

(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である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 22 年度成果の概要：

将来の海底地殻変動の連続観測に向けた技術開発、および海上局の複数化により測位精度に影響する海中音速の不均質場の性質を捉えるため、係留ブイおよび係留系を開発し、従来の曳航ブイ観測と並行して係留ブイによる試験観測を実施した。係留試験を行った場所は、水深 1450m の日本海溝海側斜面である。2010 年 11 月 14 日から 16 日にかけての 48 時間程度の係留を行った。係留中は 1～2km 離れた地点で、係留ブイと定期的に通信しながら、曳航ブイによる同時観測を行った。係留観測は基本的にオフラインでの観測となるため、電源と無線通信の確保が必要である。作製した係留ブイは、図 1 左に示したように、上部に 2 周波の GPS アンテナ 3 台、下部に音響トランスデューサを装備した形である。今回は試験観測であるため、簡易的に 2.4GHz 帯の特定小電力無線を利用し、1km の距離で問題なく通信できることを確認した。これを図 1 右に示す係留系に繋ぎ、1knt 程度の海流で、先頭の小型フロート（浮力 280kg）が波浪により稀に水没する程度の張力であることを確認した。試験自体は、係留ブイに搭載した音響装置の不調により、曳航ブイとの同時観測による音速不均質場の推定には至らなかったが、係留観測の技術的な知識を習得することができ、今後の観測に資するところが大きかった。

海底間音響測距装置については、共同利用の公募航海が不採択となったため宮城県沖での大深度・長距離試験の実施は見送った。一方、熊野灘の分岐断層沿いに設置した海底間音響測距装置の回収には成功し、960m と 720m の 2 基線の 208 日の連続観測記録を得た。同時にモニターした海水温補正等

を施した測距結果を図2に示す。1日の中でのばらつきは大きいものの、その平均の時系列推移をみると、1cm以上の距離の変化が生じれば検出可能であることがわかった。観測期間の最後のにあたる2009年3月22日頃(図の446日目)から1週間ほどにわたり、同海域で超低周波地震が発生したことが知られている。しかし、測距結果には目立った変化は見られなかったことから、検出精度の下限である1cmを超えるような分岐断層の活動は無かったものと判断される。また、観測を継続するため、同海域に装置を再設置した。

宮城県沖にベンチマークとして複数配置設置している海底圧力計は、予定通り年2回程度の頻度で入れ替えることができた。得られた過去2年間のデータを利用し時系列解析を行った。海域全体に共通する変動成分を抽出したところ、顕著な年収変化に加え、0.9hP/yrの沈降を示す経年変化が得られた(図3)。これは、陸上GPSデータから予測した沈降量と調和的である。詳しくは課題1202に述べた。

また、海底圧力データから海洋変動分を取り除き絶対的な地殻変動分を抽出するために、海洋シミュレーションの高度化に取り組んだ。前年度までの成果で、計算の分解能を細かくしていくと予測される圧力変動のエネルギーレベルが小さくなり、観測結果に近くなることを把握していた。今年度、さらに細かい1/30弧度の格子を用いてシミュレーションを行ったところ、実測との相関がかえって低下する傾向が見られた(図4)。これは、計算分解能が上がったことにより、順圧場を仮定した近似の影響が顕在化したためと思われる。現状で海底圧力データから海洋変動分を取り除く場合は、1/12弧度の格子のシミュレーションが最も適していることが分かった。

「 = = = = 平成23年度の成果 = = = = 」

「 課題番号：9100 」

3月11日に発生した東北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にも及び大規模な変位を捉えることができた(図5)。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、東西 $29.5 \pm 0.5\text{m}$ 、南北 $-11 \pm 0.5\text{m}$ 、上下 $3.9 \pm 1\text{m}$ の変位を捉えた。誤差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性のみ推定可能である(図6)。

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。原因調査のため、潜航調査による回収が望まれる。実際に、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。幸い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えたため、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、東西 $14 \pm 1\text{m}$ 、南北 $-5 \pm 1\text{m}$ 、上下 $3.5 \pm 2\text{m}$ 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)。

今後半年から1年程度の比較的大きな余効変動を捉えるため、また、一部応答の無くなったGJT4サ

イトを再構築するため、4月26日(台場) - 5月4日(函館)の日程で共同利用の淡青丸による航海を実施した。GJT4に3台の海底局を追加設置し、元の5台体制に戻した。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。この航海では、GJT3, GJT4それぞれ半日程度の定点観測を行い、通常の観測体制に戻すことにより、従来の測位精度で今後の余効変動を検出することを目的とするものである。

