

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540505

研究課題名(和文) 海底地動水圧同時観測による超低周波地震に伴う海底地殻変動の検出

研究課題名(英文) Measurement of seafloor deformation associated with very-low-frequency earthquakes by differential pressure gauge

研究代表者

杉岡 裕子 (SUGIOKA, Hiroko)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員

研究者番号：00359184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：海溝近傍で発生する超低周波地震と呼ばれる破壊過程が異常に遅い地震は、古くから存在は指摘されていたものの(和達, 1928)、陸上からの遠地観測では実態を把握するには限界があった。先行研究で実施した南海トラフでの広帯域海底地震観測では、超低周波地震を直近で捉え、観測地震波の近地頂から地震に伴い生じた海底変動を初めて推定した(Sugioka et al., 2012)。本研究では、この上下変位を直接測定することを目的とし、高分解能水圧計である差圧計と広帯域地震計とを組み合わせた地動・水圧同時観測システムを開発した。本システムは固体・海洋の境界面である海底観測に有用な幅広い帯域をカバーするものである。

研究成果の概要(英文)：Since a celebrated discovery of submarine very-low-frequency earthquakes by Wadati in 1928, we have, for the first time, detected their near-field displacements by broadband ocean-bottom seismometers on the seafloor of the Nankai Trough accretionary prism (Sugioka et al., 2012). Based on the observation of vertical deformation, we developed new tool to measure the seafloor displacement by a differential pressure gauge (Araki and Sugioka, 2009). The system would be very advanced tool for observations on sea bottom where the interaction between the oceans and solid Earth can be caused.

研究分野：地震学

キーワード：海底地震観測 低周波地震 南海トラフ 津波地震

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震以降、日本列島全域に高密度に展開された高精度地震観測網 Hi-net (防災科学技術研究所) は、微小地震の検知能力の向上や震源決定の高精度化という地震活動の正確な把握に不可欠な実用的側面での貢献ばかりでなく [Okada et al., 2004; Obara et al., 2005]、地震発生帯における地球科学において新しい現象の発見という大きな成果をもたらした。それらは、海洋プレートの沈み込みに伴うもので、巨大地震の発生領域より深部で生じる非火山性低周波微動 [Obara, 2002] や非地震性スロースリップイベント [Obara et al., 2004]、海溝沿いの沈み込み帯浅部で発生する超低周波地震 [Obara and Ito, 2005] など、通常地震の震源時間に比べ、極めて長いタイムスケールの現象である。南海トラフでの発見を皮切りに、世界中の沈み込み帯においてもその存在が確認されており、その中でも特に、陸上観測点直下に当たる沈み込み帯深部で発生する現象については、この10年間で相当多数の研究結果が上がっている。一方、沈み込み帯浅部である海溝近傍において発生する超低周波地震については、古くからその存在が知られていたものの [和達, 1928; Kanamori, 1972; Fukao and Kanjo, 1980; Utsu, 1980]、海溝近傍という陸上から離れた海域であるため、比較的高密度展開されている高精度広帯域地震観測網においても検出されたのは表面波であり [Ishihara, 2003]、詳細な発生過程を把握するのに十分な精度のある観測はこれまで実現されていなかった。

2. 研究の目的

本科学研究に先駆け、紀伊半島沖において2008年8月から2009年10月に実施した広帯域地震計 (Guralp社製 CMG-3T) を用いた海底地震観測により、2009年3月末に南海トラフ沿いで群発した超低周波地震活動を震源距離10 km圏内で捉えることに成功した [Sugioka et al., 2012]。観測された速度記録は近地項を含んでおり、それらを積分することで求められた変位から、超低周波地震に伴う海底地殻変動の時定数は数10秒であり、その変直変位はサブミリメートルオーダーであることを初めて示した。また、波形インバージョン解析から、震源はフィリピン海プレート上の付加体堆積層の底面であるデコルマ面に沿って分布し、震源メカニズム解は全て低角逆断層型であり、モーメントマグニチュードは3.7~4.9であったことが推定された (図1)。更に、震源が時間とともに系統的に移動しており、その移動速度は1日当たり10 km程度であったことが明らかになった。地震波スペクトル解析から、この“超低周波地震”が低周波帯 (~10秒) のみならず、高周波帯域 (1-10 Hz) にも卓越する地震波を励起していたことを初めて見出し、単なる沈

