

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海底地殻変動観測システムの高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 新たな観測技術の開発

(1) 海底における観測技術の開発と高度化

ア. 海底地殻変動観測技術

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

GPS/音響観測の定常的なキャンペーン観測を 1 観測点あたり年に 1 ~ 2 回行う体制は既に整ったが、観測点数を大幅に増やしたり観測頻度を上げることは、コスト的に当面困難である。こうした観測条件下で、観測される変動ベクトルの信頼性を上げるには、現在数 cm に留まっている繰り返し観測精度を大幅に向上させることが急務である。

これまでの解析から、繰り返し観測の精度を低下させる最大の要因は海中音速の水平方向の不均質であることが明らかになっている。こうした音速不均質の影響を軽減する手段として、1 観測点あたりの海底局の台数を既存の台数よりも増やし、海底局アレイ配置と海上ブイの観測位置を工夫する方法が考案されている。5 ヶ年の到達目標は、重点観測点において追加の海底局を設置しこの方式に沿った観測を行い、測位精度の大幅な向上が可能なことを実証すると共に、アレイの配置など、より条件の良い観測形態を確立することである。また、それを実践し、比較的短い期間の繰り返し観測により、宮城県沖のプレート間の固着状態を明らかにする。

一方、上記の GPS/音響観測と並行して、短基線の海底間音響測距観測の技術開発を行う。これは海底断層などによる変位の局在化が期待される箇所を跨いで 2 台以上の音響装置を海底に設置し、両者間の距離をモニターすることにより断層運動を検出するものである。現在機器自体の開発は完了しており、1 km 程度の基線長において 2-3 cm の観測精度を達成している。5 ヶ年の到達目標は、観測精度を左右する海底付近の温度変化の特徴を把握して適切なモデル化を行うことにより、観測精度を 1 cm 以下に向上させ、想定される変動量が小さい断層運動の検出を可能にすることと、観測対象の自由度を上げるため、比較的長い数 km 以上の基線でも同様の精度を達成できる観測形態を確立することである。

また、海底上下変動を検知するための精密海底圧力観測に着手する。海底の圧力データには、海底の上下変動とともに海洋の変動現象が記録されるため、これらの影響を除去するためのデータ処理・解析手法の開発を進める。5 ヶ年で、海洋変動が海底圧力データに及ぼす影響の時空間スペクトルの特徴を解明し、海洋変動過程を圧力データから除去する方法の確立を目指す。海洋変動過程を把握することは、上記の海底間音響測距観測の高精度化にも貢献するため、圧力観測と音響測距観測とを並行して行うことにより、海底の上下・水平変動を同時にモニタリングする技術の実現につながる。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度においては、GPS/音響観測の 1 観測点に多数の海底局でアレイを組むのはコスト的に困難なので、宮城県沖で最も大きな変位が期待される方向に沿って海底局を線上に並べ、その一次元方向の変位と音速不均質を同時に計測できるかどうかを検証する。春に予定されている航海で海底局を線上に追加設置し、2 日程度のキャンペーン観測を行う。秋にも同じ観測点で継続観測を行い、その繰り返し観測精度を見積もる。この観測方法が期待通りに機能すれば、翌年以降の継続観測に資するため、追加した海底局は設置したままとする。問題があれば追加した海底局は回収し、より最適な配置になるよう再設置する。短基線音響測距に関しては、音響装置の吊り下げ曳航試験で最大測距距離を確認した後、それに近い基線長で実際の海底で 1 日程度の連続試験観測を行う。同時に、海底音響装置に温度計を装備し、温度計アレイでの海水温の時空間変化をモニターし、水温変化による短基線測距への影響を見極め、以降の観測形態の改良に役立てる。圧力観測に関しては、日本海溝周辺において試験観測を開始するとともに、これまでに得られている圧力データを再解析した結果と気象・海洋モデルからの予測値との比較により、海洋変動起源の圧力変動の周期特性の解明を行う。それと並行して、圧力計センサーの長期安定性を調べるための室内実験を行う。

