

3. 1. 3 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 24 年度の成果

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

3. 1 海底自然地震観測等

3. 1. 3 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	東北大学大学院理学研究科	准教授	日野 亮太
国立大学法人	東北大学災害科学国際研究所	教授	藤本 博己
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
国立大学法人	東北大学大学院理学研究科	研究補佐員	川島 ふみ

(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することにより、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を目的とする。この過程の解明を通して、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。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いて、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し、その変化の原因解明を通して、超巨大地震発生の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。海底水圧観測は、こうした地震活動の時空間的变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 ヶ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、この領域における長期繰り返し海底地震観測の発展的継続に着手した。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 年度に宮城県沖の 20 地点に設置した OBS を回収し、そのデータ処理・解析を進めることにより宮城県沖のプレート境界並びに海陸のプレート内で発生している地震の震源分布の詳細を明らかにする。また、平成 24 年度に宮城県沖周辺海域の 20 地点に設置した OBP を回収し、これらの観測点における海底上下変動の推移から東北地方太平洋沖地震発生後の余効地殻変動の実態を明らかにする。これらの観測の成果を、平成 23 年度までに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、地震発生準備～直前～地震時～回復のそれぞれの時期の地震活動とプレート間固着・すべり状態の時空間変化の特徴を把握する。

(2) 平成 24 年度の成果

(a) 業務の要約

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「凌風丸」の観測航海（5 月、6 月、10 月）により、宮城県沖の 20 地点において OBS 設置を行なった。うち 15 地点は先行調査観測による観測点を継承したものである。残りの 5 地点は、東北地方太平洋沖地震で日本海溝側で大きなすべりがあったことを踏まえて、既存観測網より海溝側とした。同じ航海で OBP の設置も行なった。先行調査観測での 10 観測点に加えて、その海溝側及び南北側の 10 観測点を増設することで、OBP 観測網を拡大した。増設観測点のうちの 1 地点は、日本海溝の海溝軸近くの地点であり、ここで超深海対応の OBP の試験観測を行った。第 1 回目の試験観測は 5 月から 10 月にかけて実施し、超深海環境で正常に海底水圧の長期連続記録が取得可能であることが確認された。さらに、超長期観測対応の OBP に使用する省電力型データロガーの試作と、それによる試験観測を 2 月に実施し、設計通りの性能で動作することを確認できた。

(b) 業務の成果

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。平成 24 年度は、5 月、6 月、11 月に航海を実施し、OBS と OBP とともに 20 観測点からなる観測網を構築した。OBS 及び OBP の設置作業は、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「凌風丸」の航海により実施した。各観測航海における作業概要を、表 1～6 に示した。また、各航海での OBP 及び OBS の配置地点の配置を図 1～4 に示す。

OBS 設置点のうち 15 点では、先行調査観測により平成 23 年度に OBS が設置されており、この OBS を回収した後（先行調査観測の作業として実施）、同一地点に本事業のために準備した OBS の設置を行った。残りの 5 地点は、東北地方太平洋沖地震に伴う地震時すべりが大きく、その後の余震活動（その多くがプレート内地震：Obana *et al.*, 2012）が活発な海溝軸近くの領域の新設観測点とした。

OBP も OBS と同様に、先行調査観測により宮城県沖の 10 地点に設置されており、これらの地点で回収・再設置を行うことにより海底水圧観測の継続を図った。さらに、海溝軸近傍に観測点増設したほか、この海域に展開されている GPS/音響結合式海底地殻変動 (GPS/A) 観測の海底局（海上保安庁ならびに東北大学が管理）の設置地点の近傍にも観測点を新設した。海上保安庁（2012）によれば、東北地方太平洋沖地震による余効変動が宮城県沖周辺での GPS/A 観測により捉えられている。このことから、上下変動のみではあるが連続記録を得ることができる OBP 観測を GPS/A の海底局の近くに設置して並行観測を行うことは、余効変動の実態解明の上で有効と期待される。