み込み運動による剪断破壊のみならず、水圧破碎のような高周波成分を出す運動が起きている可能性を示唆する結果を導いた。

上記の観測研究では、付加体堆積層が

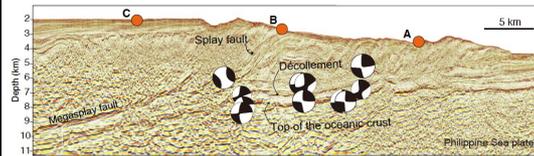


図1: 南海トラフ軸直近の広帯域海底地震観測で捉えられた超低周波地震の震源メカニズム解。橙丸印は観測点の位置を表す。超低周波地震は付加体堆積層底面のデコルマに沿ったプレート境界の低角逆断層地震であった [Sugioka et al., 2012]。

発達しているフィリピン海プレートの沈み込み帯域で行ったものであったが、この現象の普遍性について議論するため、本研究課題では、太平洋プレート沈み込み帯域においても広帯域地震計を用いた海底観測を実施し、実体を明らかにすることを目的とする。また、2011年東北地方太平洋沖地震のような海溝型巨大地震と超低周波地震のようなゆっくりしたプレート滑りとの関連性についても議論する。

3. 研究の方法

これまで多数の観測実績をもつ広帯域海底地震計 (東京大学地震研究所開発) に、独自に開発した高分解能海底水圧計である微差圧計 [Araki & Sugioka, 2009] を装備した地動・水圧同時観測システムを用いて (図2)、地震発生帯における海底観測を実施する。観測海域は、2011年東北沖地震の震源域とその南側縁辺域である房総沖を設定し、それぞれ5-6観測点をアレー展開して観測を実施する。また、本研究計画に先行して実施中であった、日本海溝アウターライズ上での地震観測網 (3観測点) は東北沖地震震源域の海側縁辺域にあたるため、これらのデータを回収し、併せて解析に用いる (図3)。



図2: 広帯域地震計と微差圧計を組み合わせた海底地動・水圧同時観測システムの外観。手前の白い筐体が独自に開発した微差圧計 [Araki and Sugioka, 2009]。

一方で、水圧観測での低周波側への検知領域を拡大するため、高精度絶対圧力計（Paroscientific社製 Nano-resolution型）を既存の広帯域地震計に組み込むための新規開発を行う。微差圧計は、もともと内部重力波を対象として開発したものであり、100秒帯に焦点を合わせて設計したものであるため、それより低周波側では感度は低下し、位相もずれが生じる[Araki and Sugioka, 2009]。ここで用いる絶対圧力計は、ごく最近開発されたものであり、従来の計測方式のそれよりも100倍の分解能を有する。微差圧計と絶対圧力計を相補的に用いることにより、より広帯域をカバーする地動・水圧同時観測が実現されるものと期待できる。

4. 研究成果

2010年7月から日本海溝アウターライズにおいて観測を展開していた広帯域海底地震計3台を2011年8月に回収し、想定通り、1年間の連続記録を取得した。これらには、2011年3月11日のMw9.0東北沖地震時の記録も含まれ、内2台には微差圧計を装備した地動・水圧同時観測装置を配置しており、地震に伴う津波を直近で捉えることに成功した。この津波波形解析では、甚大な被害をもたらしたとされる、津波第二波であるインパルス津波の波源特定に対して、特に有用であった。それは、海溝より陸側の常設の釜石沖ケーブル式津波計や沿岸のGPS波浪計の記録と、海溝より海側の海底微差圧計記録を併せて解析することにより、津波第二波が、それらの境界に当たる海溝軸近傍で発生したことを明らかにした(図4)。この結果は、地震波解析から推定された滑り量分布[例えば、Ide et al., 2011]とも調和的な結果であり、この東北沖地震においては、従来非地震領域とみなされていた海溝軸近傍まで破壊が及ん

