

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21107003

研究課題名(和文)高精度変動地形・地質調査による巨大地震断層の活動履歴の解明

研究課題名(英文) High precision topographical/geological surveys for elucidating the activity history of seismogenic faults

研究代表者

芦 寿一郎 (ASHI, JUICHIRO)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：40251409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 108,900,000円、(間接経費) 32,670,000円

研究成果の概要(和文)：南海トラフ・日本海溝における高精度探査や地震前後の海底調査により、地震動による海底表層の変形、断層の詳細構造、地震/津波による堆積物の移動・集積を明らかにし、堆積物から地震発生履歴や断層活動史を復元する有効な手法を提案できた。また、温度構造から断層面や海洋地殻内の流体の移動・湧出が、流体化学組成から起源・移動経路が明らかとなり、海溝型巨大地震の準備・発生過程の理解のための基礎的情報を提供できた。

研究成果の概要(英文)：We revealed seafloor disturbances, detailed fault structures, and sediment transport-and-accumulation by earthquake shaking and/or tsunami by high precision surveys and seafloor observations before and after earthquakes. This provided the effectual methods to understand the activity histories of earthquakes or faultings based on sediment samples. Moreover, we estimated fluid migrations and expulsions along faults or in oceanic crust from thermal structure and origin-and-conduit from fluid chemistry, consequently delivering fundamental information for understanding of pre- and co-seismic processes of great subduction zone earthquakes.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学，地質学

キーワード：活断層 変動地形 地すべり 地震 海底調査

1. 研究開始当初の背景

プレート沈み込み帯の陸側斜面の複雑な地形は、繰り返し活動する断層の変位の累積、不安定な斜面の崩壊、さらに地形に応じた堆積作用が相互に影響を及ぼして形成される。IODP 南海トラフ地震発生帯掘削では、地すべりと断層が複数回交互に切り合う構造や断層上盤で強い振動による変形の繰り返す構造が発見されている。したがって、地形、海底下浅部構造、表層堆積物の研究により地震動や断層活動の過去の情報を得ることが可能である。また、断層は湧出する流体を通して地下の応力状態や物質循環の情報を海底にもたすため、断層は地下深部へ通じる観測窓として利用できる。さらに、これらの沈み込み帯陸側斜面の発達や地震発生過程には、地下の温度・間隙水圧が深く関与しているとみられるが、その理解は未だ十分でない。

2. 研究の目的

最近の断層活動・地殻変動・地すべり・流体湧出を記録している「海底下浅部」の調査を通して以下の項目を明らかにする。

- (1) 地震動による海底の変形、堆積物の移動・集積過程を理解する。
 - (2) 海底下浅部構造を高解像で把握し堆積物試料から断層の活動履歴を明らかにする。
 - (3) 断層周辺の間隙水圧・応力と海底地形発達の関係を考察する。
 - (4) 海底表層部の温度測定により沈み込み帯の熱構造を明らかにするとともに、流体湧出変動を捉える。
 - (5) 堆積物の間隙流体および海水の化学組成・同位体組成分析から流体の起源・湧出経路を解明する。
 - (6) 前弧域から背弧域の構造発達・地殻変動を理解し、プレート沈み込み帯の巨大地震発生との関係を考察する。
- これらの表層部の調査研究により、掘削で得られた深度方向の情報を面的に広げ、さらに他計画研究の成果との統合により海溝型巨大地震の準備・発生過程の解明を目指す。

3. 研究の方法

(1) 海底下浅部音響構造探査

一般に急傾斜の海底以外は堆積作用が卓越していることから、堆積層のごく表層の変形は最近の活動を示すと言える。このような表層の微細変形を捉えるには高周波音源を用いる必要があるが、船舶からの発震では音波の減衰により深海底下の構造を捉えることは困難である。本研究では海中ロボットに音源・受信器を搭載しこれまでにない精度の音響断面を得る。