超深海型の OBP の試験観測は、平成 24 年度に統合国際深海掘削計画によりプレート境界面に至るまでの掘削地点近くで実施した。掘削地点の海底の水深はおよそ 7,000m であるが、設置作業と掘削作業の干渉を避けるため、掘削地点よりやや西側の 6,482m の地点を選んで、通常 OBP と同様な自由落下による設置を行った。この水深はこれまでの OBP 観測で最大であり、従来型の OBP の耐水圧限界を上回る。試験観測に用いた OBP の構成は通常型 OBP とほぼ同じであるが、耐圧容器・水中ケーブルならびに圧力センサーに通常型より耐水圧性能が高いものを使用することにより水深 6,000m 以深への設置・観測が可能となるように改造したものである（写真 1）。大深度用の耐圧容器は通常のものとは比べ容積が小さいこともあり、この新システムによる試験観測の期間は約半年間として、11 月に回収と再設置を行った（凌風丸航海による）。

5～11 月の期間に得られた水圧変化の時系列を図 5 に示す。観測された水圧データから、海洋潮汐による圧力変動ならびに大気－海洋相互作用による圧力擾乱の影響を推定し

(Ishiguro *et al.*, 1984; Inazu *et al.*, 2012)、それぞれを除去した後の水圧変化である。約 6 ヶ月という短期間の間に 100hPa のという大きな圧力減少が観測された。この海底圧力変化を海底面の鉛直変動によるものと解釈すると、およそ 1 m の隆起があったことになるが、観測開始直後から水圧変化（減少）のレートが急速に減少していることを考えると、圧力センサーの過渡的な特性が観測された大きな圧力変動の原因である可能性が高い。圧力センサーの指示値には指数関数的な過渡変動と線形ドリフトが含まれ、こうした振る舞いは水晶式圧力センサーのドリフトとしてしばしば報告される振る舞いである (Watts

and Kontoyiannis, 1990)。こうしたセンサー特性に起因してセンサーのフルスケールに対して 0.05%程度の大きさの変動が 1 年間に生じる可能性がある。超深海型のセンサーでは、今回観測されたような 1 m/年を上回るような変化がセンサーの特性で現れる可能性は否定できない。今後の複数のセンサーによる同時観測や、センサーの加圧テストなどから、超深海型のセンサー特性の把握を進める必要がある。しかし、超深海環境で安定に半年間の海底水圧の連続データが得られることが実証できたことは、今回の試験観測の大きな成果である。

このような海底への設置直後に圧力センサーが過渡的な応答を示すことによる観測データへの影響を低減する方策の一つとして、海底での観測期間を長くすることが上げられる。そこで、2 年間以上の長期間にわたる連続観測を自己浮上式システムで実現することをめざして、超長期観測用の OBP の開発と試験観測に着手した。観測可能期間を延長する際の最大の障壁は、長期間観測を維持するための電力を維持するための電源の確保である。自己浮上式の海底観測装置ではパッケージを小型化するため、電源電池の量を増やすより、記録装置を省電力化して少ない電池で長期間動作するシステムを組上げる方が望ましい。そこで、今年度は省電力型のデータロガーを試作した（写真 2）。

現在の 1 年間の観測で使用している OBP では、アナログ出力型の圧力センサーを用いて、センサーである水晶振動子の発振周波数をデータロガー側で計測しているが、この周波数計測部の消費電力が高く、観測期間の長期化の阻害要因であった。今回は、水圧センサー側に低消費電力の周波数計測回路を内蔵したモデル（8B7000-I-005）を使用し、データロガーをセンサー側から出力される計測結果を時刻情報とともに SD カードに記録するという単純な機能のみをもつマイコンシステムとすることにより、全体として大幅に消費電力を低減することが可能となった（表 7）。この新ロガーを用いた OBP システムを用いた試験観測は、平成 25 年 2 月に海洋研究開発機構の「かいいい」の航海で実施し、短期間ではあるが所定の性能を有していることが確認できた。

表 1 凌風丸 5 月航海で設置された OBS 及び OBP の設置位置。青字は OBS 観測点、赤字は OBP 観測点。

観測点名	投入位置※投入時の船舶位置		水深 (m)
	緯度 (N)	経度 (E)	
S03	38° 11.020′	142° 23.946′	1056
S08	38° 07.998′	142° 45.093′	1532
S10	38° 29.999′	143° 01.973′	1969
S18	38° 18.999′	143° 18.021′	2780
LS1	38° 41.007′	142° 27.501′	1114
TJT1	38° 12.560′	143° 47.293′	5754
TJT2	38° 12.649′	143° 39.464′	4125
P02	38° 30.049′	142° 30.119′	1109
P03	38° 11.005′	142° 23.974′	1056
P06	38° 38.029′	142° 34.996′	1269
GJT3	38° 17.682′	143° 28.887′	3282
JFAST	37° 56.302′	143° 52.368′	6482

