

3. 1. 2 宮城県沖における海底地震繰り返し観測

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2 ヶ年の年次実施業務の要約
 - 1) 平成 24 年度
 - 2) 平成 25 年度

(2) 平成 25 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献

3. 1 海底自然地震観測等

3. 1. 2 宮城県沖における海底地震繰り返し観測

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 宮城県沖における海底地震繰り返し観測

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人 東北大学災害科学国際研究所	教授	日野 亮太
国立大学法人 東北大学大学院理学研究科	助教	伊藤 喜宏
国立大学法人 東北大学大学院理学研究科	助教	太田 雄策
国立大学法人 東北大学災害科学国際研究所	助教	飯沼 卓史
国立大学法人 東北大学大学院理学研究科	技術職員	平原 聡
国立大学法人 東北大学大学院理学研究科	技術職員	中山 貴史
国立大学法人 東北大学大学院理学研究科	技術職員	鈴木 秀市
国立大学法人 東北大学大学院理学研究科	技術職員	出町 知嗣
国立大学法人 東北大学大学院理学研究科	技術職員	海田 俊輝

(c) 業務の目的

宮城県沖では、東北地方太平洋沖地震の発生前後でプレート境界近傍における中小地震活動の活動度が大きく変化していることが知られている。この付近での地震時すべりが非常に大きかったことを考えると、この現象の理解は超巨大地震の発生過程を理解する上で重要な手がかりを与えるものと期待される。地震直後に大きな変化を示した地震活動は、断層に沿った余効すべりの進展や断層面での固着の回復の影響をうけて、地震発生前の状態に回帰していく可能性がある。宮城県沖においては、平成 20 年度に開始した「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」の一環として「切迫度の高い震源域の先行調査観測」（以下、「先行調査観測」）が行われ、海底地震観測及び水圧観測が行われてきた。そこで、本課題では、こうした宮城県沖における海底観測を継続し、超巨大地震発生後の中期的な地震活動の時空間変化を捉えることにより、東北地方太平洋沖における中・長期的な地震発生確率の評価に資することを目的とする。さらに、平成 23 年度までに蓄積された観測データとあわせることにより、本震の破壊の開始点や大きな地震時すべりを伴った宮城県沖における地震発生準備～直前～地震時～回復のそれぞれの時期の地震活動の特徴を把握とその変化の原因解明を通して、超巨大地震発生メカニズムの理解と周辺域における同様な地震の発生ポテンシャル評価に資することもまた、本課題の目的である。海底水圧観測は、こうした地震活動の時空間変化の要因となるプレート間固着・すべり状態の時空間変化を把握するために必要で、地震観測網を展開する宮城県沖を中心にやや広域に展開することにより、プレート間固着・すべり状態の変動に起因する地殻変動の検出を試みる。

(d) 2カ年の年次実施業務の要約

1) 平成 24 年度 :

宮城県沖の地震時すべりが極大であった領域を中心として、20 地点に長期観測型の自己浮上式海底地震計（以下、OBS）を設置して、先行調査観測以来この領域において実施されたきた長期繰り返し海底地震観測を、観測網を拡張しつつ継承・継続することに着手した。また、20 地点に長期観測型の自己浮上式海底水圧計（以下、OBP）を設置して、宮城県沖周辺海域における海底地殻変動連続観測の発展的継続に着手した。東北地方太平洋沖地震の地震時すべりが海溝近傍にまで及んだことから、海溝近傍やさらにその海側の水深 7,000m 以深の領域での観測開始が急務であり、超深海域への設置に対応する観測装置を用いた試験観測に着手した。さらに、時間の経過に伴って減衰する余効変動の検知のためには、2 年間以上の長期間の連続観測の実現が必要であることから、超長期観測用の装置の開発と試験観測にも着手した。

2) 平成 25 年度 :

平成 24 年度に宮城県沖に設置した OBS および OBP を回収し、そのデータ処理・解析を進めた。こうした海底観測で得られたデータの処理解析を進め、平成 23 年度までの先行調査観測によって得られた観測データとあわせることにより、地震発生後のプレート間固着・すべり状態の時空間変化を反映した海底上下変動の実態の把握を試みた。その結果、本震時のすべりが極大であった宮城県沖の海底では継続して余効変動による沈降が進行しているが、その大きさは本震発生からの時間経過とともに急速に小さくなっていることが明らかとなった。

(2) 平成 25 年度の成果

(a) 業務の要約

宮城県沖において、OBS を用いた海底地震観測ならびに OBP を用いた海底水圧観測を実施した。気象庁地震火山部及び仙台管区気象台の協力を得て、気象庁観測船「啓風丸」および「凌風丸」の観測航海（5 月、11 月）により、平成 24 年度に宮城県沖に設置した OBS（図 1）および OBP（図 2）の回収を行なった。回収した OBS については、回収後整備作業を行った後、機材の管理者である海洋研究開発機構に返還した。OBS で収録された地震波形記録については時刻補正と、全海底観測点ならびに陸上観測点で得られた地震波形記録のマージ作業まで行った。また、OBP で得られた海底圧力データについては、時刻補正の後、観測データに含まれる海洋潮汐ならびに非潮汐性の圧力変動成分を、Inazu *et al.* (2012) の手法により推定し、それらの除去を行った。先行調査研究で得られたものを含め、海底圧力の連続観測データの解析により、観測記録に含まれる圧力センサーの機器特性に起因する長期ドリフト成分の推定手法の検討を行い、観測データから東北地方太平洋沖地震発生後の余効変動による海底上下変動を抽出することを試みた。

(b) 業務の成果

海底地震観測は、気象庁観測船「啓風丸」KS13-04 次航海（5月14日～5月27日）および「凌風丸」KR13-09 次航海（11月9日～11月22日）において、平成24年度に設置したOBSの回収を行った。5月航海では図1に赤丸で示した観測点、11月航海では青丸で示した観測点での回収を実施した。回収したOBSは所定の回収後整備作業の後、機材の管理者である海洋研究開発機構に返還した。