(2) ピンポイントでの試料採取

海中ロボットに採泥器を搭載し、断層近傍などの複雑な地形の箇所でも、かつ深海底においても高い位置精度で試料採取を行なう。

(3) 長期温度計測

海底での正確な温度構造の取得、流体湧出

による温度構造の変化を明らかにするため、長期間にわたって温度測定可能な装置を作成し使用する。

(4) 地震前後の海底観察、試料採取により、地震に伴う諸現象を捉える。

(5) 既往の地形・地質・測地・地震探査情報をもとに、応力・歪み・間隙水圧などの値を見積もる。

4. 研究成果

(1) 古地震の痕跡マッドブレッチャ

IODP Exp 316 の掘削点 C0004 において分岐断層上盤から採取された表層 80cm のコア試料には、肉眼では判別が困難な、礫を含む複数の層が X 線 CT によって確認された。礫は物質的には周囲と違いはなく、密度が高いのが特徴で、マッドブレッチャと記載された。年代測定から最も新しい年代のマッドブレッチャは 1944 年の東南海地震時のものであることが推定された。掘削で明らかになったマッドブレッチャの分布を知るため周辺の表層堆積物を採取して調べたところ、断層の上盤側のある限られた範囲にのみ発達することが分かった(図1)。マッドブレッチャは、断層運動に伴う強震動で形成されたと推測され、その年代と堆積物強度から古地震の規模と再来周期の復元が期待できる。

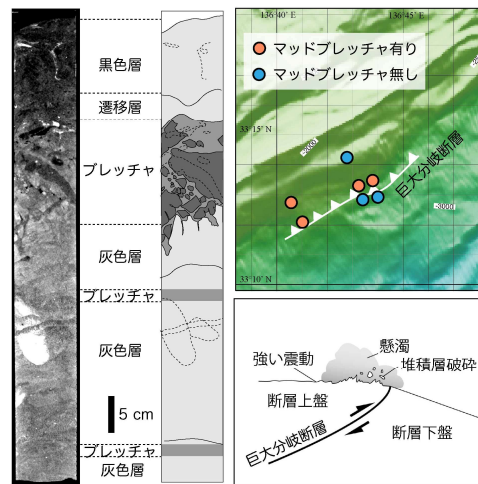


図1 マッドブレッチャを含むコア(左)と分布(右上)および形成モデル(右下)

(2) 地震性タービダイトとその保存

仙台沖の表層堆積層では、地震動によるとみられる変形が認められ、その上位に 2011 年東北地方太平洋沖地震時のタービダイトが堆積している(図2)。タービダイト砂層は 2 層認められ複数回の土砂輸送の存在を示す。2011 年の地震/津波に伴って三陸沖の広い範囲でイベント堆積物が形成されている。イベント堆積層を利用した地震/津波履歴の解析では、イベント層がどのように地層中に保存されるかを知っておく必要がある。三陸沖の水深約 120 m の外側陸棚では、2012 年の試料に底生生物の活動による擾乱が認められる一方、水深約 5500 m の下部斜面で

は2012年の試料も2011年のものと同じ構造をもち、生物擾乱は認められない。以上の観察結果より、地震動による変形構造とイベント堆積層の関係の把握が地震性イベントの認定基準として重要なこと、イベント堆積物の保存には堆積速度と物理的及び生物的擾乱の強度が小さいことが重要であること、イベント堆積物の広域性が地震の規模の推定に使える可能性があることが分かった。

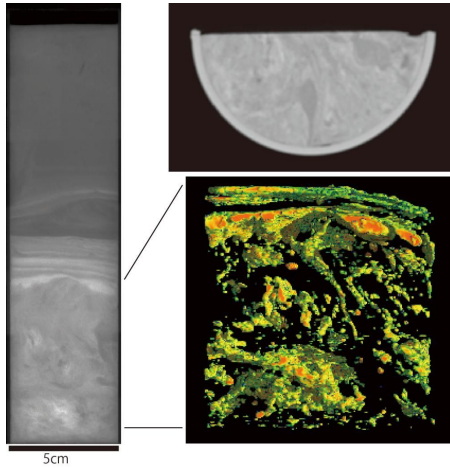


図2 仙台沖の表層堆積物試料の軟X線写真(左), X選CT画像の断面画像(右上)と三次元画像(右下)

