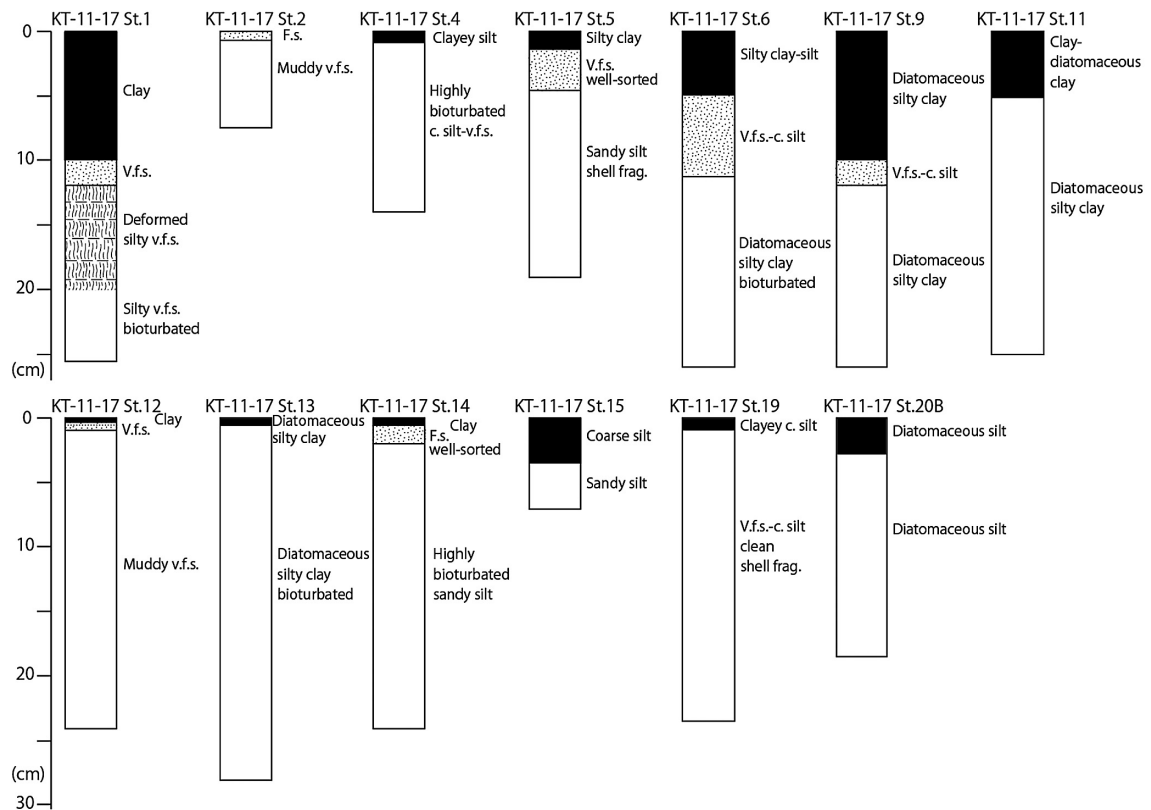
分析を行った 13 試料のすべてにおいて堆積物の最表層に 2011 年東北地方太平洋沖地震によると考えられるイベント堆積物を認めた（第 2 図、第 1 表）。その多くは基底が明瞭な厚さ数 cm 程度の無構造の泥層からなるが、地点 1, 5, 6, 9, 12, 14 では、泥層の基底に明瞭な砂層（細粒砂～極細粒砂）が存在するとともに上方に向かって粘土あるいは珪藻質粘土／軟泥に細粒化するタービダイトの特徴を有する。イベント堆積物の泥のスミアスライド観察では、全体として珪藻質な三陸沖の底質を反映して珪藻に富むが、陸側の地点ではやや碎屑粒子の割合が増える（第 3 図 B）。