OBSで収録された地震波形記録はOBSごとに独立した基準時計による時刻管理により収録された連続記録であるので、各OBSの波形記録に対して、設置前・回収後に日本標準時刻と時刻差を計測した記録をもとに時刻補正を施した。また、地震波到達時刻の検出作業においては全海底観測点ならびに陸上観測点で得られた地震波形記録を並べて表示する必要があるため、時刻補正後の波形記録のマージ作業を行った。なお、本業務による観測期間には、先行調査観測で設置・回収されたOBSの観測期間も含まれるため、これらのOBSの波形記録も併せてマージして、検出処理の準備を行った。

このような作業で得られた波形記録の品質を確認する目的を兼ねて、一部の地震に対して検出作業を行った。気象庁一元化処理によって震源が決定されている地震のうち2012年4月から2013年7月までに発生したM3以上のものの検出作業を行い、3,300個あまりの地震について予察的震源を決定した（図3、黒点）。検出の対象となった地震（図3中灰点で示したもの）でも震源の再決定ができていないものが含まれる。その主たる原因は、震央距離が離れた観測点では波形の明瞭度が非常に低いことにあると考えられるが、継続して検討を行う必要がある。OBS観測網下での地震活動が低調であることから、宮城県沖における地震活動の特徴の詳細を本観測から明らかにするためには、今後さらに小さい地震（図3中赤点）の検出作業を進める必要がある。

OBPにより観測された海底圧力の時系列を図4と図5に示す。海底で観測された圧力変動から海洋潮汐と非潮汐性の海洋変動による変動成分を除去した後、日平均をとったものの観測期間中の変動である。これらの時系列には、上述のように海洋変動に起因する変動は除去したものの、圧力センサーの機器特性による見かけの圧力変動の影響がまだ残っていて、このままでは、地殻変動に起因する海底の上下変動として解釈することはできない。本調査観測で得られた海底圧力時系列をみると、いずれの観測点においても10hPa/年程度のゆっくりとした圧力変動が認められる。同程度の圧力変動は、おなじ宮城県沖海域において実施された先行調査観測によって、東北地方太平洋地震が発生する以前に得られた海底圧力観測データにも認められる。東北地方太平洋沖地震の発生以前は、この海域ではプレート間固着の影響による海底上下変動があったと考えられるが、その変動速度は最大でも1cm/年程度で、圧力変動レートに換算すると1hPa/年程度となり、観測データに認められる圧力変動より1桁程度小さい。従って、この程度の変化率の長期的な圧力変動は、実際の海底上下変動によるものではなく、圧力センサーの機器特性による長期ドリフトと解釈される。逆に言えば、東北地方太平洋沖地震発生から1年以上が経過して開始した時点では、余効変動に起因する10cm/年を超えるような大規模な変動が宮城県沖周辺では発生していないことを、本業務による海底圧力観測の結果から結論することができる。

実験室レベルにあっても、長期間にわたって一定の圧力を加圧し続けることの困難さから、圧力センサーの長期ドリフト特性に関する理解は進んでいない。海底上下変動がなけ

れば、深海底での水圧は長期的に見れば極めて安定で、実観測で得られた海底圧力の長期連続観測データの方が、センサーの特性の理解に役立つ可能性が高い。実際に観測される圧力データの長期的なドリフトが、センサーの機器特性に起因するのだとすれば、ドリフトの現れ方は、個別のセンサーに固有であって、しかも再現性があることが期待される。先行調査観測の期間から継続してきた繰り返し観測では、同一のセンサーを使用して異なる時期に海底圧力を観測したデータセットが得られていて、センサーの機器特性を評価する上で重要な情報を与える。図6は、宮城県沖でこれまでに実施された繰り返し海底圧力観測で得られたデータから、東北地方太平洋沖地震以前に、同一のセンサーで観測された海底圧力の長期変動を選びだし比較して示したものである。観測地点の水深が異なるため絶対値は観測データごとに大きく異なるが、圧力の経時的な変化パターンと変化率は、異なる観測期間であっても同一センサーを用いた観測時系列ではほぼ一致しており、圧力センサーのドリフト特性に高い再現性があることが示唆される。

しかし、東北地方太平洋沖地震の発生後に得られたデータを、それ以前の観測データと比べると、変化率の再現性が低下している。同一センサーで捉えられた圧力変化の時系列について、地震発生以前の観測で得られたものと地震発生後の観測で得られたものとを比較すると、地震後の観測での圧力の増加率の方がわずかに大きくなっているように見られる(図7)。とくに、地震発生直後の2011年に観測を開始したデータでは、圧力増加率が大きくなっている傾向をみてとることができるから、こうした圧力増加傾向は、余効変動による真の海底圧力の増加(海底の沈降)を捉えたものである可能性を指摘することができる。

そこで、東北地方太平洋沖地震発生前の海底圧力の時間変化から図5に記録を示したセンサーについてのドリフト特性を推定し、それを地震後の観測データから差し引くことによって、余効変動による海底圧力変動成分の抽出を試みた。Watts and Kontoyiannis(1990)によれば、センサーのドリフト成分によるみかけの圧力の時間 t による変化は、

$$f(t) = at + \exp\{b(t - t_0)\} \quad (1)$$

で表されるとされている。式(1)の a と b は定数であるが、ここでは、センサーごとに固有のドリフト特性があって、それが異なる観測で再現性があると仮定しているので、 a と b は各センサーに固有の値であるとする。 t_0 は観測の開始時である。

式(1)を地震前の観測データに当てはめることにより、ドリフト特性に起因する圧力変化が記述できるものとする。地震後に観測を開始した時系列から、このドリフト成分を差し引くことにより、観測データからドリフト成分を除去する。図8は、こうした処理が可能であった4つのセンサーを用いた地震後での海底圧力観測データをもとに、地殻変動に起因する圧力変化成分を求め、そこから海底上下変動を求めたものである。圧力から上下変動への換算は、1 cm の海底上下変動が 1 hPa の水圧変化に対応するものとして行った。

P03 と P06 の2観測点では、東北地方太平洋沖地震の発生時期を挟んだ連続時系列が得られていて、地震直後の非常に大きな変動速度の余効変動が観測されている。図中の破線は、地震直後の変動時系列に対して、多くの地震後の余効変動に良く適合すると考えられている対数観測を当てはめた結果である。東北地方太平洋沖地震発生から1年以上経過す