(3) 地震動による高懸濁物の移動・集積

2004年紀伊半島南東沖地震の直後に、斜面堆積盆において高懸濁層が海底付近で確認された。2010年、2011年に海底下部音響構造探査を行ない、海底より十数メートルまでの深度に、周囲の他の堆積盆では見られない音響的透明層が3層認められた(図3)。高懸濁層の存在および地形からみた供給源の検討より、これらの透明層は地震動で斜面表層堆積物が流下して堆積盆に集中的に溜まったものであると解釈できる。(2)で述べた日本海溝の表層堆積物の調査結果を合わせると、地震時の海底斜面崩壊起源の細粒イベント堆積物は斜面あるいは海溝域の閉じた小海盆に繰り返し堆積するので、イベント堆積物を用いた過去の地震発生履歴の検討においては、これらの小海盆が重要であることが分かった。

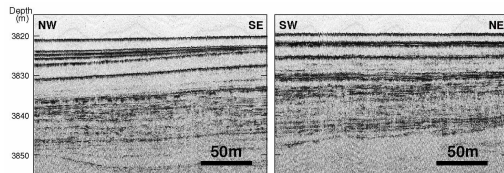


図3 堆積盆にみられる音響的透明層

(4) 堆積物の移動とその起源

南海トラフの前弧海盆において、半遠洋性泥とタービダイト泥を区別して有機物分析を行い、河川・デルタ・内湾、前弧海盆陸側の斜面の表層堆積物、さらに付加体斜面の斜面崩壊堆積物の分析結果と比較することに

より、タービダイトの起源を検討した。その結果、低海水準期には沿岸に堆積した陸源碎屑物が深海底まで再移動して海底扇状地を形成し、高海水準期には海底は陸源有機物に乏しい半遠洋性泥で覆われ、地震などをきっかけに再移動しタービダイトとして堆積したことが示された。海水準に関わらずタービダイト泥と半遠洋性泥の特徴が類似することは、両者の運搬プロセスは異なるが堆積物の起源は同じであることを示す。

(5) 日本海溝の巨大海底地すべり

日本海溝の陸側斜面の海底調査では、2011年東北地方太平洋沖地震によって形成された亀裂が深海カメラによって多数見つかった。海底地すべり域でも亀裂が見つかり、巨大海底地すべりが発生した可能性が考えられる。このような巨大海底地すべりは、幅数十km規模であり明治三陸地震や今回の地震でも運動している可能性がある。また、海溝底でも海底の異常隆起が見つかり、海底地すべりによるものと考えられる。規模は数キロメートルにわたり隆起量は60mを超える(図4)。津波を発生させた要因の一つと解釈できる。

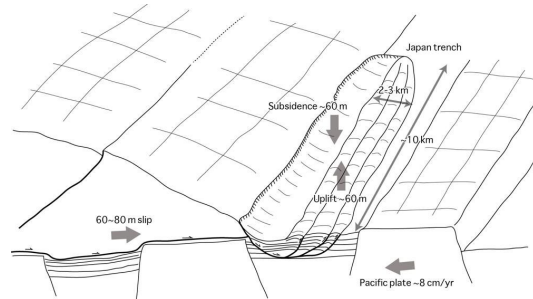


図4 日本海溝での海底地すべりの概念図

(6) 断層の高解像度浅部構造探査

深海曳航式の海底下浅部音響構造探査を熊野沖分岐断層の海底付近において行い、複数の地点で断層が表層堆積層を切る構造を明らかにした。地層のずれは深部ほど大きく変位の累積が認められた(図5)。同様の手法を用いた新宮沖の前弧海盆北縁の調査では、低解像度の探査で断層とみられた構造が活動的な撓曲であり、両翼の地層の年代から堆積速度とほぼ同程度の上下地殻変動によるものであることが分かった。