これに対して水深 2000m を越えるような中部～下部斜面のものはほぼ珪藻軟泥に分類される (第 3 図 A)。このようなイベント堆積物の泥の組成の違いは堆積物の給源が多様であることを示している。比較的厚いイベント堆積物が確認された地点 6 では、イベント堆積物の下部を構成する砂層部分に複数の侵食面の存在が認められた (第 4 図)。また、仙台沖の地点 1 では、イベント堆積物の泥中に斜交葉理をもつ粗粒層の存在が認められ (第 5 図)、タービダイトが累重した二階建て構造をもつ。これらは複数の混濁流が流下したことを示している。これらのイベント堆積物が 2011 年東北地方太平洋沖地震で形成されたイベント堆積物であることは、1) 海底表面に位置すること、2) 生物擾乱を受けていないこと、3) 少なくとも一部の試料については、地震以前の堆積物の粒度と違いがあること、から推定できるが、現在放射能測定により、それを確認中である。以上のことから、2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により、三陸沖の陸棚外縁 (水深 122m) から下部斜面 (水深 5600m) までの広い範囲でイベント堆積物が形成されたことが明

らかとなった。

一方、仙台沖陸棚上の地点 1 では、イベント堆積物が削り込む半遠洋性堆積物 (泥質砂) に縦方向の筋状構造が認められた (第 5 図)。この縦方向の筋状構造はコア最下部では認められない。X 線 CT 装置による構造解析では、これらの筋は生痕を明瞭に切っており、堆積後の変形構造と考えられる。筋状構造の形態は大きさの違いはあるものの房総半島や三浦半島の三浦層群に見られる脈状構造 (vein structure) に近い。三浦層群で観察される脈状構造は地震動による変形構造と考えられている (Hanamura and Ogawa, 1993) ので、今回確認された筋状構造も、地震動により形成された可能性が高い。

以上の結果から、2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波によって三陸沖の広い範囲ならびに広い水深帯においてイベント堆積物の堆積現象があったことが確認された。また、一部の試料からは複数回の混濁流の発生・流下の証拠が読み取れた。このことは、この地震・津波による海底の擾乱が広い範囲で起きたことを示している。また、地震時の強い震動によ



第 2 図 肉眼観察による柱状図。

黒塗り部分が泥質なイベント堆積層，網かけ部分が砂質なイベント堆積層。
KT-11-17 St.1 ではイベント層の下位に変形した堆積層が認められた。

Fig.2 Columnar sections of the obtained cores.

Black part: muddy event deposit, hatched part: sandy event deposit.

Deformed sediment layer was observed under the event deposits at KT-11-17 St.1.

ると考えられる変形構造を侵食してイベント堆積物が存在することは、地震動から多少の時間をおいて混濁流が流下した場所があることを示している。三浦ほか(2011)や日野ほか(2012)は三陸沖斜面域に展開したたくさんの海底地震計が泥に埋もれたことを示し、新井ほか(2011)はその泥の粒度組成の特徴からこれらがタービダイトであることを示した。また、小栗ほか(2012)は日本海溝底でもこの地震によるイベント堆積物の存在を報告した。今回の結果とこれらの報告を踏まえると、より広い範囲に今回の地震・津波のイベント堆積物が分布していることがわかる。イベント堆積物の分布の広さは今回の地震・津波による海底への影響の範囲の広さを示すが、まだ堆積物情