ると、余効変動による海底上下変動速度は数 cm/年程度の大きさとなってしまう、圧力センサーの長期ドリフトによる変動より小さくなる。上記のような試みによって、センサードリフト成分を除去すると、残された圧力変化には、わずかながら海底沈降する傾向が残る。ただし、その沈降レートは、地震発生後数ヶ月間の時系列に当てはめた対数関数と比べると、やや小さい傾向にあることがわかる。しかし、非潮汐性の海洋変動の補正・除去が不十分なことに起因すると考えられる、数 hPa 程度の振幅で 1～2 ヶ月程度の周期をもつ圧力変動成分も見られることから、余効変動の大きさを定量的に読み取ることは困難で、ドリフト成分の低減とともに、海洋変動成分の除去手法についてもさらなる改善が必要である。また、地震直後の観測データがない、KAMN および MYGI 観測点では、顕著な上下変動は検知することはできなかった。

図 9 に東北地方太平洋沖地震発生直後の海底水圧観測データから求められた宮城県沖海域における海底上下変動の時系列を示す。これらの観測点では、地震発生以前から観測が継続されていたため、地震発生前の圧力変化に対して (1) 式をあてはめることによりセンサーのドリフト特性を求めることができる。地震後のデータからその影響を差し引くことにより、センサー特性の影響のない真の海底上下変動を抽出することができる。この図に示されるように、宮城県沖のほとんどの観測点で、数十 cm/年を超える非常に速いレートでの余効変動が観測されていたことが分かる。こうした地震発生直後に観測された余効変動を、本業務で実施した海底水圧観測の結果と比較すると、宮城県沖では現在も継続して沈降が進行しているものの、地震直後から比べるとその変動速度は大幅に小さくなっていると結論される。

図 4 および 5 に示した時系列では、P02、P03、P06、GFK の観測点で、数日間に 20hPa 以上の圧力増加の変動が観測されている。こうした圧力変化が、プレート境界断層でのすべりに起因する地殻変動であるとすると、非常に大きなすべり量を必要とするが、その場合には広域で同時に観測されるはずである。現実には、単一の地点で観測されているだけなので、海底直下を含むごく浅部で発生している変動に起因するものと解釈される。こうした圧力変化が生じている期間中の圧力の時間変化の様子を拡大したものを図 10 に示す。こうした短時間での大きな変動の要因としては、観測点直近の海底下ごく浅部で発生した地震の断層運動、もしくは強震動による海底堆積層の不安定性による変形が挙げられるが、こうした圧力変化イベントの発生中、地震動などによる顕著な短周期の圧力変動は認められず、地震発生に同期した変動ではないことが分かった。同様な変動は、東北地方太平洋沖地震の発生以前には一度も観測されたことはなく、現時点ではこうした変動の原因の特定には至っていない。