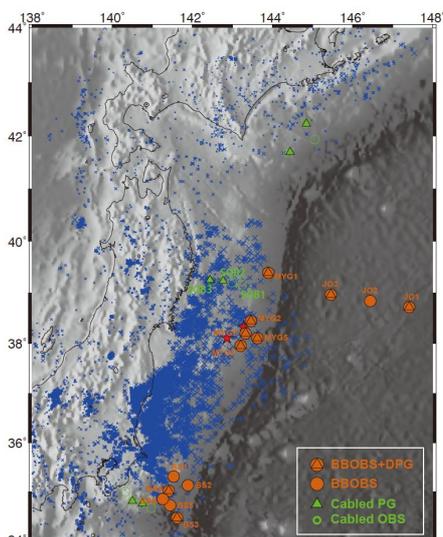


図3: 2011年東北沖地震震源域周辺の海底地動・水圧同時観測網(橙印)。緑印は海底ケーブル式地震・津波観測点。赤星印は本震(南方)と前震(北方)の震央、青丸印は1926年から前震までの気象庁地震カタログの震央。

だことを支持する。また、海底地震観測では、本震の2日前に発生したMw7.3の前震発生時から本震にかけて継続的に発生した一連の破壊活動を捉えた。それらの地震波スペクトル解析から、超低周波地震の卓越周期である10秒帯域とともに2-8 Hzの高周波帯域においても卓越しているというバイモーダル構造を持つ(図5)。2011年東北沖地震は、Inner segmentとOuter segmentの境界部分を破壊することにより引き起こされたものであり、その境界に溜まっていた大きなストレスを解放したことが本質であると考えている。3月9日の前震は、その境界部分を破壊したものであり、ストレスドロップが大きく且つ高周波成分を多く励起したことが予想され、上述の高周波成分を多く励起したという観測事実は本説を支持する。今後は、海底ケーブル式地震計を用いて観測事実をより強固なものにするとともにストレスドロップを推定するための波形解析を行う。

本研究対象である超低周波地震は、巨大地震震源域の縁辺部で起きるという特徴をもつ。本研究では、2011年東北沖地震直後にそれを狙った海底観測を実施し、2011年4月に震源域内とその北方縁辺部に5点、2012年2月に震源域南方縁辺部の房総沖に6点のアレ観測網を展開した。震源近傍では全点に、房総沖では6点の内3点に、微差圧計装備の地動・水圧同時観測システムを配置した。観測は約1年間実施し、2012年3月に2011年東北沖地震震源域の観測装置を、2013年3月に房総沖の観測装置を回収した。震源域観測

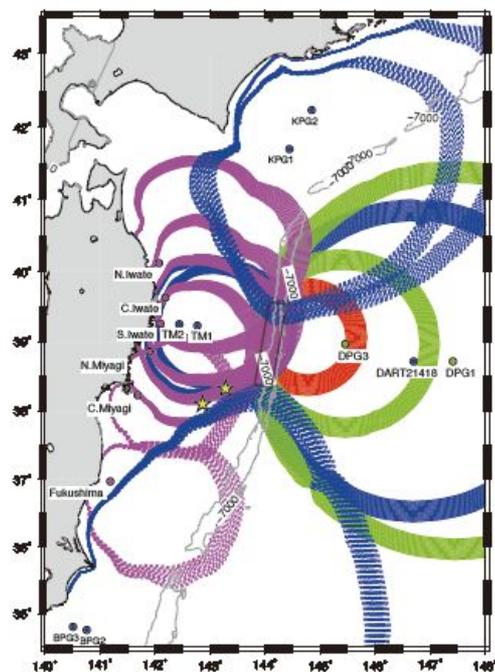


図4: 日本海溝アウターライズで観測された海底微差圧計、釜石沖ケーブル水圧計、GPS波浪計記録解析により推定された2011年東北沖地震津波の波源域で、等走時曲線が交差する矩形部分を指す。日本海溝軸で津波が発生したことがわかる。