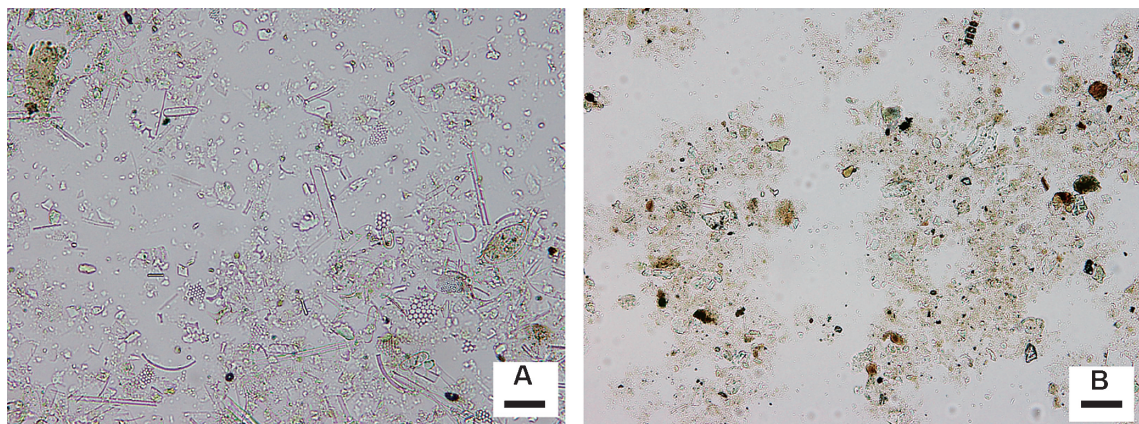
報が十分にそろっているとは言いがたい。また、これらのイベント堆積物が堆積後の底生生物の活動や底層流などによる再移動によりどう変化していくかをモニタリングすることは、海底環境の回復過程を知るとともに、イベント堆積物の保存可能性(preservation potential)を検討する上でも非常に重要である。幸いにも、今回報告したものとほぼ同じ海域での調査航海が予定されている。今後、青森沖から福島沖までのより広い範囲におけるイベント堆積物の有無や特徴の把握を行うとともに、その堆積過程と保存過程を検討することで日本海溝域における巨大地震の発生履歴の検討に貢献していく所存である。

第 1 表 KT-11-17 航海で採取された堆積物試料中のイベント堆積物の特徴。

Table 1 Characteristics of event deposits found in the cores collected during the KT-11-17 cruise.

Core	Water Depth (m)	Thickness of ED (cm)	Grain size of ED	Composition of ED
KT-11-17 St.1	122	12	Clay/very fine sand	
KT-11-17 St.2	150	0.5	Fine sand	
KT-11-17 St.4	688	1	Clayey silt	
KT-11-17 St.5	893	4.5	Silty clay/very fine sand	
KT-11-17 St.6	1446	11.5	Silt/very fine sand-coarse silt	Diatomaceous
KT-11-17 St.9	3255	11	Diatomaceous silty clay/v.f.s-coarse silt	Diatomaceous
KT-11-17 St.11A	5600	5	Diatomaceous silt	Diatomaceous
KT-11-17 St.12	2560	1	Clay/very fine sand	
KT-11-17 St.13	2369	1	Diatomaceous silty clay	Diatomaceous
KT-11-17 St.14	1919	2	Clay/fine sand	
KT-11-17 St.15	1053	3.5	Coarse silt	
KT-11-17 St.19	123	1	Clayey coarse silt	
KT-11-17 St.20B	3969	3	Diatomaceous silt	Diatomaceous

ED: event deposit



第 3 図 イベント堆積物の泥質部のスメアスライド写真。

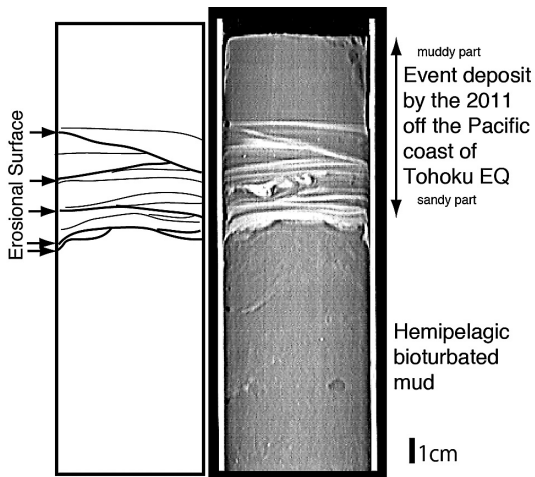
A: 珪藻軟泥 (KT-11-17 St.11A),

B: 粘土 (シルト粒子や珪藻遺骸, 有機物などを含む) (KT-11-17 St.1), スケールバーは 50 μm.