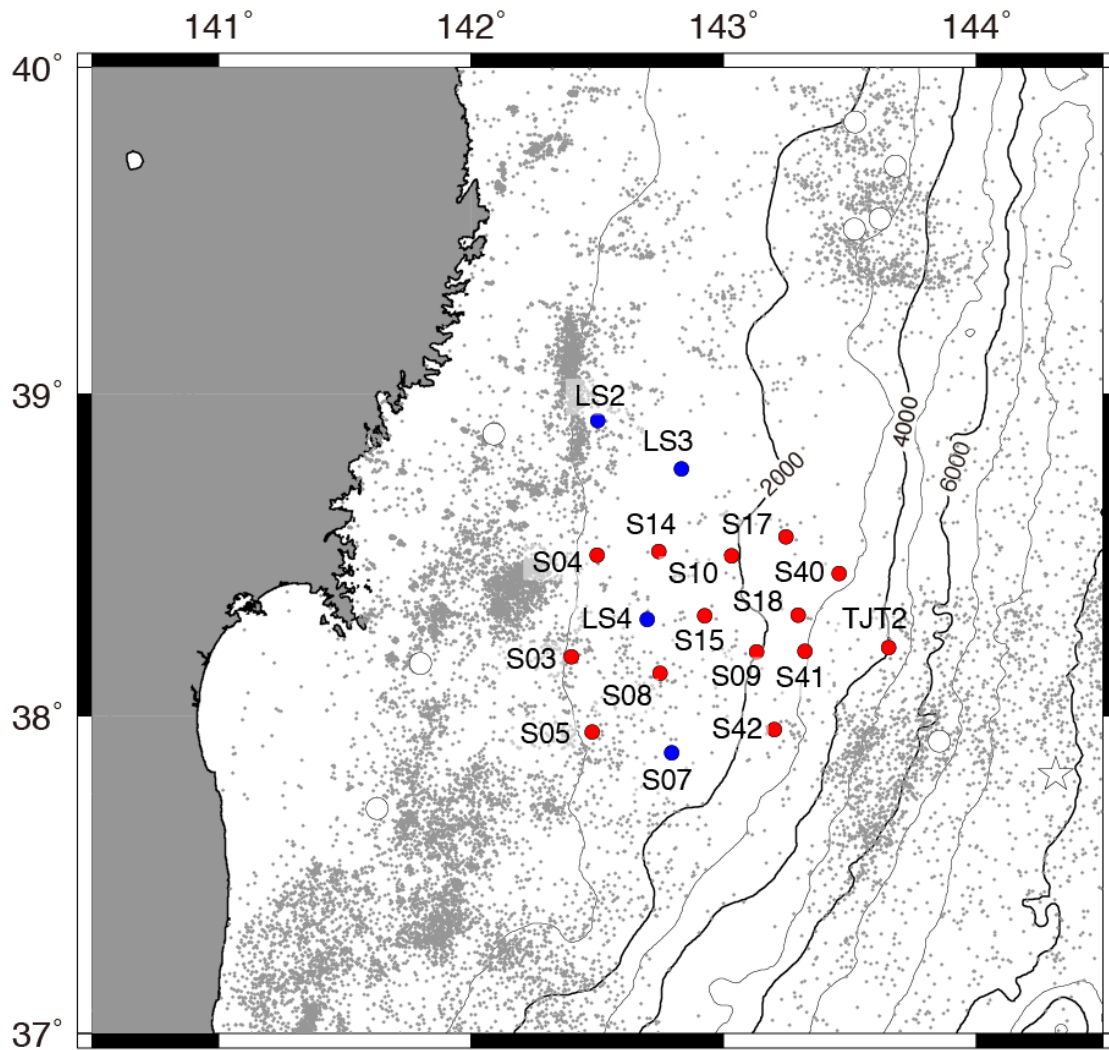


図1 海底地震計(OBS)の観測点配置。赤丸は5月、青丸は11月航海でOBSの回収を行った観測点。

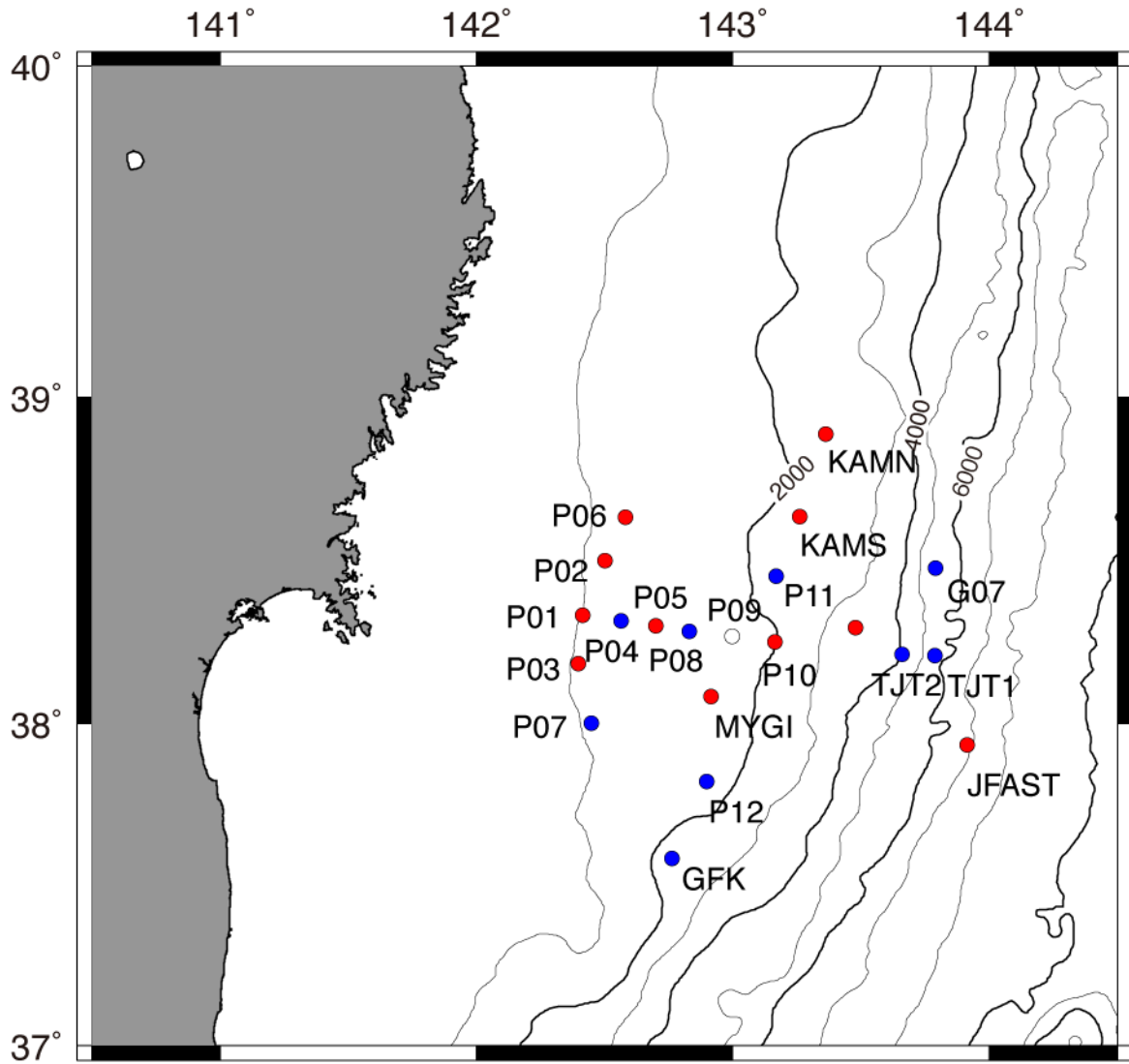


図2 海底水圧計(OBP)の観測点配置。赤丸は5月、青丸は11月航海でOBSの回収を行った観測点。白丸の観測点では先行調査観測で観測を終了した観測点。

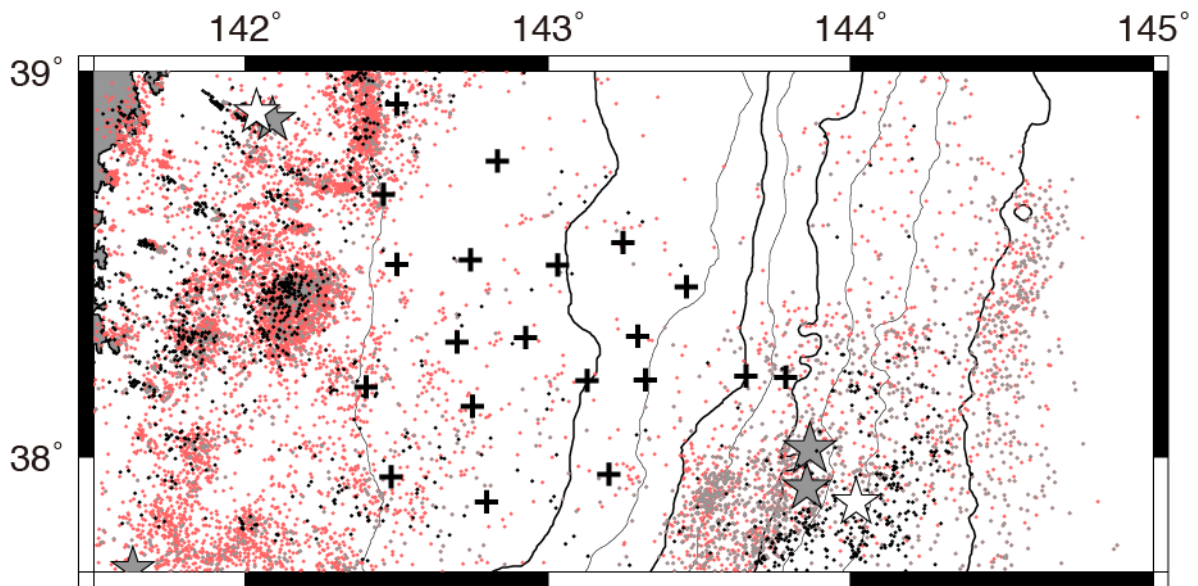


図3 OBSデータを用いて再決定した宮城県沖の震央分布（2012年4月1日～2013年7月31日）。灰色・赤点は、気象庁一元化処理による震央（灰色はM3以上、赤はM3未満）。黒点はOBSデータを用いて再決定されたもの。星印はM6以上の地震（灰色は一元化処理、白が再決定）。