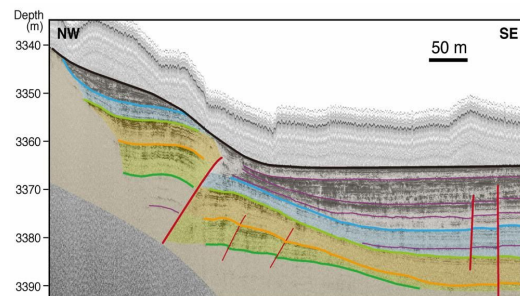


図5 海底付近にみられる巨大分岐断層による地層の変位

(7) 分岐断層周辺の間隙水圧と最大主応力のマッピング

南海トラフに発達する分岐断層と、その海側のデコルマの間隙水圧分布や最大主応力方向を調べるため、地震探査データを用いた解析を行った。波形トモグラフィという解析手法を適用することで、深部分岐断層（深度約 12km まで）の弾性波速度を高解像度で推定することに成功した（図 6）。さらに弾性波速度や掘削データなどの情報を使って、分岐断層やデコルマの間隙水圧を初めて連続的にマッピングすることに成功した（図 6 下）。これにより、巨大分岐断層の下盤の間隙水圧は高く地震を引き起こしやすい状態であることが示された。さらに、その高い間隙水圧で特徴づけられる分岐断層は、海側に発達しているデコルマと連続していることが分かった。つまり巨大分岐断層はトラフ軸へ続くプレート境界断層であり、そのプレート境界断層から、いくつかの断層が分岐しているという新しい断層像が明らかとなった。また地震波異方性解析の結果から主応力方向や差応力の大きさが、外縁隆起帯周辺に位置する分岐断層出口で変化することが分かった。

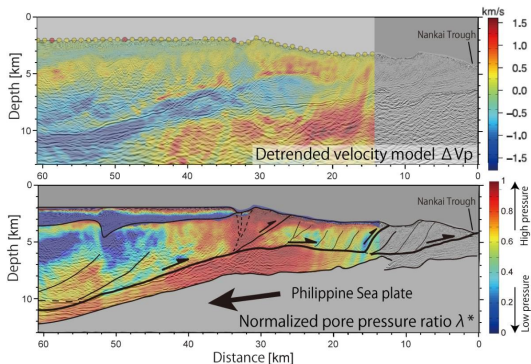


図 6 上：波形トモグラフィによって推定した弾性波速度。下：間隙水圧分布と新たに解釈した断層分布。

(8) 南海トラフにおける熱輸送過程

紀伊半島東南方（熊野沖）の熱流量データをまとめ、南海トラフから付加体にかけての熱流量分布を明らかにした。モデル計算との比較によりプレート境界における摩擦発熱量を推定した。また、熊野沖付加体上で分岐断層が海底面に達する付近において、断層崖を横断する測線上で熱流量の高密度測定を行い、崖の下部で周囲より高い熱流量値を得た。この高熱流量は断層に沿った流体上昇によるものと考えられる。また、冷湧水活動が存在する地帯において堆積物中の温度分布の長期計測を行い、得られたデータを解析することにより、堆積物中を流体が上昇する速度を推定した（図 7）。さらに、南海トラフ底（海溝軸近傍）における熱流量測定の結果、沈み込むプレートの構造に対応して、熱流量分布が東西方向に変化することが判明した。海洋地殻構造の違いが地殻内の流体流動に