- (8)平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 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, Long-Term Stability of Acoustic Benchmarks Deployed on Thick Sediment for GPS/Acoustic Seafloor Positioning, 2011, in Dilek et al. (eds.) Modern Approaches in Solid Earth Sciences, Springer Science+Business Media B. V. 2011.
- Fujimoto, H., M. Kido, Y. Osada, 2010, Improvement in the observation system for the GPS/A seafloor positioning, Abstract G11A-0615 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.
- Osada, Y., M. Kido, and H. Fujimoto, 2010, Observation of seafloor crustal movement using the seafloor acoustic ranging on Kumano-nada, Abstract G41A-0799 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.
- Kido, M., Y. Osada, and H. Fujimoto, 2010, Temporal variation of oceanic sound speed structure affecting seafloor geodesy, Abstract G41A-0801 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.
- Inazu, D., R. Hino, and H. Fujimoto, 2010, Global, barotropic ocean bottom pressure modeling: Sensitivity to spatial resolution and boundary conditions, Abstract G51C-0673 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.
- Ito, Y., Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, N. Uchida, R. Hino, H. Fujimoto, S. Suzuki, H. Tsushima, R. Azuma, K. Suzuki, S. Koga, S. Ii., T. Tsuji, N. Nakayama, and J. Ashi, 2010, Ocean-bottom seismic and geodetic observations of transient slow slip events in the Japan Trench, Eos Trans. AGU, 91(26), West. Pac. Geophys. Meet. Suppl., Abstract S53C-03.
- 木戸元之・藤本博己・長田幸仁, 2011, 定点観測による海底測位の高精度化について, 第 22 回海洋工学シンポジウム, 予稿集, OES22-039.
- 長田幸仁・木戸元之・藤本博己, 2011, 海底音響測距の開発, 第 22 回海洋工学シンポジウム, 予稿集, OES22-106.
- Osada, Y., M. Kido, H. Fujimoto, 2010, A long-term seafloor experiment using seafloor acoustic ranging system, G-COE Symposium 2010 Dynamic Earth and Heterogeneous Structure, Sendai, P2-21.

(9)平成 23 年度実施計画の概要 :

係留ブイの不具合を改良し、音響観測まで含めた曳航ブイとの同時観測を実施する。その際得られるデータをもとに、海中音速場の不均質の推定を行い、海洋物理シミュレーションとの比較を通して、測位精度の向上につなげる。海底音響測距については、宮城県沖での観測が共同利用船の都合上困難なことから、熊野灘に再設置した海底音響測距装置の回収を行い、通年観測で得られるデータから測距の精度を再吟味し、観測期間中の変動の検出を試みる。一方、宮城県沖での海底圧力観測は、ベンチマークの入れ替えを継続実施しデータの蓄積に努め、ゆっくり地震などに起因する短期的な相対変動の検出に備えるとともに、海洋シミュレーションによる海洋変動成分除去と併せて、絶対的な上下変動の検出の可能性を検討する。