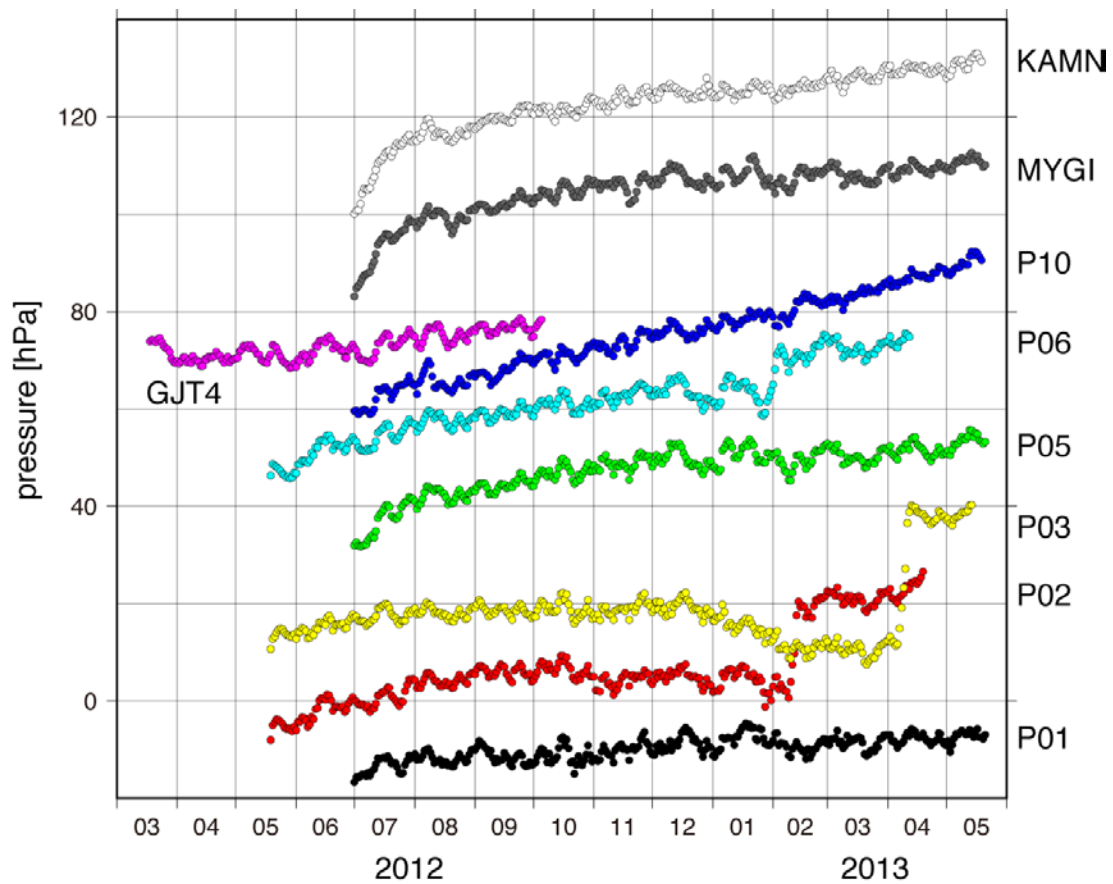


図4 5月航海で回収したOBPで得られた海底圧力の時系列。1日値を示す。

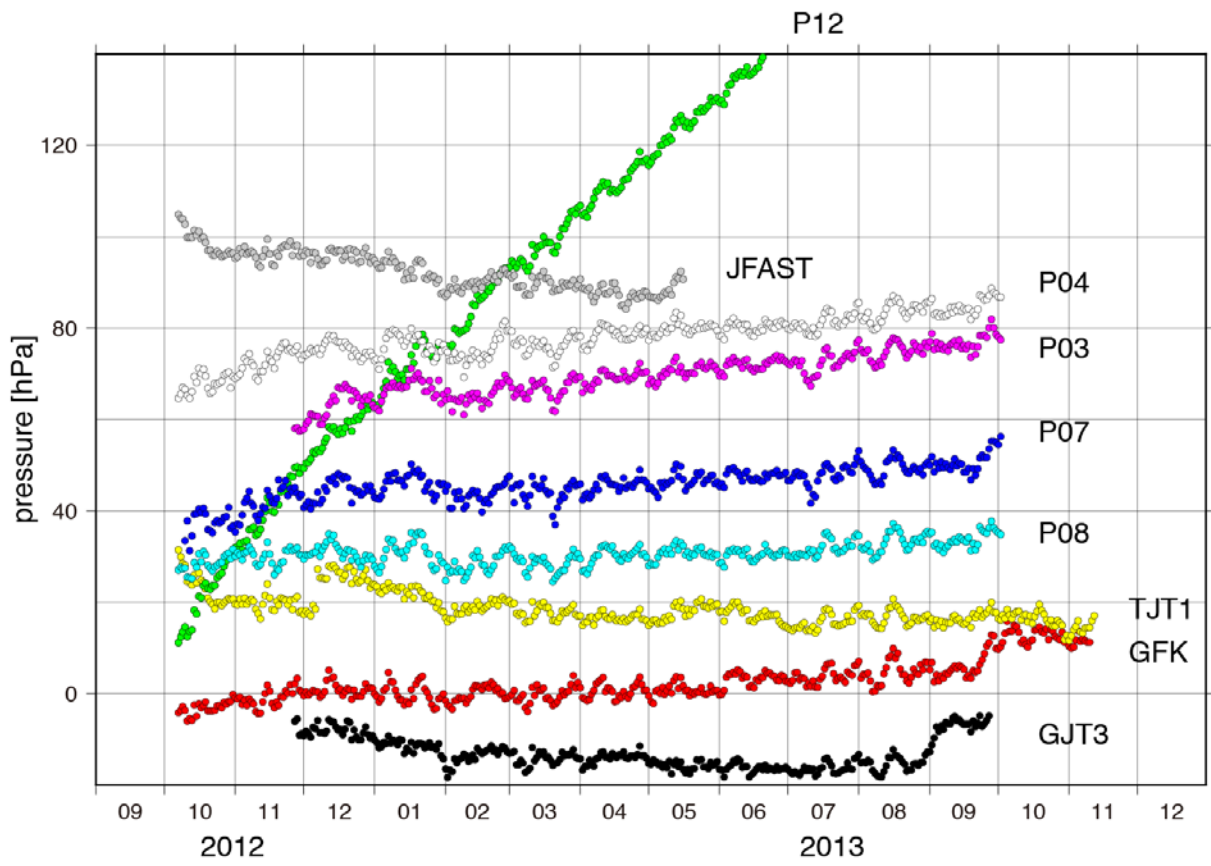


図5 11月航海で回収した OBP で得られた海底圧力の時系列。

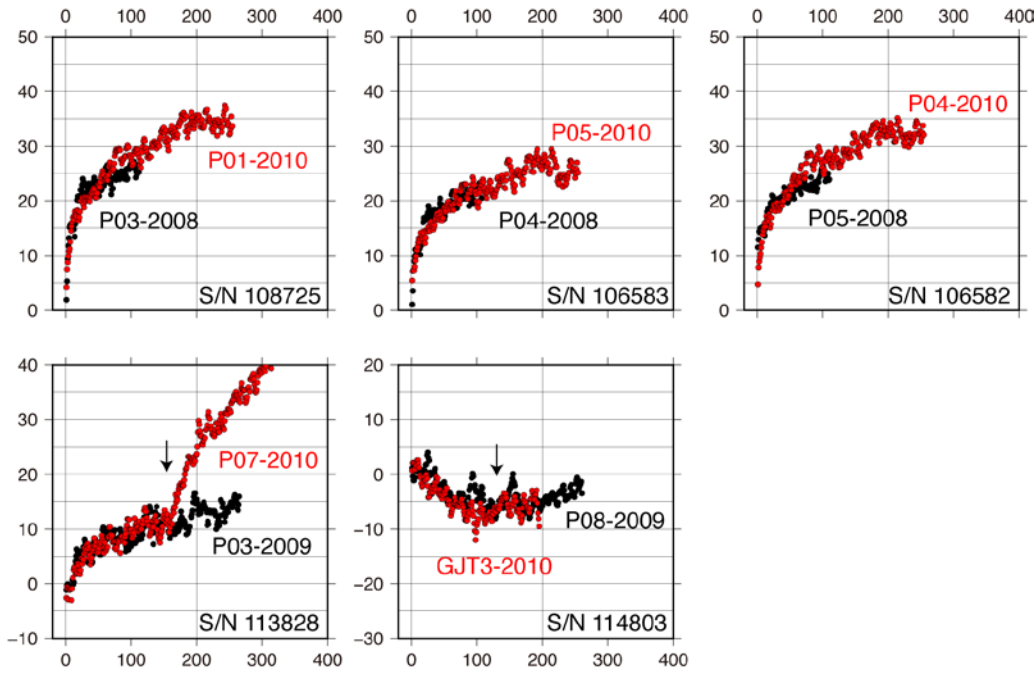


図6 先行調査観測で東北地方太平洋沖地震発生以前に観測された海底圧力の長期変化をセンサーごとにまとめたもの。