平成 22 年度においては、GPS/音響観測について、宮城県沖での一次元方向の水平変動観測を継続し、前年度の観測結果との比較によって、試験的に 1 年間の変位の検出を試みる。十分な精度が達成されるようであれば、海底局アレイを二次元の配置とし、地震時の面的な変動の検出にも対応できる体制をとる。また、海底間音響測距に関しては、局所変位が存在する可能性のある宮城県沖の分岐断層沿いに音響装置を設置し、このような地形の複雑な海域においても十分な測距精度が達成されるかを試験観測により調べる。一方、圧力観測に関しては、昨年度からの試験観測によるデータを解析し、海洋変動の影響の除去が可能かどうかの検証を行うとともに、そうした影響を受けにくい観測形態についても考察し、今後の観測に反映させる。また試験観測も継続して行う。

平成 23～25 年度においては、宮城県沖での GPS/音響観測を継続して実施し、観測自体の高精度化と長期データの蓄積を通して、精度の高い水平変動ベクトルを得る。海底間音響測距については、分岐断層における観測とは別に、海溝を跨いだ観測を 1 年程度の長期間行い、GPS/音響観測や陸上変位データとの併合処理により、海溝から陸に至るまでの歪み蓄積の空間分布を明らかにする。圧力観測については、特定海域への圧力計の定期的な設置・回収、および適切な海洋変動成分の除去によって海底上下変動の検出精度を向上させることで、GPS/音響観測や海底間音響測距では検出が困難なすべり現象等に伴う微小上下変位の検出に努め、プレート間の歪蓄積過程の解明に資する。

(7) 平成 23 年度成果の概要 :

3 月 11 日に発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震による海底地殻変動を計測するため、地震の約 1 カ月後にオフショア・オペレーション社の第五海工丸を傭船し、4 月 8 日(秋田港) - 4 月 13 日(横須賀港) の日程で緊急観測を行った。日程が非常に短く、また津波による漂流物の影響で夜間の観測が出来なかったことから、極めて短時間の限られた観測となり測位精度が悪かったものの、GJT3 と GJT4 の観測サイトで、それぞれ 31m、15m にも及ぶ大規模な変位を捉えることができた(図 1)。また、GJT3 においては 3.9m の隆起も捉えられた。以下、観測成果の概要を述べる。

GJT3 については、6 台全ての海底局からの応答があったため、従来通り海底局アレイ中心での定点観測を 1 時間ほど行った。その結果、地震前からの変位として、東へ $29.5 \pm 0.5\text{m}$ 、南へ $11 \pm 0.5\text{m}$ 、 $3.9 \pm 1\text{m}$ 隆起の変位を捉えた。誤差の見積もりが大きいのは、観測時間が短かったほか、海底局が強振動により動いてしまった形跡が捉えられたためである。定点観測を行った場合、各海底局の走時残差の時系列は、音速変化に従いほとんど同一の変化を示し、この様子は地殻変動があっても海底局の相対位置が変わらない限り不変である。しかし、地震後に走時残差の値の相対値が海底局ごとにランダムに変化しており、これは個々の海底局が数 10cm 程度の範囲でランダムに動いたことを示している。個々の動きは定点観測位置から見た視線方向成分のみ推定可能である(図 2)。

GJT4 においては、地震後 5 つの海底局のうち 3 台が応答不能となっていることが判明した。海底地滑りなどによる海底局の損傷も考えられるが、装置のバッテリーの寿命が近づいていたため、単なる

電池切れの可能性も否めない。原因究明のため、潜航調査による回収が望まれる。現実的には、GJT4 周辺は極めて平坦な海底地形をしており、やや急な地形である GJT3 で全局無事であったことから海底地滑りの可能性は低いと考えられる。応答可能な海底局が 2 台しか無かったため、通常の定点観測は断念し、移動観測による海底局単体の位置決めを行った。時間が非常に制限されていたため、平時より高速にブイを曳航して 1 時間ほどの短時間で移動観測を行ったため、結果的に音速場の時間変化が少なく、通常の移動観測よりも残差の少ない測位が行えた。それでも、定点観測には遠く及ばず、水平方向で 1m、上下方向で 2m 程度の誤差が想定される。得られた変位は、東へ $14 \pm 1\text{m}$ 、南へ $5 \pm 1\text{m}$ 、 $3.5 \pm 2\text{m}$ 隆起である。