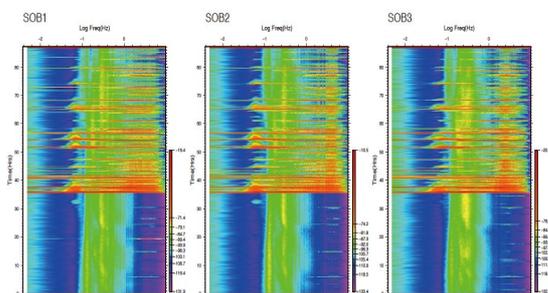


図 5: 2011 年 3 月 8 日～3 月 11 日の釜石沖ケーブル地震計観測スペクトログラム。東北沖地震の前震から本震にかけて高周波成分に富む波が励起。各観測点と震央の位置関係は図 3 参照。

網では東北沖地震の余震を微小地震も含め多数捉えており、そのうち、2012 年 7 月 11 日のプレート内で発生した Mw7.0 の地震については、その震源直上で捉えることに成功した。また観測網は、断層面を包囲した配置であり、地動の初動の極性分布ならびに水圧計で計測された上下変動から、遠地記録解析から推定された震源メカニズム解では不明確であった断層面を特定した。なお、この地震には津波が伴ったが、全微差圧計において明瞭に記録された。

<引用文献>

- [1] Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sakaguchi, H. Fujiwara, *Earth Planets and Space*, 56, 2004.
- [2] Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, Y. Okada, *Review of Scientific Instruments*, 76, 2005.
- [3] Obara, K., *Science*, 296, 2002.
- [4] Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, K. Kasahara, *Geophysical Research Letters*, 31, 2004.
- [5] Obara K., Y. Ito, *Earth Planets Space*, 57, 2005.
- [6] 和達清夫, 気象集誌第二, 1928.
- [7] Kanamori, H., *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 6, 1972.
- [8] Fukao, Y., K. Kanjo, *Tectonophysics*, 67, 1980.
- [9] Utsu, T., *J. Phys. Earth*, 28, 1980.
- [10] Ishihara, *EOS Transactions American Geophysical Union* 84, 2003.
- [11] Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obara, K. Nakahigashi, M. Shinohara, Y. Fukao, *Nature Geoscience*, 5, 2012.
- [12] Araki, E., H. Sugioka, Calibration of deep sea differential pressure gauge, *JAMSTEC-R, Special Issue*, 2009.
- [13] Ide, S., A. Baltay, G. C. Beroza, *Science*, 2011.

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

(雑誌論文)(全て査読論文:計17件)

- Barklage, M., D. A. Wiens, J. A. Conder, S. Pozgay, H. Shiobara, H. Sugioka, P and S velocity tomography of the Mariana subduction system from a combined land-sea seismic deployment, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16, doi:10.1002/2014GC005627, 2015.
- Sugioka, H., Y. Hamano, K. Baba, T. Kasaya, N. Tada, D. Suetsugu, Tsunami: Ocean dynamo generator, *Scientific Reports*, 4, doi:10.1038/srep03596, 2014.
- Obana, K., S. Kodaira, M. Shinohara, R. Hino, K. Uehira, H. Shiobara, K. Nakahigashi, T. Yamada, H. Sugioka, A. Ito, Y. Nakamura, S. Miura, T. No, N. Takahashi, Aftershocks near the updip of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 382, 111-116, doi:10.1016/j.epsl.2013.09.007, 2013.
- Obayashi, M., J. Yoshimitsu, G. Nolet, Y. Fukao, H. Shiobara, H. Sugioka, H. Miyamachi, Y. Gao, Finite frequency whole mantle P-wave tomography: Improvement of subducted slab images, *Geophysical Research Letters*, 40, 5652-5657, doi:10.1002/2013GL057401, 2013.
- Saffer, M., P. Flemings, D. Boutt, M. -L. Doan, T. Ito, L. McNeill, T. Byrne, M. Conin, W. Lin, E. Araki, N. Eguchi, S. Toczko, Y. Kano, In situ stress and pore pressure in the Kumano forearc basin, offshore SW Honshu from downhole measurements during riser drilling, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14, doi:10.1002/ggge.20051, 2013.
- Takeo, A., K. Nishida, T. Isse, H. Kawakatsu, H. Shiobara, H. Sugioka, T. Kanazawa, Radially anisotropic structure beneath the Shikoku Basin from broadband surface wave analysis of ocean bottom seismometer records, *Journal of Geophysical Research*, 118, 2878-2892, doi:10.1002/jgrb.50219, 2013.
- Shito, A., D. Suetsugu, T. Furumura, H. Sugioka, A. Ito, Small-scale heterogeneities in the oceanic lithosphere inferred from guided waves, *Geophysical Research Letters*, 40, 1708-1712, doi:10.1002/grl.50330, 2013.
- Tonegawa, T., Y. Fukao, K. Nishida, H.