(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

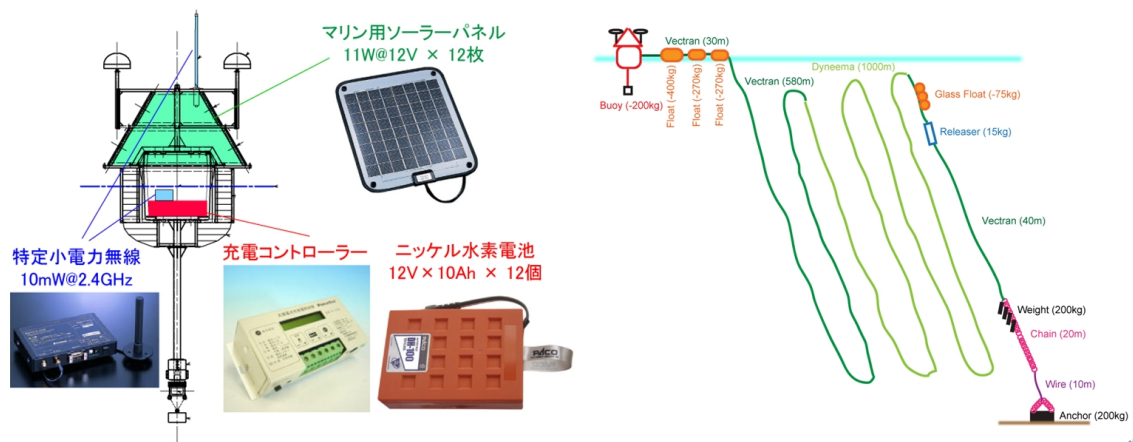


図 1

開発した係留ブイの外形と内部に搭載した電子機器（左）および係留系（右）の模式図

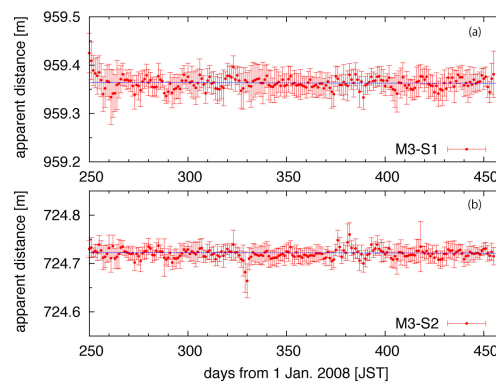


図 2

熊野灘分岐断層で得られた基線長の時系列データ

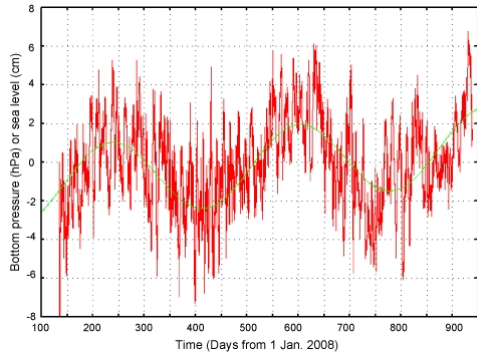