表 2 凌風丸 5 月航海で設置した OBS 及び OBP の機材設定記録。

観測点名	地震計名	センサー	サブ°リンク°	入力	アンプ°倍率	記録タイマー
				CH	(dB)	
S03	1-064	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/05/29-2013/04/24
S08	3-096	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/05/29-2013/04/24
S10	4-066	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/05/29-2013/04/24
S18	3-024	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/05/29-2013/04/24
LS1	3-086	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/05/29-2013/04/24
TJT1	2-042	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/05/29-2013/04/24
TJT2	4-013	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/05/29-2013/04/24
P02	PCA_6_026	圧力計	—	—	—	2012/05/08-2013/12/31
P03	PCA_6_023	圧力計	—	—	—	2012/05/08-2013/12/31
P06	PCA_6_006	圧力計	—	—	—	2012/05/08-2013/12/31
GJT3	PCA_6_021	圧力計	—	—	—	2012/05/08-2013/12/31
JFAST	PCA_9_001	圧力計	—	—	—	2012/05/16-2012/12/31

表 3 凌風丸 6 月航海で設置された OBS 及び OBP の設置位置。青字は OBS 観測点、赤字は OBP 観測点。

観測点名	投入位置※投入時の船舶位置		水深 (m)
	緯度 (N)	経度 (E)	
S04	38° 30.007′	142° 29.994′	1109
S05	37° 56.994′	142° 28.956′	1070
S09	38° 11.985′	143° 07.959′	2032
S14	38° 30.705′	142° 44.729′	1466
S15	38° 18.702′	142° 55.691′	1457
S17	38° 33.485′	143° 15.005′	2276
S40	38° 26.634′	143° 27.717′	2932
S41	38° 12.088′	143° 19.523′	2951
S42	37° 57.344′	143° 12.267′	2561
MYGI	38° 04.993′	142° 54.998′	1697
KAMN	38° 53.172′	143° 21.832′	2360
KAMS	38° 38.083′	143° 15.723′	2246
P01	38° 19.984′	142° 25.003′	1038
P05	38° 17.997′	142° 42.021′	1412
P10	38° 14.999′	143° 09.993′	2066
P11	38° 27.115′	143° 10.215′	2407

表 4 凌風丸 6 月航海で設置した OBS 及び OBP の機材設定記録。

観測点名	地震計名	センサー	サンプリング	入力 CH	アンプ倍率 (dB)	記録タイマー
S04	4-063	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S05	1-070	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S09	1-048	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S14	3-014	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S15	1-100	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S17	4-023	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S40	2-004	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S41	4-043	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
S42	4-069	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/07/04-2013/05/30
MYGI	PCA_6_009	圧力計	—	—	—	2012/06/22-2013/12/31
KAMN	PCA_6_002	圧力計	—	—	—	2012/06/22-2013/12/31
KAMS	PCA_6_003	圧力計	—	—	—	2012/06/22-2013/12/31
P01	PCA_6_025	圧力計	—	—	—	2012/06/22-2013/12/31
P05	PCA_6_022	圧力計	—	—	—	2012/06/22-2013/12/31
P10	PCA_6_027	圧力計	—	—	—	2012/06/22-2013/12/31
P11	PCA_6_021	圧力計	—	—	—	2012/06/22-2013/12/31

表 5 凌風丸 10 月航海で設置された OBS 及び OBP の設置位置。青字は OBS 観測点、赤字は OBP 観測点。水深が「？」となっている観測点では機材の不調により設置時の測量ができなかった（回収時に再測量予定）。

観測点名	投入位置※投入時の船舶位置		水深 (m)
	緯度 (N)	経度 (E)	
LS2	38° 55.018′	142° 30.025′	1196
LS3	38° 45.997′	142° 50.003′	1392
LS4	38° 18.003′	142° 41.946′	1406
S07	37° 53.043′	142° 47.916′	1375
P04	38° 18.979′	142° 33.943′	1265
P07	37° 59.999′	142° 26.916′	1064
P08	38° 16.997′	142° 49.976′	1424
P12	37° 49.233′	142° 53.976′	1635
GFK	37° 34.872′	142° 45.883′	2245
TJT1	38° 12.479′	143° 47.424′	5744
TJT2	38° 12.748′	143° 39.769′	4129
JFAST	37° 56.014′	143° 54.926′	6799
P03	38° 10.883′	142° 24.171′	?
GJT3	38° 17.686′	143° 28.860′	?
G09	38° 28.689′	143° 47.531′	?