横軸は観測開始後の通算日。「観測点-観測開始年」でインデックスを振ってある。P07-2010 および GJT3-2010 の時系列では矢印のところで東北地方太平洋沖地震が発生した。

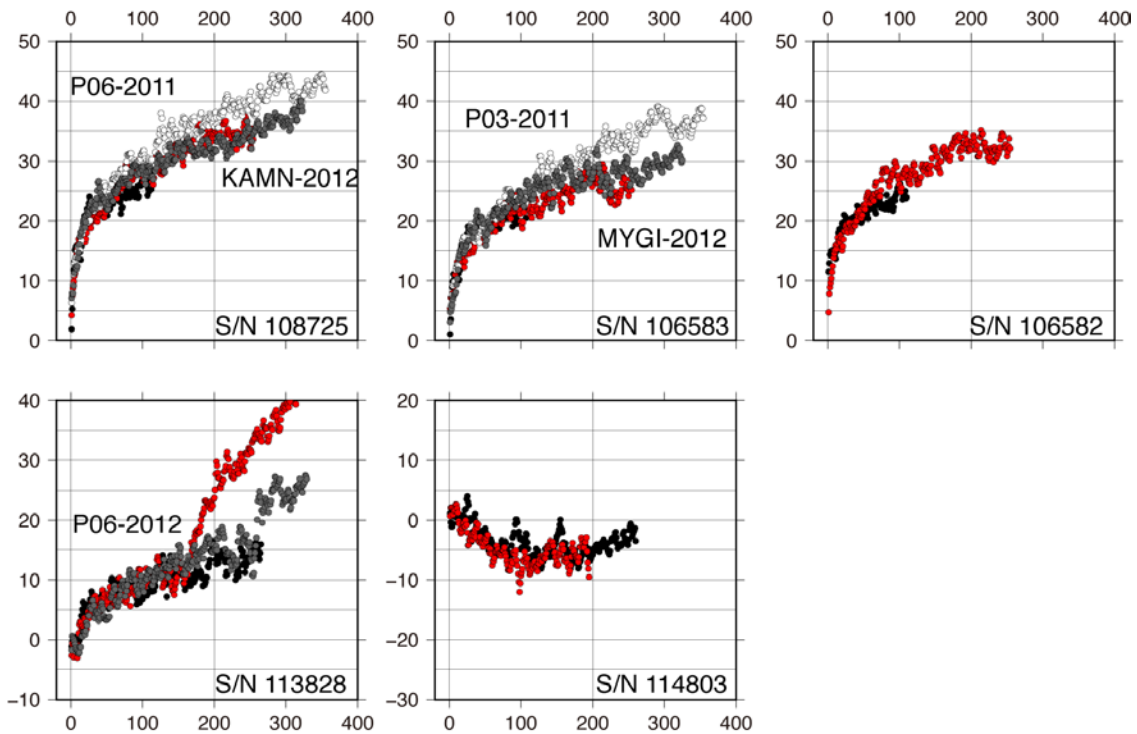


図7 図6の時系列に、同じセンサーで東北地方太平洋沖地震後に観測されたデータを重ねて示したもの。時系列のインデックスの見方は、図6と同じ。S/N106582とS/N114803のセンサーは地震後の観測ではデータが取得されていない。