影響し、温度構造の違いを生じると考えることができる。

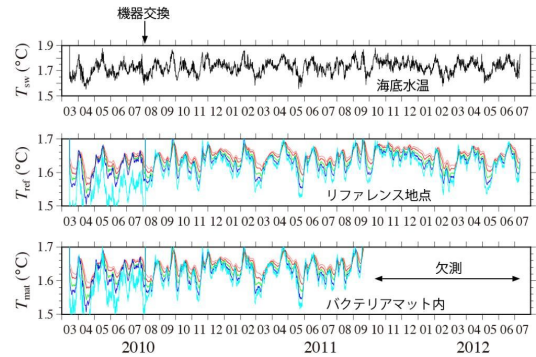


図 7 冷湧水域の温度長期記録。通常の海底（リファレンス地点）よりバクテリアマットで上向きの流れが認められた。

(9) 日本海溝における熱輸送過程

日本海溝海側で熱流量測定を実施し、海底年齢に比べて高い熱流量が海溝北半部に広く分布し、海溝軸から 150 km 付近に及ぶことを明らかにした。この熱流量異常について、海洋地殻内の流体流動と熱輸送のモデル計算を行った結果、沈み込みに伴う変形で地殻が破碎され、透水率の高い層が海溝に向かって厚さを増すことにより、高熱流量が生じることが示された。

(10) 泥火山からの流体の湧出と起源

熊野沖の泥火山付近において、2004 年紀伊半島南東沖地震の直後に採水を行なったところ、泥火山の頂部より約 300 m 上にメタンの高濃度の箇所が認められた（図 8）。地震にともないメタン湧出が活発化し、観測はそのブルームを捉えたと解釈された。

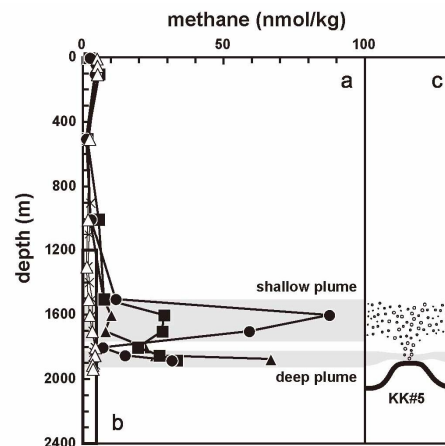


図 8 泥火山で捉えられたメタンブルーム

別の泥火山の間隙流体の化学組成の分析では、イライト-スメクタイト変質反応由来と考えられる高濃度の B が検出された。また、高濃度の Li も検出された。間隙水の酸素同位体比からも、粘土鉱物の脱水反応による正の異常が示された。粘土鉱物の脱水反応や堆積物からの Li の放出が起きる反応温度は、

150~160 °C 程度と考えられ、B/Li 比とも調和的である。地温勾配を考慮すると海底下 3.5 km 以深を起源とする流体が供給されていると考えられる。

(11) 東北日本の短縮変形と巨大地震
東北日本弧の背弧域の地殻短縮変形は、日本海拡大時に形成された非対称リフトに支配されていることが反射法地震探査記録により明らかになった。この地域の鮮新世以降の水平短縮速度は背弧域で 2~4 mm/yr、前弧域で約 1 mm/yr、弧全体で 3~5 mm/yr と見積もられる。この結果は、1) 非弾性歪みの蓄積速度が、測地的に観測される歪み速度に比べておよそ一桁小さく、2) したがって過去 100 年間以上にわたって蓄積された歪みの大部分が弾性歪みであること、および 3) その弾性歪みはプレート境界の大きなすべりで解消される、という予想を裏付けた。超巨大地震を伴う島弧の弾性歪み蓄積 / 解放過程について、世界の他の沈み込み帯と比較したところ、東北日本では幅広い固着領域の浅部のみが地震時にすべり、割れ残った深部固着域で余効すべりが起こるらしい(図9)。日本海溝に沈み込むプレートの年齢は極めて古く低温であり、熱的な原因により深い固着域が存在すると考えられる。このような深部固着は他の超巨大地震発生帯には存在しない可能性が高い。