表 6 凌風丸 10 月航海で設置した OBS 及び OBP の機材設定記録。

観測点名	地震計名	センサー	サンプリング	入力 CH	アンプ倍率 (dB)	記録タイマー
LS2	2-099	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/10/11-2013/09/06
LS3	2-095	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/10/11-2013/09/06
LS4	4-044	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/10/11-2013/09/06
S07	4-056	4.5 Hz	125 Hz	4	40, 40, 40, 40	2012/10/11-2013/09/06
P04	PCA_6_030	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
P07	PCA_6_033	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
P08	PCA_6_032	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
P12	PCA_6_029	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
GFK	PCA_6_031	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
TJT1	PCA_6_034	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
TJT2	PCA_6_035	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
JFAST	PCA_9_005	圧力計	-	-	-	2012/10/02-2013/12/31
P03	PCA_6_028	圧力計	-	-	-	2012/11/20-2013/12/31
GJT3	PCA_6_016	圧力計	-	-	-	2012/11/20-2013/12/31
G09	PCA_9_003	圧力計	-	-	-	2012/11/20-2013/12/31

表 7 通常型 OBP と超長期型 OBP のセンサー・計測部の消費電力。

		通常型	超長期型
センサー分	所要電圧	6V	6V
	消費電流	1.9mA *	14mA **
計測部	所要電圧	9V	3V
	消費電流	65mA	10mA

*アナログ出力仕様

**デジタル出力仕様（通常モード）

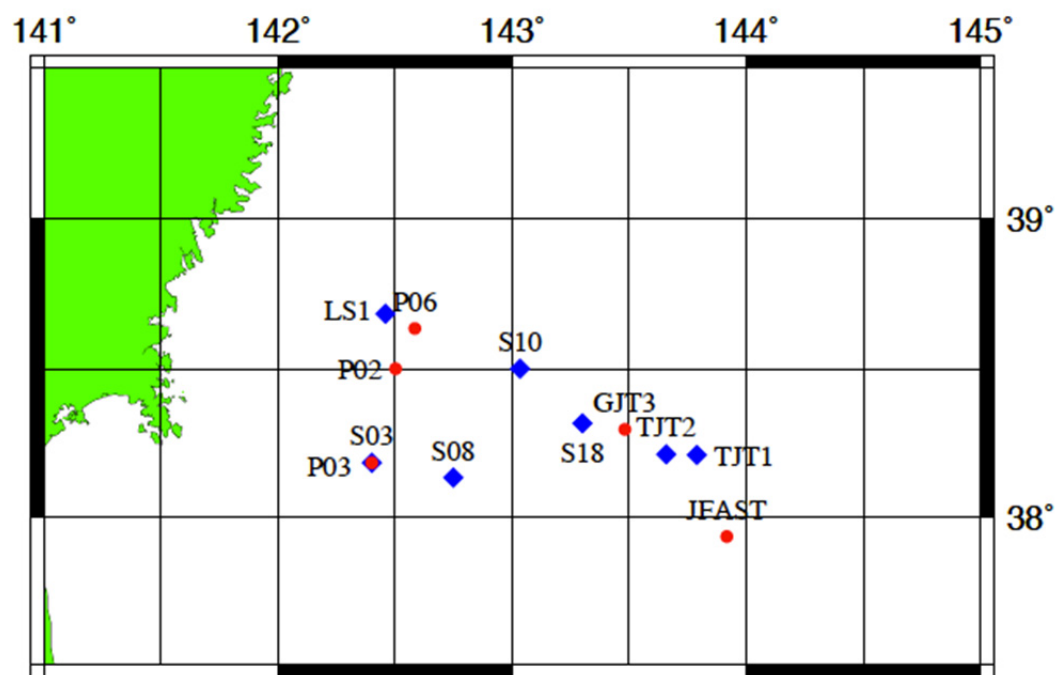


図1 凌風丸5月航海で設置した OBS(赤丸)と OBP(青菱形)の配置。

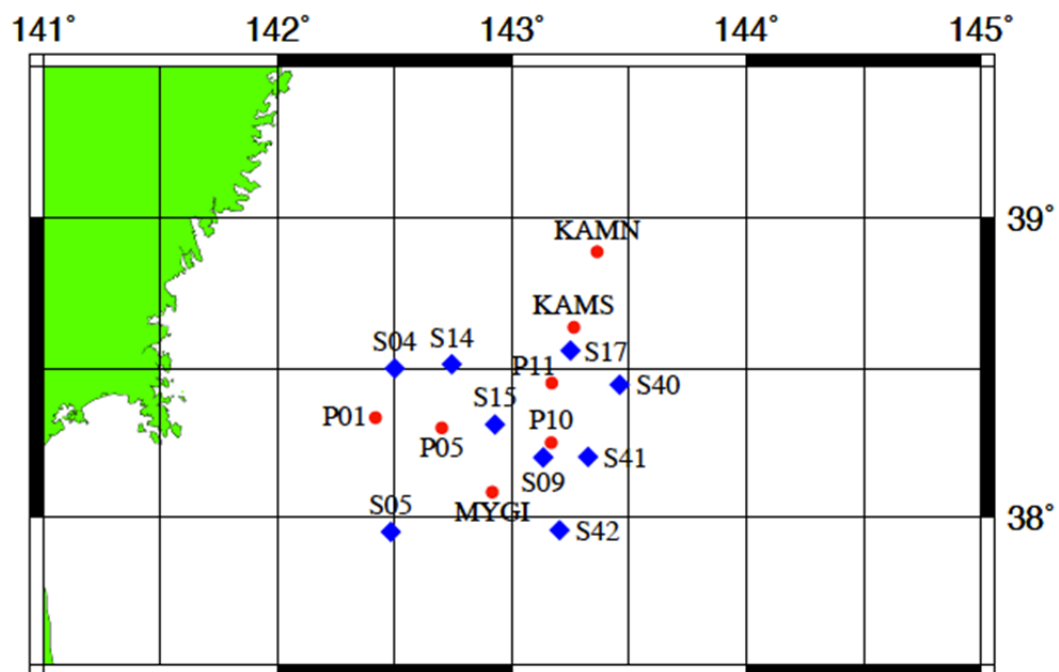


図2 凌風丸6月航海で設置した OBS(赤丸)と OBP(青菱形)の配置。

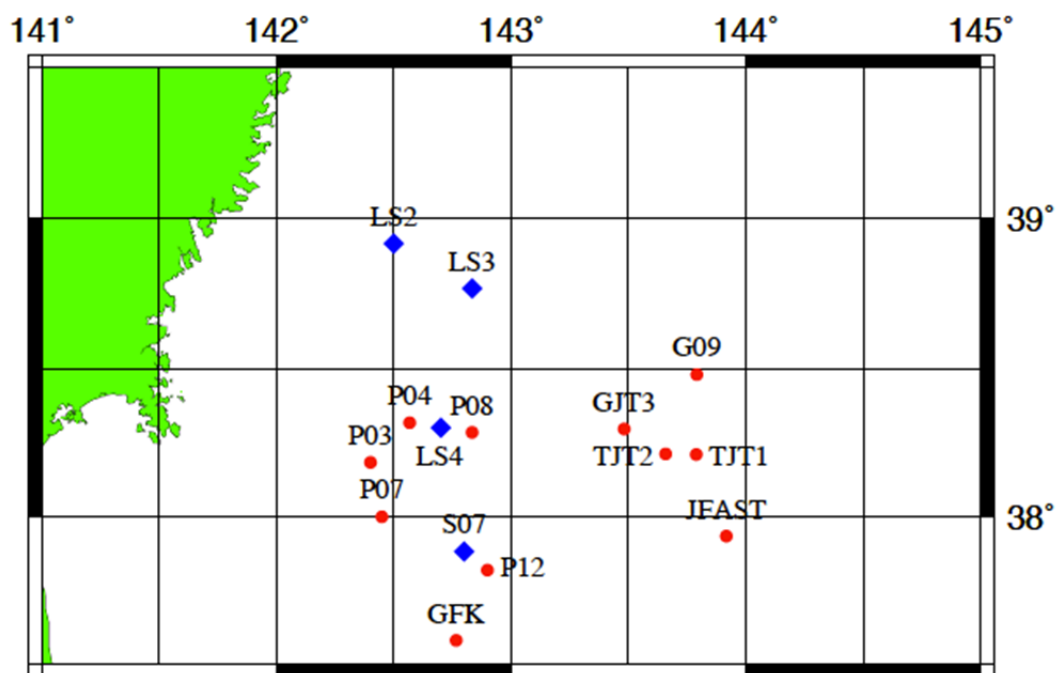


図3 凌風丸10月航海で設置したOBS(赤丸)とOBP(青菱形)の配置。

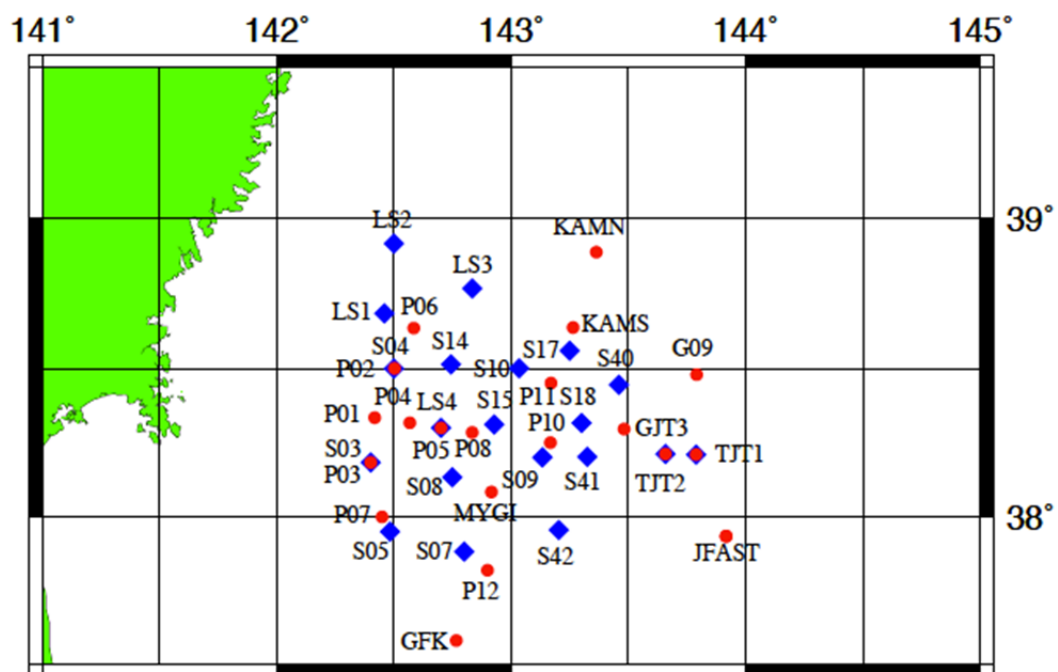


図4 平成24年度に設置した全てのOBS(赤丸)とOBP(青菱形)の配置。

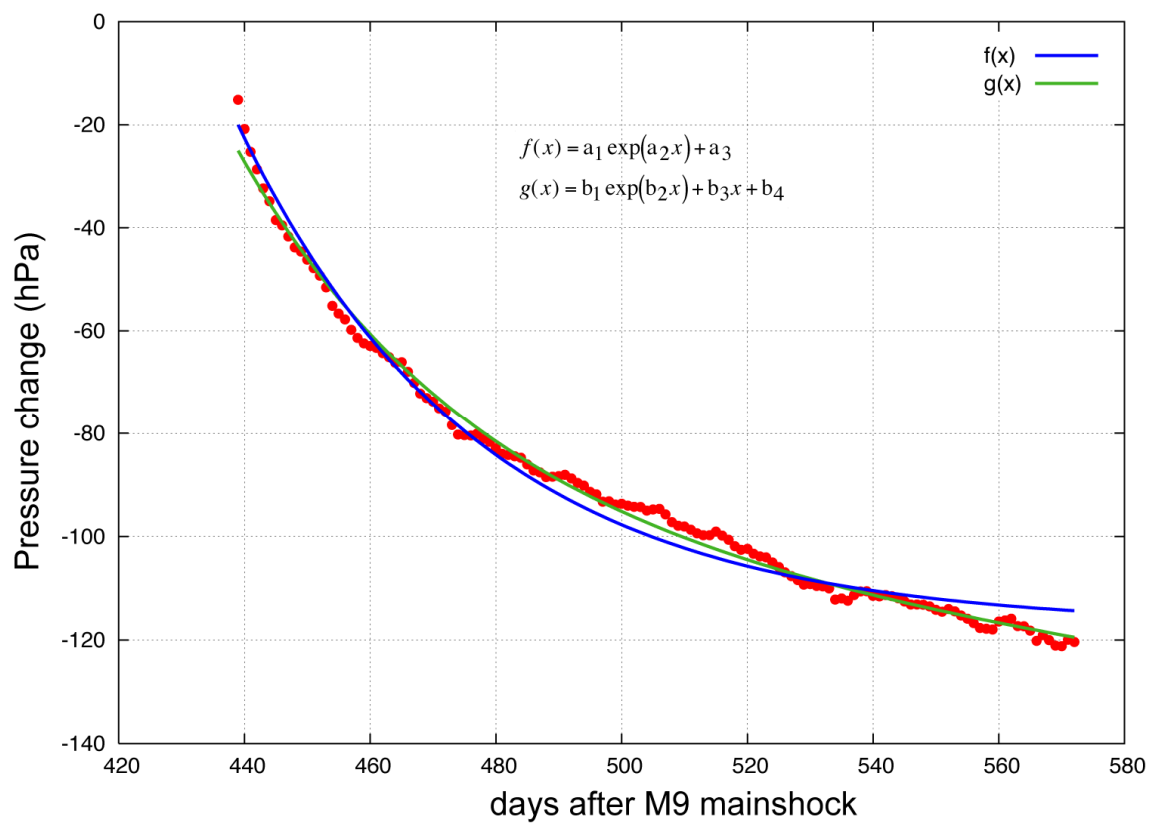


図 5 超深海型 OBP で観測された水圧時系列。海洋潮汐と非潮汐海洋変動成分を除去した残差成分の 1 日毎平均値を赤丸で示す。青と緑の実線は、水圧データに指数関数もしくは指数関数と一次関数の組み合わせを当てはめたもの。