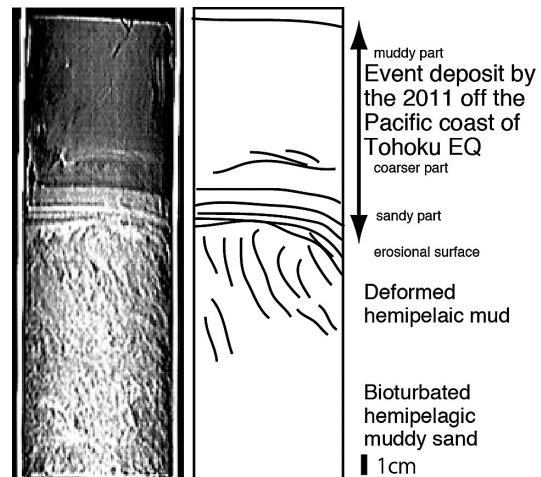
Fig.3 Photographs of smear slides.

A: diatom ooze (KT-11-17 ST.11A),

B: clay (containing silt-sized particles, diatom tests and organic matters) (KT-11-17 St.1), scale bar is 50 μm.



第4図 地点6のコアのX線CT透過画像。
イベント堆積物下部の砂層部分に複数の侵食面が存在する。
Fig.4 X-ray CT scanogram image of core at KT-11-17 St.6.
Several erosional surfaces were observed in the sandy part of the event deposit.



第5図 地点1のコアのX線CT透過画像。
イベント堆積物の泥部分に薄い粗粒層が存在する。また、イベント堆積物基底の侵食面の下位の堆積物中に縦方向の筋状構造が認められる。
Fig.5 X-ray CT scanogram image of core at KT-11-17 St.1.
Coarse layer was found in the muddy part of the event deposit. Vertically oriented structures were occurred in the sediments below the event deposit.

謝辞

本研究に使用した堆積物試料の採取にあたっては、淡青丸 KT-11-17 航海の主席研究員の浜崎恒二准教授（東京大学大気海洋研究所）をはじめ、乗船研究者である北村晃寿准教授（静岡大学）、北橋 倫氏、北沢公太氏（ともに東京大学大気海洋研究所）、船長・乗組員の方々に大変お世話になった。厚く感謝する。また、震災対応緊急航海の課題である「東日本大震災による深海底生物相への影響評価」は東京大学大気海洋研究所が2006年度から開始した日本財団助成事業「新世紀を拓く深海科学リーダーシッププログラム」の一環として行われたものである。

文献

新井和乃・成瀬 元・泉 典洋・横川美和・三浦 亮・川村喜一郎・辻 健・谷川 亘・金松敏也・藤倉克則・村山雅史・KY11-E04 leg1 & YK11-E06 leg2 乗船研究者（2011）三陸沖海底に広がる東北地方太平洋沖地震に伴う泥質堆積物：巨大津波は混濁流を引き起こすのか？日本堆積学会2011年長崎大会講演要旨，102-103。
有田正史・木下泰正（1984）釜石沖表層堆積図。海洋地質図，no.25，地質調査所。
Ashi, J., Ikehara, K., Kinoshita, M. and KY04-11

and KH-10-3 shipboard scientists (2012) Settling of earthquake-induced turbidity on the accretionary prism slope of the central Nankai subduction zone. In: Yamada, Y. et al. (eds.) Submarine mass movements and their consequences, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 31, Springer, Dordrecht, 561-571.

藤原 治・鎌滝孝信・布施圭介（2003）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, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N. and Kaneda, Y. (2011) The 2011 Tohoku-oki Earthquake: Displacement reaching the trench axis. *Science*, 334, 1240.

Hanamura, Y. and Ogawa, Y. (1993) Layer-parallel faults, duplexes, imbricate thrust and vein structures of the Miura Group: Key to understanding the Izu fore-arc sediment accretion to the Honshu forearc. *Island Arc*, 2, 126-141.