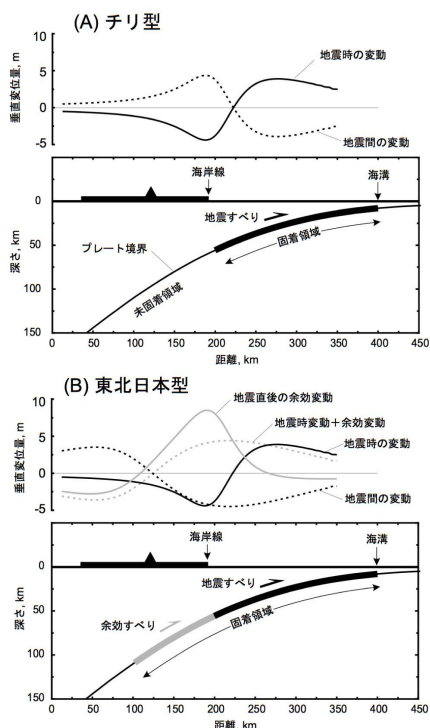


図9 超巨大地震が発生する2つのタイプの沈み込み帯。(A) チリ型。1960年チリ地震、1964年アラスカ地震、1700年カスカディア地震などがこのタイプに含まれる。(B) 東北日本型。それぞれ、下はプレート境界の形状、上は、地震時(実線)と地震間(破線)における隆起・沈降パターンを示す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計56件)

Ashi J, Sawada R, Omura A, Ikehara K (2014) Accumulation of an earthquake-induced extremely turbid layer in a terminal basin of the Nankai accretionary prism. *Earth Planets Space* 掲載決定査読有
Kawada Y, Yamano M, Seama N (2014) Hydrothermal heat mining in an incoming oceanic plate due to aquifer thickening: Explaining the high heat flow anomaly observed around the Japan Trench. *Geochem Geophys Geosyst* **15**, 1580-1599, doi:10.1002/2014GC005285 査読有

Ikehara K, Irino T, Usami K, Jenkins R, Omura A (2014) 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. *Mar Geol*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.001> 査読有

Kawamura K, Laberg JS, Kanamatsu T ほか2名 (2014) Potential tsunamigenic submarine landslides in active margins. *Mar Geol*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.007> 査読有

Goldfinger C, Ikeda Y ほか2名 (2013) Superquakes and supercycles. *Seis Res Lett* **84**, 24-32, doi:10.1785/0220110135 査読有

Tsuji T, Kodaria S, Ashi J, Park JO (2013) Widely distributed thrust and strike-slip faults within subducting oceanic crust in the Nankai Trough off the Kii Peninsula, Japan. *Tectonophysics* **600**, 52-62, doi:10.1016/j.tecto.2013.03.0142 査読有

Tsuji T, Kawamura K ほか6名 (2013) Extension of continental crust by elastic deformation during the 2011 Tohoku-oki earthquake: The role of extensional faulting in the generation of a great tsunami. *Earth Planet Sci Lett* **364**, 44-58, doi:10.1016/j.epsl.2012.12.038 査読有

池田安隆, 岡田真介, 田力正好 (2012) 東北日本島弧-海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪解放イベント, *地質学雑誌* **118**, 294-312 査読有

Ashi J, Ikehara K ほか3名 (2012) Settling of Earthquake-Induced Turbidity on the Accretionary Prism Slope of the Central Nankai Subduction Zone, In: *Submarine Mass Movements and Their Consequences* **31**, 561-571, Springer 査読有

Ikehara K, Ashi J ほか2名 (2012) Submarine slope response to earthquake shaking within western Sagami Bay, Central Japan, In: *Submarine Mass Movements and Their Consequences* **31**, 539-547 Springer 査読有