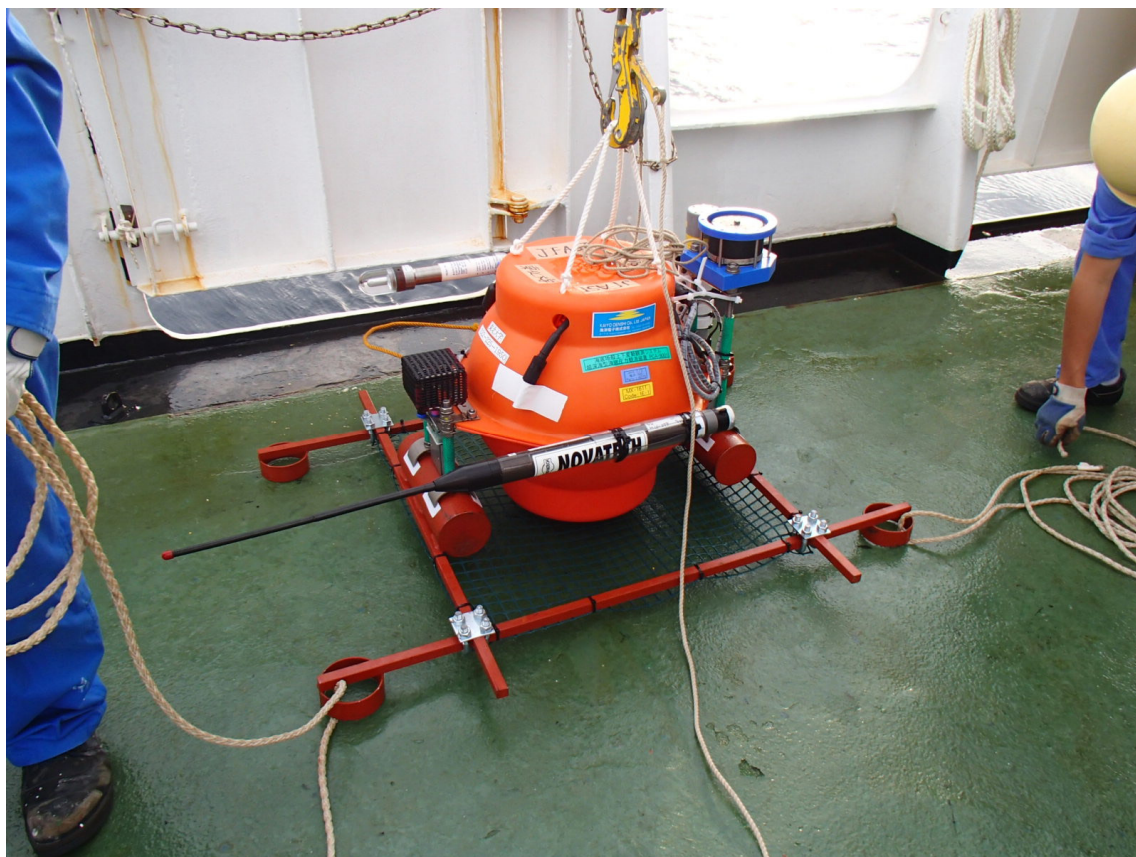


写真1 投入直前の超深海型 OBP。

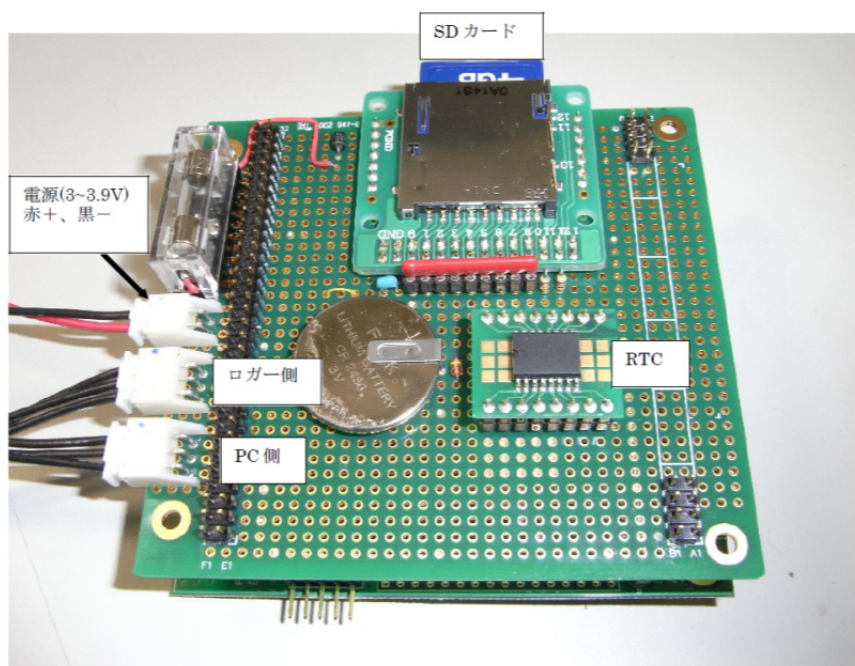


写真2 超長期観測用 OBP のために開発した省電力型データロガー。

(c) 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OBS20点とOBP20点からなる海底観測網による海底地震・地殻変動観測に着手することができた。海底地震・地殻変動観測のデータ処理・解析は、平成25年度に予定されている0BP・OBSの回収後に開始するが、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地震活動と地殻変動の状況を詳細に明らかにできると期待できる。そして、これを平成23年度までに先行調査観測による成果と比較することによって、超巨大地震の発生過程やその発生後の震源域における固着回復、震源域周囲へのすべりの拡大と、隣接域における大規模な余震の発生可能性を評価するための基礎的な情報を提供することが今後の課題である。

海底観測網の展開と並行して超深海型OBPの試験観測にも着手し、本震時に大きなすべりがあった日本海溝近傍の深海底においても長期連続観測することが可能であることが示された。一方で、フルスケールが大きな超深海型の圧力センサーを用いた比較的短期の連続観測で得られる水圧データにはセンサーの機械特性に起因する、みかけの水圧変動があらわれる可能性があることがわかった。今後、観測に用いたセンサーの特性を把握できれば、今回の試験観測のデータから超深海域での地殻変動観測の実態が明らかにできる可能性があるため、同センサーについて室内加圧実験を行う他、現在別のセンサーを用いて行っている試験観測のデータとの照合が重要な課題である。

(d) 引用文献

- Ishiguro M., T., Sato, Y. Tamura and M. Ooe, Tidal data analysis -an introduction to BAYTAP, *Proc. Inst. Stat. Math.*, **32**, 71-85 (in Japanese with English abstract), 1984.
- 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.
- 海上保安庁, *地震予知連絡会会報*, **88**, 143-149, 2012.
- Obana, K., M. Shinohara, T. Yamada, K. Uehira, R. Hino, H. Shiobara, K. Nakahigashi, 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, *Abstract 2012 AGU Fall meeting*, T21F-05, 2012.
- Watts D. R. and H. Kontoyiannis, Deep-ocean bottom pressure measurements: Drift removal and performance, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 296-306, 1990.