日野亮太・鈴木秀市・久保田達矢・伊藤喜宏・藤本博己（2012）2011年東北地方太平洋沖地震の震央付近における海底映像。日本地球惑星科学連合2012年大会講演要旨，SSS39-P05。

- 本座栄一・井上英二・有田正史・石原丈実 (1982) 日本周辺海域の海洋地質調査活動—昭和 56 年度の白嶺丸による調査航海—。地質ニュース, no.331, 13-35.
- 池原 研 (1999) 深海底タービダイトの発生周期とその古地震学的意義：熊野トラフのピストンコアの解析例。堆積学研究, 49, 13-21.
- 池原 研 (2000) 地震性堆積物を用いた地震発生年代と発生間隔の解析。地質調査所月報, 51, 89-102.
- 池原 研 (2001) 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。地学雑誌, 110, 471-478.
- 池原 研・宇佐見和子 (2007) 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.
- Ikehara, K., Ashi, J., Machiyama, H. and Shirai, M. (2012) Submarine slope response to earthquake shaking within western Sagami bay, central Japan. In: Yamada, Y. et al. (eds.) Submarine mass movements and their consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research, 31, Springer, Dordrecht, 539-547.
- 岩瀬良一・門馬大和・川口勝義・藤原法之・鈴木伸一郎・満澤巨彦 (1997) 相模湾初島沖「深海底総合観測ステーション」により観測された海底変動現象—1997 年 3 月伊豆半島東方沖群発地震に伴う海底混濁流—。JAMSTEC 深海研究, 13, 433-442.
- 岩瀬良一・満澤巨彦・門馬大和 (1998) 1998 年 4 月伊豆半島東方沖群発地震に伴う泥流の発生—相模湾初島沖「深海底総合観測ステーション」による観測—。JAMSTEC 深海研究, 14, 301-317.
- Kawamura, K., Sasaki, T., Kanamatsu, T., Sakaguchi, A. and Ogawa, Y. (2012) Large submarine landslides in the Japan Trench: A new scenario for additional tsunami generation. Geophysical Research Letters, 39, L05308, doi:10.1029/2011GL050661.
- 木下正高・笠谷貴史・後藤忠徳・浅川賢一・岩瀬良一・満澤巨彦 (2006) 伊豆東方沖地震に誘発された相模湾初島沖の海底地すべり。日本地すべり学会誌, 43, 41-43.
- 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。東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, 52, 40p.
- 三浦 亮・寺田育正・菅野真人・前川拓也・森 誠一・前田洋作・小松和香・川村喜一郎・金松敏也・坂口有人・海宝由佳 (2011) 宮城沖日本海溝で回収した海底地震計から採取した堆積物—東北地方太平洋沖地震による海底地すべりの影響か？日本地質学会第 118 年学術大会・日本鉱物科学会 2011 年年会合同学術大会, R12-P-4.
- Nanayama, F. and Shigeno, K. (2006) Inflow and outflow facies from the 1993 tsunami in southwest Hokkaido. Sedimentary Geology, 187, 139-158.
- 小栗一将・豊福高志・坂口有人・川村喜一郎・笠谷貴史 (2012) 2011 年東北沖地震後に「ランダー」による津波波源域の日本海溝底の探査。ブルーアース 2012 要旨集, 19-20.
- Saito, Y. (1989a) Late Pleistocene coastal sediments, drainage patterns and sand ridge systems on the shelf off Sendai, northeast Japan. Marine Geology, 89, 229-244.
- Saito, Y. (1989b) Modern storm deposits in the inner shelf and their recurrence intervals, Sendai Bay, northeast Japan. In: Taira, A. and Masuda, F. (eds.) Sedimentary facies in the active plate margin, Terra Scientific Publishing, Tokyo, 331-344.
- 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寺内湾堆積物中の貝形虫化石群集。第四紀研究, 46, 517-532.
- 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—。地質学論集, no.58, 87-98.
- 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.