これらの変位は 3 月 9 日に発生した前震、さらに本震後の 1 ヶ月間の余効変動を含むものであるが、いずれも今回の観測精度より小さいと推定されている。これらの結果に基づき、単一矩形断層によるモデル化を行った結果、海溝軸まで滑り面が達していると言う結果が得られた(課題 1202)。また、海溝海側の太平洋プレート上に設置してある GJT1 の観測結果からは、沈み込むプレート側は地震時に殆ど動いていないことが示唆された。

共同利用の淡青丸による KT11-06、KT11-21、KT11-28 航海を実施し、一部応答の無くなった GJT4 サイトの再構築および最適化を行った。最終的に KT11-28 航海では従来の東西 1 次元のアレイから、大小の二重三角形配置の 2 次元アレイに強化し、短期係留ブイおよび曳航ブイによる同時観測に成功した(図 3)。来年度の観測と併せて GJT4 における東北地方太平洋沖地震の余効変動が捉えられると期待できる。一方、海底局が無傷であった GJT3 においては、地震後 3 回の観測を定期的実施し、地震後の半年余りの間に東向き 1.2m の余効変動を捉えることに成功した。これは、陸上の GPS データのみから推定した余効すべりモデルから想定される該当海域の余効変動の 2 倍以上の大きさであり、海溝軸付近に局在化した大きな余効変動があったことを示唆するものである。更に観測の空白域となっていた福島沖に GFK サイトを構築した。GFK の海底局はその後トラブルが発生したが、限られたデータ量で余効変動を検出するための解析の工夫を検討しているところである。追加設置した海底局は、以前に潜航回収した海底局を電池を入れ替えて再利用したものである。

2010 年 8 月に潜航調査を利用して熊野灘の分岐断層沿いに設置した海底間音響測距装置 3 台を KH11-9 白鳳丸航海で回収した(図 4)。非常に不安定な崖の斜面に設置したため、安定度が不安視されていたが、暫定的な測距結果と水圧データを見る限りは、滑落等の問題は見当たらず、約 450 日にわたり分岐断層の動きをモニターできていたことがわかった。観測精度の長期安定性に関しては、前回の観測データの解析をすすめ、1cm 程度が保証されることが確認され、この観測精度を超えるような大きな変位は発生していなかったことがわかった。この結果を受け、同じく KH11-9 航海で、2011 年東北地方太平洋沖地震時に動いた可能性が指摘されている宮城県沖の分岐断層沿いに同装置を設置し、地震後の分岐断層の長期モニタリングを開始した。

宮城県沖に展開していた海底圧力計は回収が進み、これまでに 8 つの地点でのデータが得られ(図 5)。東方地方太平洋沖地震の前震・本震時の変位、またそれぞれの余効変動を時系列として捉えることに成功した。圧力計は陸に近い浅い海域から海溝軸付近にまで分布しており、上記の海底 GPS データ等と併せて、一連の地震によるスリップ量の推定をインバージョンの手法により行っている。これまでに取り組んできた海洋変動モデルの推定は、宮城県沖における海底圧力変動の非潮汐成分について、その RMS 振幅を約 2.2hPa から 1.7hPa 程度に低減させることができる。このモデルを用いて現場海底圧力データを補正することで、震源近傍での前震・本震間のゆっくりとした数 cm の小さな海底上下変位を検出することができた。

- (8)平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Fujimoto, H., M. Kido, Y. Osada, K. Tadokoro, T. Okuda, Y. Matsumoto and K. Kurihara, 2011, Long-Term Stability of Acoustic Benchmarks Deployed on Thick Sediment for GPS/Acoustic Seafloor Positioning, pp.263-272, in Yujiro Ogawa, Ryo Anma and Yildirim Dilek eds., Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin, Modern Approaches in Solid Earth Sciences Volume

8, DOI:10.1007/978-90-481-8885-7, Springer Science+Business Media B.V.