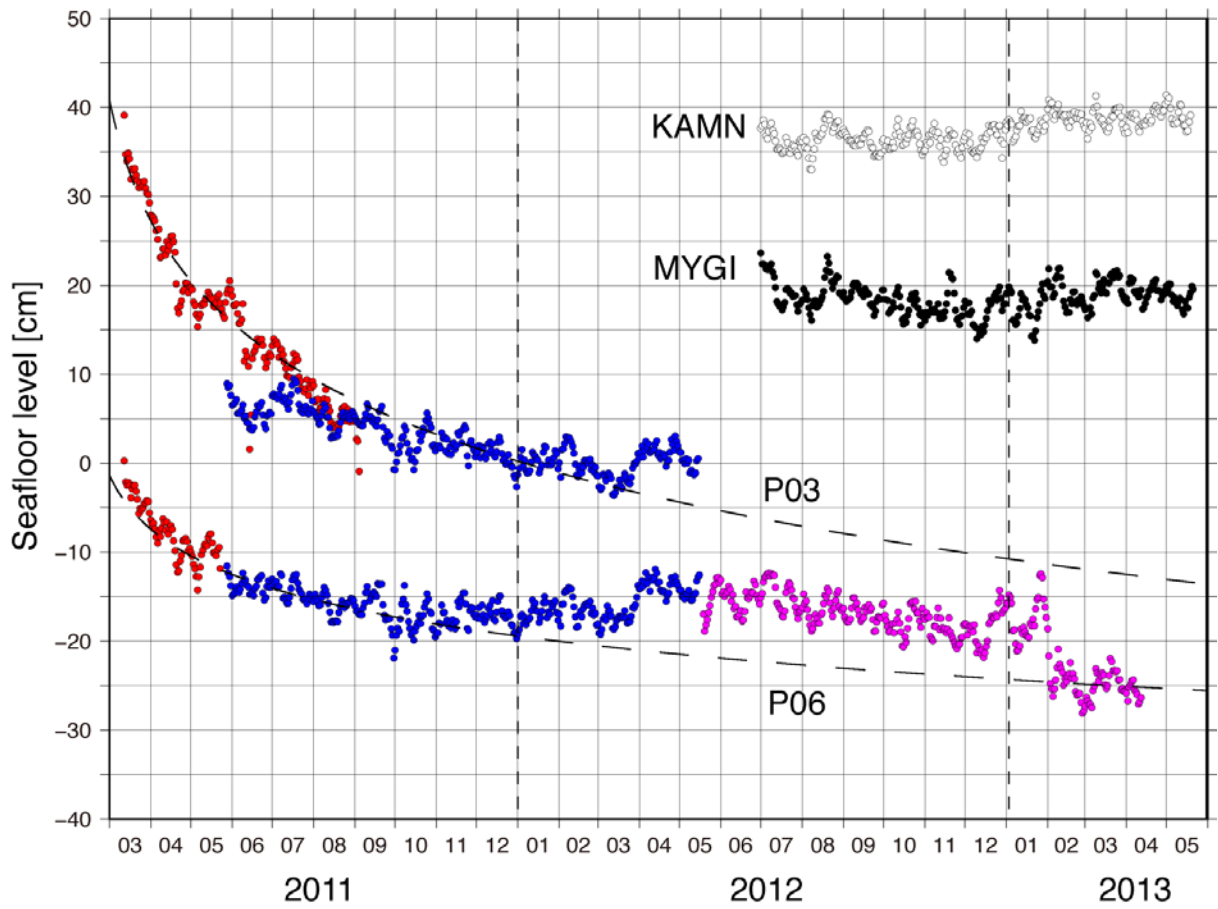


図8 東北地方太平洋沖地震後の海底圧力変化から求めた海底上下変動の時間変化。地震後、P03では1回、P06の観測点では2回観測機材の入れ替えがあった。観測に使用したセンサーのドリフト特性による圧力変動成分を除去した後の、各観測期間の時系列を色分けして表示した。P03とP06の時系列に添えられた破線は、地震発生直後の圧力変化に時定数20日の対数関数を当てはめたもの。