Sugioka, A. Ito, A temporal change of shear wave anisotropy with the marine sedimentary layer associated with the 2011 Tohoku Oki earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 118, 607-615, doi:10.1002/jgrb.50074, 2013.

Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, K. Nakahigashi, M. Shinohara, Y. Fukao, Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow slip, *Nature Geoscience*, 5, doi:10.1038/NGEO1466, 2012.

Ito, A., H. Sugioka, D. Suetsugu, H. Shiobara, T. Kanazawa, Y. Fukao, Detection of small earthquakes along the Pacific-Antarctic Ridge from T-waves recorded by abyssal ocean-bottom observatories, *Marine Geophysical Research*, 33, doi:10.1007/s11001-012-9158-0, 2012.

Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto, Y. Kaneda, FDM simulation of seismic-wave propagation for an aftershock of the 2009 Suruga Bay earthquake: Effects of ocean-bottom topography and seawater layer, *Bulletin of Seismological Society of America*, 102, 2420-2435, doi:10.1785/0120110356, 2012.

Prior, M. K., O. Meless, P. Bittner, H. Sugioka, Long-Range detection and location of shallow underwater explosions using deep-sound-channel hydrophones, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 36, 703-715, doi:10.1109/JOE.2011.2154390, 2011.

Emry, L., D. Wiens, H. Shiobara, H. Sugioka, Seismogenic characteristics of the Northern Mariana shallow thrust zone from local array data, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12, doi:10.1029/2011GC003853, 2011.

Suetsugu, D., H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, T. Isse, T. Kasaya, N. Tada, K. Baba, N. Abe, Y. Hamano, P. Tarits, J-P. Barriot, D. Reymond, TIARES project—Tomographic investigation by seafloor array experiment for the Society hotspot, *Earth, Planets and Space*, 64, doi:10.5047/eps.2011.11.002, 2011.

Tsuji, T., R. Hino, Y. Sanada, K. Yamamoto, J.-O., Park, T. No, E. Araki, N. Bangs, R. von Huene, G. Moore, M. Kinoshita, In situ state from walkaround VSP anisotropy in the Kumano basin southeast of the

Kii Peninsula, Japan, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12, doi:10.1029/2011GC003583, 2011.

Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto, Y. Kaneda, A study of the finite difference solution for 3D seismic wavefields near a fluid-solid interface, *Zisin*, 63, 189-196, 2011.

Ohori, M., T. Nakamura, K. Ariyoshi, S. Kamiya, H. Matsumoto, E. Araki, A. Sakuma, K. Kawaguchi, S. Tsuboi, Y. Kaneda, A trial estimation of maximum acceleration expected for DONET, JAMSTEC Report, 17-31, 2011.

[学会発表](計17件)

Fukao, Y., H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, J. Paros, Observations of related seafloor tilt events atop the inward steep slope of the Japan Trench using new high-resolution accelerometers, American Geophysical Union 2014 fall meeting, 2014年12月15日, San Francisco, USA.

塩原肇, 篠原雅尚, 伊藤亜妃, 杉岡裕子, 海底面での機動的傾斜観測によって直上で得られた2014年1月房総沖スロースリップイベント時の傾斜変動, 日本地震学会2014年度秋季大会, 2014年11月24日, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, 新潟県新潟市.

浜野洋三, 杉岡裕子, 多田訓子, 藤浩明, 南拓人, ベクトル津波計による微小津波の検出, 地球電磁気・地球惑星圏学会2014年度秋季大会, 2014年11月4日, キッセイ文化ホール, 長野県松本市.

利根川貴志, 深尾良夫, 藤江剛, 高橋努, 小平秀一, 杉岡裕子, 伊藤亜妃, 海底地震計記録を用いた北西太平洋域の構造推定:短周期成分(>1Hz)の活用, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月29日, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市.