- Fujimoto, H., M. Kido, K. Tadokoro, M. Sato, T. Ishikawa, A. Asada, and M. Mochizuki, 2011, Improvement of the GPS/A system for extensive observation along subduction zones around Japan, Abstract U51A-0865, AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Hino, R., D. Inazu, Y. Ito, T. Inuma, Y. Ohta, M. Ohzono, K. Suzuki, Y. Osada, M. Kido, S. Suzuki, H. Fujimoto and Y. Kaneda, 2012, Coseismic and postseismic vertical seafloor deformation associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake and its large foreshock, *Geophys. Res. Lett.*, in revision.
- Hino, R., Y. Ito, K. Suzuki, S. Suzuki, D. Inazu, T. Inuma, Y. Ohta, H. Fujimoto, M. Shinohara, and Y. Kaneda, 2011, Foreshocks and mainshock of the 2011 Tohoku earthquake observed by ocean bottom seismic/geodetic monitoring, Abstract U51B-0008, AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Inuma, T., M. Ohzono, Y. Ohta, and S. Miura, 2011, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) estimated based on GPS data—Was the asperity in Miyagi-oki ruptured?, *Earth Planets Space*, 63, 643-648, doi: 10.5047/eps.2011.06.013.
- Inuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto and S. Miura, 2012, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, in review.
- Inazu, D. and R. Hino, 2011, Temperature correction and usefulness of ocean bottom pressure data from cabled seafloor observatories around Japan for analyses of tsunamis, ocean tides, and low-frequency geophysical phenomena, *Earth Planets Space*, 63, doi:10.5047/eps.2011.07.014.
- Inazu, D., R. Hino, S. Suzuki, Y. Osada, Y. Ohta, T. Inuma, H. Tsushima, Y. Ito, M. Kido, and H. Fujimoto, 2011, Ocean bottom pressure observations near the source of the 2011 Tohoku earthquake, AGU Fall Meeting, Abstract G51A-0868, San Francisco.
- Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto, 2011, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2011GL048355.
- Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, 2011, AGU Fall Meeting, Abstract T11C-02, San Francisco .
- Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito, 2011, Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L24303, doi: 10.1029/2011GL050057.
- Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito, 2011, Trench-normal variation in coseismic displacement of the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected through GPS/acoustic surveys, Abstract U51A-0867, AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Osada, Y., M. Kido, Y. Ito, Y. Ohta, R. Hino and H. Fujimoto, 2011, Post-seismic deformation observed off Miyagi after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) using GPS-acoustic observation system, Abstract G51A-0866, AGU Fall Meeting, San Francisco.
- 長田幸仁・木戸元之・伊藤喜宏・太田雄策・日野亮太・藤本博己, 2011, 宮城県沖における 2011 年東北地方太平洋沖地震後の海底地殻観測, 日本地震学会 2011 年秋季大会, 静岡, P2-11.

(9) 平成 24 年度実施計画の概要 :

本課題は「超巨大地震に関する当面推進すべき研究」に申請した新課題「海底地殻変動観測システムの高度化」に完全に移行する。これは、受託研究での大規模な海底 GPS 網による余効変動観測が実現できる見通しが立ち、地震予知研究では、残され空白域を埋めるべく、海溝軸付近の超大深度での観測の実現に向けた技術開発が急務だと判断されたためである。

これまで東京大学地震研究所において開発が進められてきた海底地震計の超深海化の技術を応用し

た超深海型水圧計を試作し、水深 7,000m の海底において試験観測を開始する。また、GPS/A 観測用の海底局も超深海底に対応させるため、海底局に使用する要素部品・資材の耐水圧性能の評価を行う。これと並行して、海水面と超深海底との間を結んだ長距離での音響測距の実現可能性に関する評価を行う。以上の検討結果をもとに、超深海型の海底局装置の試作に着手する。

数 km 程度の基線長での海底間音響測距観測の技術開発を継続して行う。観測精度を左右する海底付近の温度変化の特徴を把握して適切なモデル化を行うことにより、観測精度を 1 cm 以下に向上させ、海底あるいは海底下浅部にまで及ぶような断層運動の検出をめざす。平成 23 年度に、東北地方太平洋沖地震の震源域内において海底面を変位させている正断層を挟んで 1 対向を設置したので、このデータの回収を行うとともに、この観測を継続する。この断層は、巨大な地震時すべりの影響で生じた上盤プレート内の伸張場によって活動した可能性が高い。一方で、余効すべりから固着の回復に向かっていく過程でどのように振る舞うのかは未知であるが、変位レートが高い可能性があるために、観測技術開発のテストサイトとしてふさわしいと考える。逆に、有意な断層運動が検知されれば、超巨大地震の発生機構の解明に有効なデータを提供できる。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

藤本博己・木戸元之・長田幸仁・伊藤喜宏・日野亮太・稲津大祐・他
他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所 (2 名) 海上保安庁 (1 名) 国土地理院 (1 名) 海洋研究開発機構 (2 名)