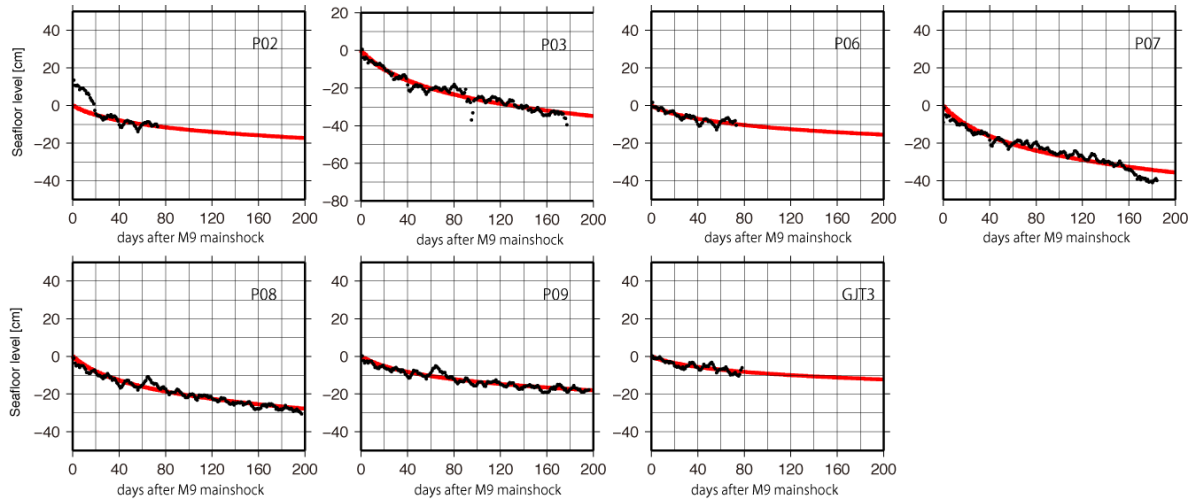


図9 東北地方太平洋沖地震発生直後に宮城県沖で観測された海底上下変動。赤線は観測データに時定数 20 日の対数関数を当てはめたもの。

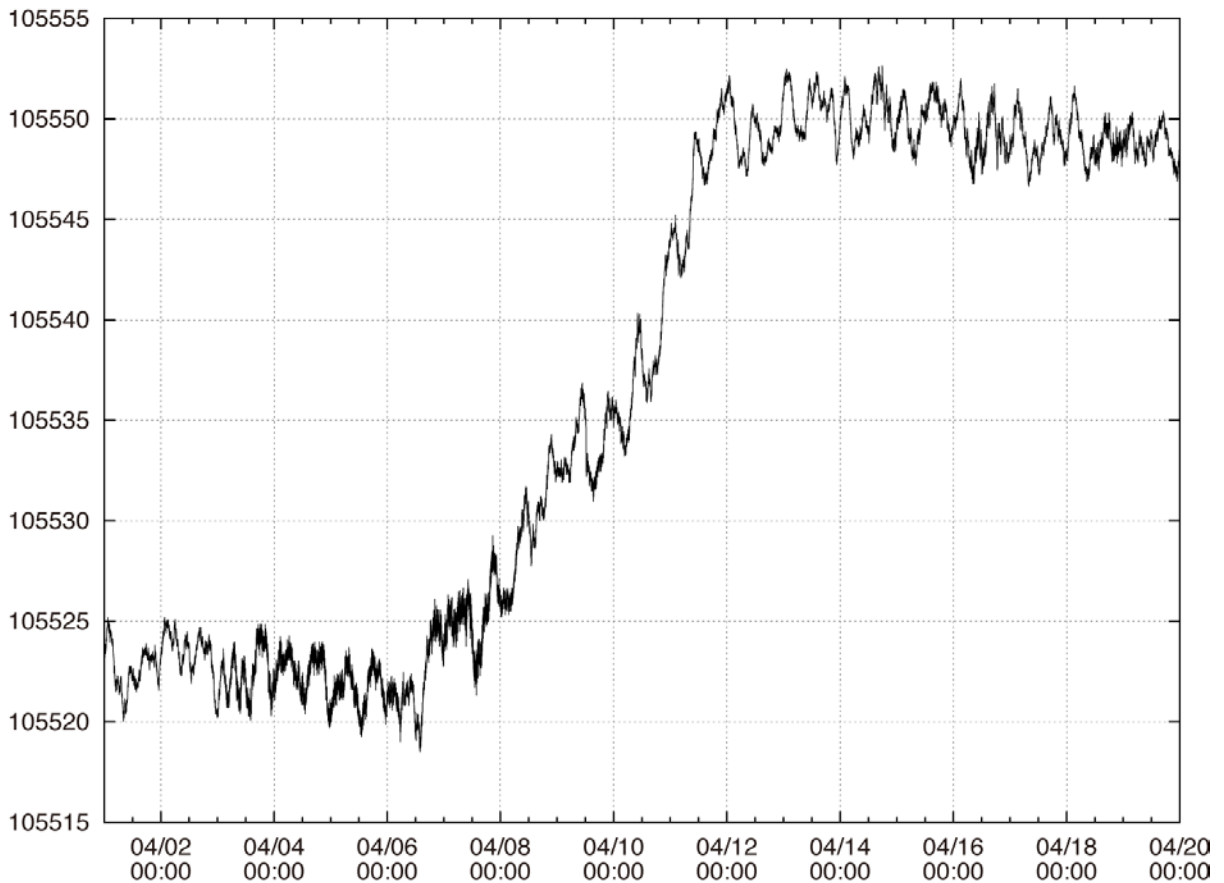


図10 観測点 P03 において4月に発生した短期的圧力変動。海洋潮汐・非潮汐性変動成分を除去した後の1分値を示す。

(d) 結論ならびに今後の課題

東北地方太平洋沖地震の発生前後でプレート境界近傍における地震活動度が大きく変化した宮城県沖における、プレート境界及び上盤・下盤内部での余震活動の時空間的な変動とプレート間すべりの時空間的な変動をそれぞれ明らかにすることを目的として、同海域においてOBSとOBPからなる海底観測網による海底地震・地殻変動観測を1年間にわたって実施した。こうしたデータを活用することにより、本震発生後1～2年の間の宮城県沖における余効変動の進行状況の把握に努めた。海底圧力観測の連続記録から、宮城県沖では継続して沈降が進行しているものの、地震直後から比べるとその変動速度は大幅に小さくなっていることが明らかとなった。また、日本海溝近傍の深海域での海底圧力連続観測に着手したが、継続・安定して観測データの取得が達成され、深海域での観測が実現可能であることが示されたことも、重要な成果である。平成25年度のデータ解析・検討の結果、同一のセンサーを用いた繰り返し観測のデータからセンサー特性を把握できる可能性が示された。本業務で得られた、東北地方太平洋沖地震発生直後の貴重なデータを有効に活用するためにも、本業務で使用したセンサーを用いた海底観測の継続が重要である。

(e) 引用文献

- Inazu, D., R. Hino, and H. Fujimoto, A global barotropic ocean model driven by synoptic atmospheric disturbances for detecting seafloor vertical displacements from in situ ocean bottom pressure measurements, *Mar. Geophys. Res.*, doi:10.1007/s11001-012-9151-7, 2012.
- Watts D. R. and H. Kontoyiannis, Deep-ocean bottom pressure measurements: Drift removal and performance, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 296-306, 1990.