Kawamura K, Sasaki T, Kanamatsu T, Sakaguchi A, Ogawa Y (2012) Large submarine landslides in the Japan Trench: A new scenario for additional tsunami generation, *Geophy Res Letts* **39**, L05308, 5PP, doi:10.1029/2011GL050661 査読有

Tsunogai U, Maegawa K, Sato S, Komatsu DD, Nakagawa F, Toki T, Ashi J (2012) Coseismic massive methane release from a submarine mud volcano. *Earth Planet Sci Letts* 341-344, 79-85. 査読有

Toki T, Uehara Y, Kinjo K, Ijiri A, Tsunogai U, Tomaru H, Ashi J (2012) Methane production and accumulation in the Nankai accretionary prism: Results from IODP Expeditions 315 and 316. *Geochem Jour* 46, 89-106. 査読有

Hamamoto H, Yamano M ほか4名 (2011) Heat flow distribution and thermal structure of the Nankai subduction zone off the Kii Peninsula, *Geochem Geophys Geosyst* **12**, Q0AD20, doi:10.1029/2011GC003623 査読有

Sakaguchi A, Chester F ほか10名(2011) Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface faults: Vitritinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTroSEIZE cores, *Geology* **39**, 395-399, doi:10.1130/G31642 査読有

Sakaguchi A, Kimura G ほか4名 (2011) Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, *Geology* **39**, 919-922, doi:10.1130/G32043.1 査読有

〔学会発表〕(計126件)

辻 健, tress state in plate subduction zone and its time variation, *Geofluid-3*, 2014年3月1日, 東京工業大学(東京)

池田 安隆, 地質学的時間スケールでみた東北日本弧における地殻歪の蓄積-開放過程と沈み込み帯巨大地震, 日本地質学会, 2013年9月16日, 東北大学(仙台)

山野 誠, High heat flow anomaly seaward of the Japan Trench associated with deformation of the subducting Pacific plate, 日本地球惑星科学連合大会, 2013年5月21日, 幕張メッセ(千葉)

池原 研, Characteristics of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake/ tsunami event deposits: From Sendai shelf to Japan Trench, *Western Pacific Sedimentology Meeting*, 2013年5月13日, 龍潭(台湾)

川村喜一郎, 海底地すべり災害の国際研究の状況と問題点, 日本学術会議主催学術フォーラム, 2013年2月1日, 学術会議講堂(東京)

池田 安隆, 超巨大地震のテクトニクス, 日本学術会議主催学術フォーラム, 2013年2月1日, 学術会議講堂(東京)

坂口 有人, 掘ったからわかった! -南海トラフ地震発生帯掘削計画 ここまでのあらすじ, 地球惑星科学連合大会, 2012年5月24日, 幕張メッセ(千葉)

芦 寿一郎, Settling of earthquake-induced turbidity on the accretionary prism slope of the central Nankai subduction zone, *ISSMTC*, 2011年10月25日, 京都大学(京都)

〔図書〕(計2件)

芦 寿一郎・川村喜一郎, 東京大学出版会, 付加体と巨大地震発生帯, 2009年, 65-122

〔その他〕

ホームページ等 <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantro/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芦 寿一郎 (ASHI Juichiro)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号: 40251409

(2) 研究分担者

池原 研 (IKEHARA Ken)
独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・副部門長
研究者番号: 40356423

川村 喜一郎 (KAWAMURA Kiichiro)
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 50321675

山野 誠 (YAMANO Makoto)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 60191368

辻 健 (TSUJI Takeshi)
九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・准教授
研究者番号: 60455491

池田 安隆 (IKEDA Yasutaka)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号: 70134442

坂口 有人 (SAKAGUCHI Arito)
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 80304666

(3) 連携研究者

角皆 潤 (TSUNOGAI Urumu)
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号: 50313367

土岐 知弘 (TOKI Tomohiro)
琉球大学・理学部・助教
研究者番号: 50396925