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話 : 022-225-1950

e-mail : zisin-yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp

URL : <http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/>

(12) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 木戸元之

所属 : 東北大学大学院理学研究科

電話 : 022-225-1950

FAX : 022-264-3292

e-mail : kido@aob.geophys.tohoku.ac.jp

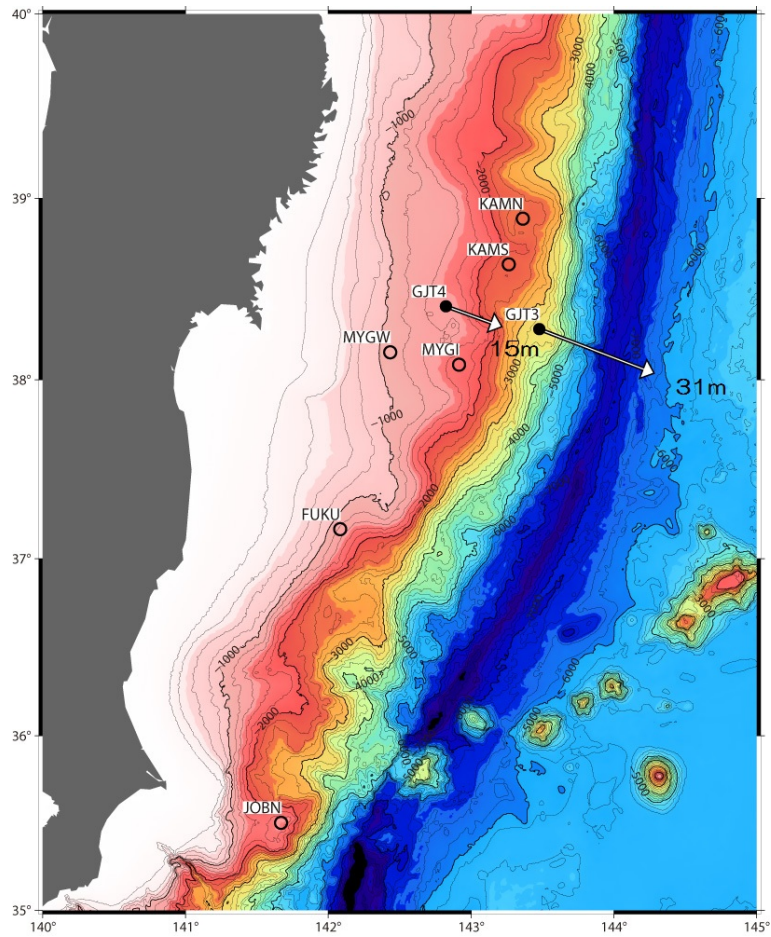


図 1 : GJT3 と GJT4 の観測点配置と東北地方太平洋沖地震による変位の観測結果

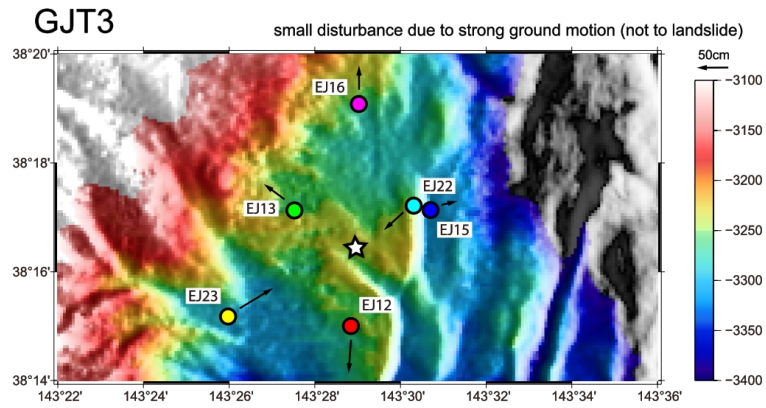


図 2 : GJT3 の海底局の強振動による個々の動き

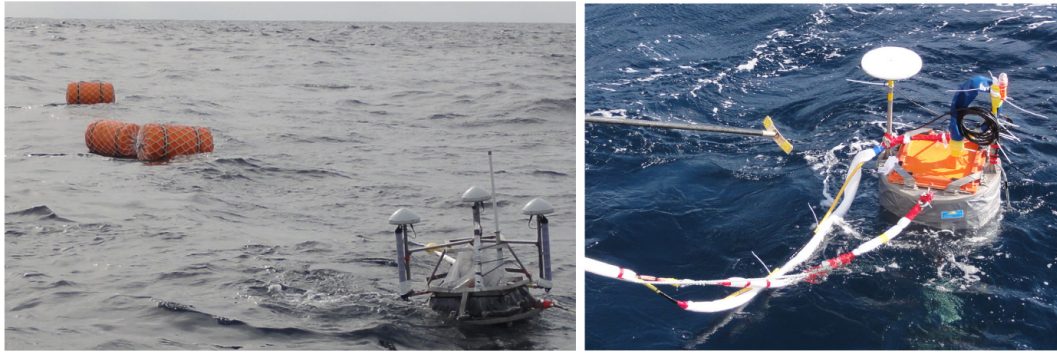


図3：GJT4での係留ブイ（左）と曳航ブイ（右）による同時観測

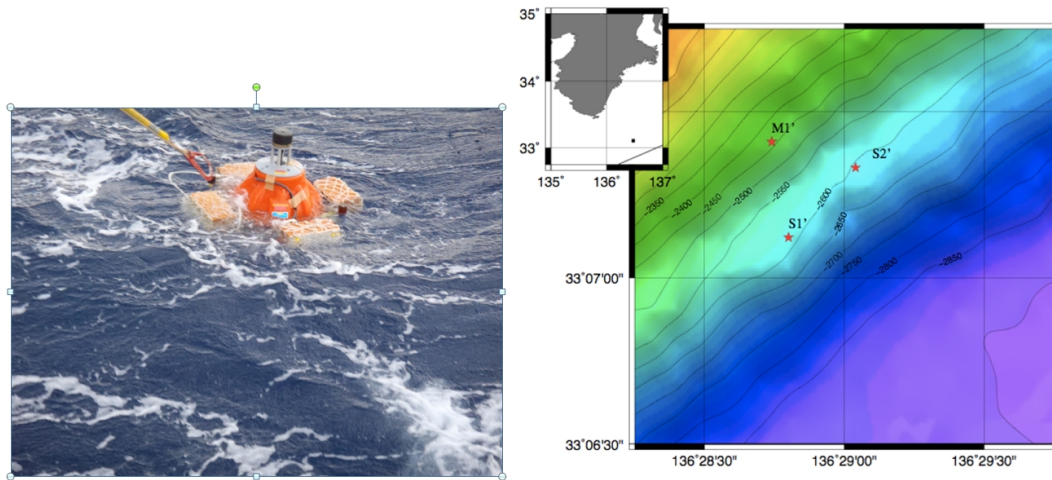


図4：海底間音響測距装置の回収の様子（左）と熊野灘分岐断層沿いの設置箇所（右）

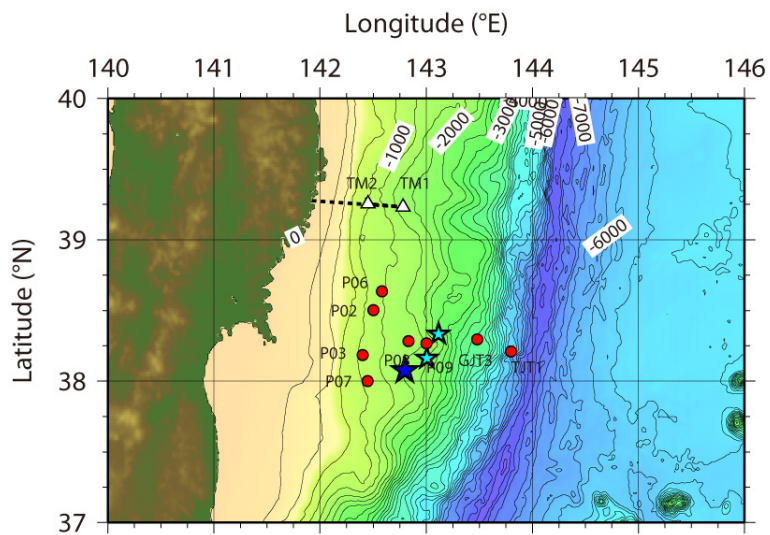


図5：回収された圧力計（赤）の分布と前震（水色）及び本震（青）