図3
宮城県沖の海底圧力変動の共通成分の年収変化と経年変化

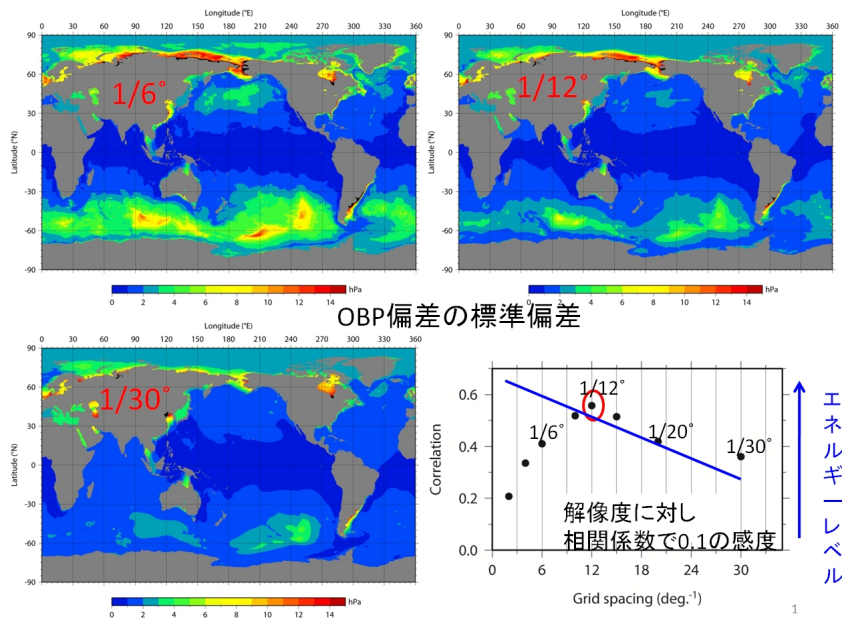


図4
海洋変動数値シミュレーションで得られた海底圧力変動の標準偏差の計算分解能の依存性

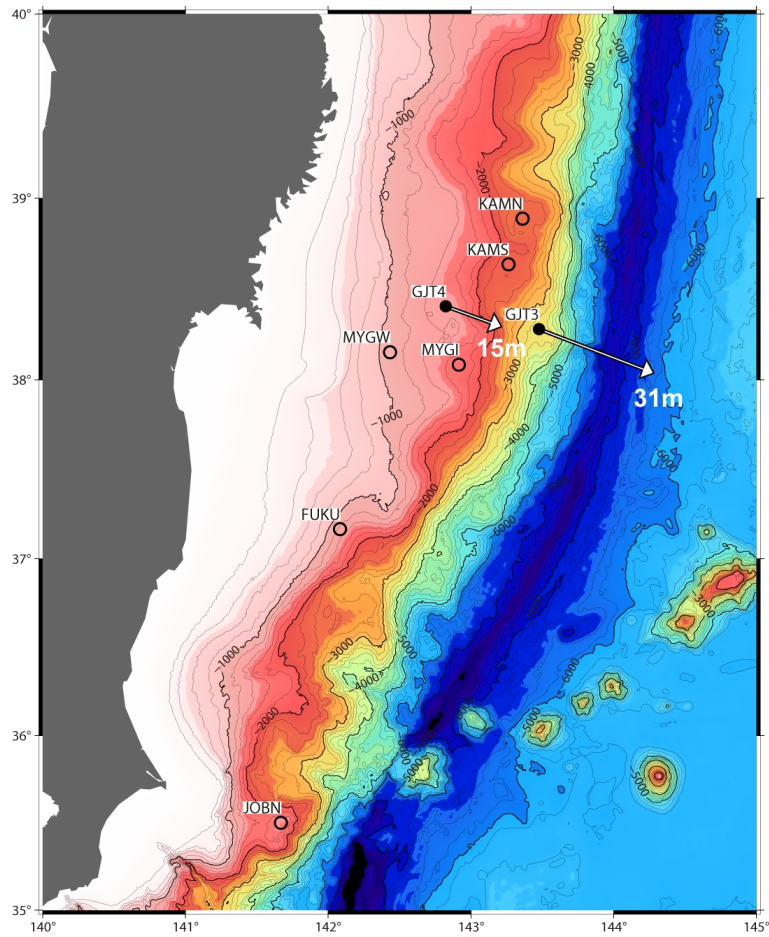


図5
観測点配置と地震による変位の観測結果

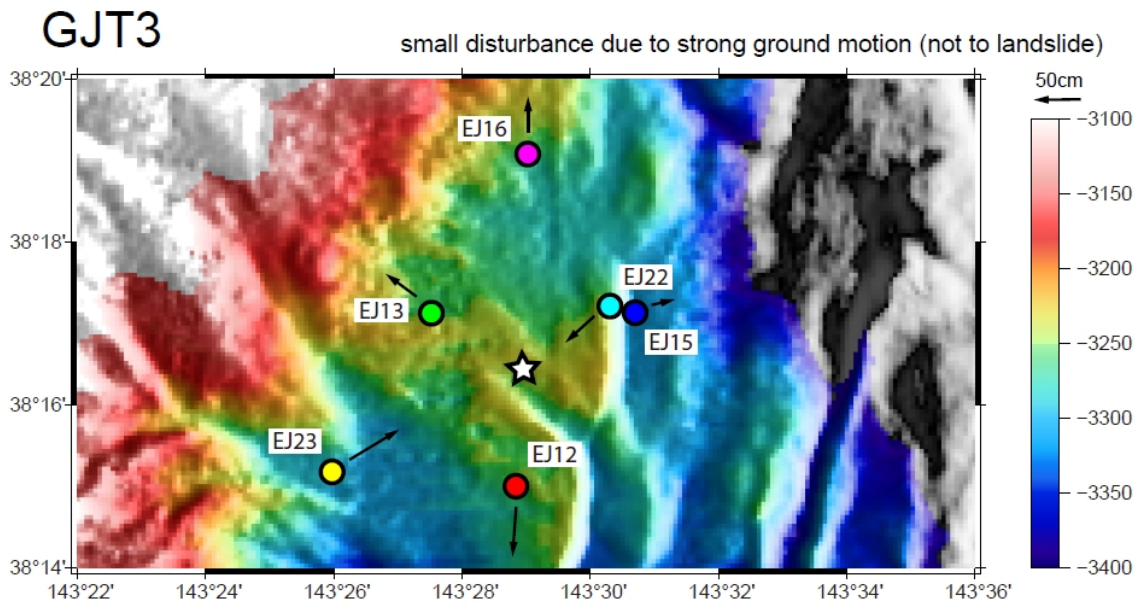


図6
GJT3の海底局の強振動による個々の動き