Hamano, Y., H. Sugioka, H. Hoh, Long-term deployment of Wave Glider for a real-time tsunami monitoring system using the Vector Tsunameter, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月29日, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市.

Araki, E., T. Kimura, S. Kodaira, S. Miura, M. Takaesu, N. Takahashi, M. Nakano, Y. Kaneda, Experiment to detect temporal change of seismic velocity in the subducting plate boundary in the Nankai Trough using the DONET submarine cabled observation network and airgun

controlled source, OCEANS 2014, 2014年4月10日, Taipei, Taiwan.

Shiobara, H., A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, New style OBS to the abyss, American Geophysical Union 2013 fall meeting, 2013年12月13日, San Francisco, USA.

Hamano, Y., H. Sugioka, N. Tada, H. Toh, T. Minami, I. Kawashima, Observation of seafloor Electro magnetic signals by using Vector Tsunameter, 地球電磁気・地球惑星圏学会2013年度秋季大会, 2013年11月3日, 高知大学, 高知県高知市.

Sugioka, H., Y. Hamano, Tsunami induced electromagnetic fields in the ocean, 2013 Marine Electromagnetic Conference, 2013年7月17日, Hamburg, Germany.

Yamamoto, Y., K. Obana, Y. Machida, K. Nakahigashi, M. Shinohara, K. Suzuki, Y. Ito, Y. Hino, S. Kodaira, Y. Kaneda, Y. Murai, T. Sato, K. Uehira, H. Yagihara, K. Hirata, H. Sugioka, A. Ito, D. Suetsugu, Seismic velocity structure around the shallow megathrust zone of the 2011 Tohoku earthquake deduced from onshore and offshore seismic observations, American Geophysical Union 2012 fall meeting, 2012年12月7日, San Francisco, USA.

Obana, K., M. Shinohara, T. Yamada, K. Uehira, R. Hino, H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, Y. Nakamura, T. No, S. Miura, S. Kodaira, N. Takahashi, Near-trench aftershocks of the 2011 Tohoku-oki earthquake based on ocean bottom seismograph observations, American Geophysical Union 2012 fall meeting, 2012年12月7日, San Francisco, USA.

Tonegawa, T., Y. Fukao, K. Nishida, H. Sugioka, A. Ito, A temporal change of shear wave anisotropy within the marine sedimentary layer associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake, American Geophysical Union 2012 fall meeting, 2012年12月5日, San Francisco, USA.

Hamano, Y., H. Sugioka, H. Ichihara, N. Tada, H. Toh, Generation and propagation of the 2011 Tohoku earthquake tsunami inferred from the OBEM array in the North-West Pacific, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 2012年5月20日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.

Araki, E., K. Achim, D. Saffer, K. Kitada, T. Kimura, M. Kinoshita, K.

Kawaguchi, Y. Kaneda, IODP Exp 332 Science Party, Seafloor borehole observatories for real time monitoring of slip events in the Tonankai earthquake fault, The 8th Annual General Meeting Asia Oceania Geosciences Society 2011 meeting. 2011年8月8日, Taipei, Taiwan.

Okamoto T., T. Nakamura, H. Sugioka, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, S. Kodaira, D. Suetsugu, M. Kinoshita, Y. Fukao, Moment tensor inversion of broadband ocean bottom records from very low frequency earthquakes off Kii Peninsula, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 2011年5月23日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.

Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, Y. Fukao, Very low frequency earthquake along the decollement of Nankai Trough, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 2011年5月22日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.

荒木英一郎, 北田数也, 東南海震源域における孔内地震地殻変動観測の進捗, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 2011年5月20日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者:

杉岡 裕子 (SUGIOKA, Hiroko)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部
ダイナミクス研究分野・主任研究員
研究者番号: 00359184

(2) 連携研究者

荒木 英一郎 (ARAKI, Eiichiro)
独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・技術研究副主
幹
研究者番号: 60359130

岡元 太郎 (OKAMOTO, Taro)
東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 40270920

石原 靖 (ISHIHARA, Yasushi)
独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・技術主任
研究者番号: 40232334

伊藤 亜妃 (ITO, Aki)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部
ダイナミクス研究分野・技術研究員
研究者番号: 90371723