

2011 年東北地方太平洋沖地震の余震海底観測の概要

八木健夫*†・橋本信一*・阿部英二*・鈴木秀市**・
藤田親亮*・内田和也***・平野舟一郎****

Outline of Marine Aftershock Observation of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

Takeo YAGI*†, Shin'ichi HASHIMOTO*, Hideji ABE*, Syuichi SUZUKI**,
Chikaaki FUJITA*, Kazunari UCHIDA*** and Syuichiro HIRANO****

はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分, 三陸沖から茨城沖を震源とする東北地方太平洋沖地震 ($M_{JMA}=9.0$) が発生した. 多くの余震が岩手沖から茨城沖にかけて発生し, 同日 15 時 15 分には茨城沖で最大余震 ($M_{JMA}=7.7$) が発生した.

一般に精度の良い余震分布を得るためには, 余震域近傍で稠密に観測を行うことが重要である (Sakai *et al.*, 2005; Uehira *et al.*, 2006). 東北地方太平洋沖地震が発生した時, 宮城沖には, 文部科学省の委託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究」をうけて, 東北大学が設置した海底地震計・海底圧力計による観測網が構築されていた. また茨城沖には, 東京大学地震研究所により 1 年間連続観測可能な長期観測型海底地震計 34 台が設置されていた. これら既設の海底地震計・海底圧力計による観測域は, 余震域に含まれていたが, 三陸沖から茨城沖におよぶ広い余震域全体には及んでいなかった. そこで, 余震域全体に対応した長さ約 500 km・幅約 200 km の海域において, 観測されていない領域に海底地震計を新規に設置して, 余震観測

が行われた (Shinohara *et al.*, 2011). また余震域の北端である青森沖においては, 東北大学による新規の観測網が 2011 年 4 月に構築された. 本報告では, これらの観測網の中から, 三陸沖から房総沖までの新規の観測域における, 本震発生直後から 10 月上旬までに行われた海底地震計の設置・回収過程の概要について報告する.

余震観測網

本報告で扱う観測域は, 三陸沖から房総沖におよぶ長さ約 500 km・幅約 200 km の海域である. この海域を約 25 km 間隔で格子状に区切り, その格子点を基本に観測点位置を決定した. 準備した海底地震計の多くは, 連続観測期間が約 3 ヶ月間の短期観測型海底地震計である. そこで多くの観測点において約 2~3 ヶ月ごとに海底地震計の設置・回収を行った. 本報告では, 2011 年 3 月 15 日から 5 月 11 日までに海底地震計を設置・回収し, 観測データを取得した観測を第一期余震観測, 同じく 4 月 25 日から 7 月 12 日までを第二期余震観測, 6 月 3 日から 10 月 4 日までを第三期余震観測とする. また観測期間が移行する機会を利用して, 余震分布などに応じて観測点配置を変更した. 6 ヶ月間以上の長期連続観測可能な海底地震計を設置した多くの観測点では, 第一期から第三期余震観測まで連続観測を行った.

海底地震計

第一期から第三期余震観測においては, 様々な海底地震計が準備された (表 1). これらはすべて音響通信装置による錘切り離しを行う自己浮上式海底地震計である.

圧力計搭載型広帯域海底地震計は, 広帯域海底地震計と絶対圧力計を組み合わせた 1 年間以上の連続観測可能な観測システムである (塩原ほか, 2011) (図 1). 広帯域セン

2011 年 11 月 1 日受付, 2011 年 12 月 13 日受理

† yagi@eri.u-tokyo.ac.jp

* 東京大学地震研究所技術部総合観測室,

** 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,

*** 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター,

**** 鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島弧地震火山観測所.

* Technical Supporting Section for Observational Research, Earthquake Research Institute, University of Tokyo,

** Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University,

*** Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University,

**** Nansei-Toku Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Faculty of Science, Kagoshima University.

表 1. 余震観測域における，2011年3月から10月までの海底地震計の運用線表. 各海底地震計の運用線で，観測海域に設置されていた時期を示す. 運用線上の数字は，各観測期間において設置していた海底地震計の台数を表す.

	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
圧力計搭載型広帯域海底地震計		2		3		3		1
加速度計搭載海底地震計		1		2		2		
長期観測型 1Hz 海底地震計	34	37		37		37		27
圧力計付海底地震計		1		1		1		1
短期観測型 1Hz 海底地震計		2		2		1		
短期観測型 4.5Hz 海底地震計								
北海道大学		19				18		
東京大学地震研究所		7				20		
九州大学		9		9		9		
鹿児島大学		3		3				
海洋研究開発機構		23		23				
気象庁・気象研究所				39				

サーとしてGuralp社製CMG-3Tを，絶対圧力計としてParoscientific社製8B7000-2を搭載している。広帯域センサーからの出力を収録するデータレコーダーは，周波数温度特性に優れたMCXOを搭載しており，長期観測に対応できるようになっている（金沢ほか，2001）。この高精度周波数源であるMCXOからの信号は，絶対圧力計のデータロガーにも供給されている。この信号を用いて絶対圧力計の出力である周波数を10秒毎に計測し，その計測データをSDメモリーカードに収録する。圧力計搭載型広帯域海底地震計は，従来の広帯域センサーによる地震観測に加え，より長周期となる地殻上下変動などの現象の検出を狙って準備された海底地震計である。そのため陸上の広帯域地震観測点を併せた広い領域での観測の連携と，東北大学の既設の海底圧力計設置地点を考慮し，宮城沖と房総沖の海溝軸近傍に設置された。特に房総沖の設置地点は，余震域南端で，余震活動に関して注目を集めている地点であることから，設置が決められた。

加速度計搭載海底地震計は，日本航空電子社製の加速度計を搭載した海底地震計で，今回の余震観測では2台準備した（図2）。1台は加速度計としてJA-5typeⅢを搭載し，残りの1台にJA-28GAを搭載した。各々の観測帯域は±3dBでDC～300Hz，DC～900Hzである。これらの加速度計は，単体では1軸の観測となるため，それぞれ加速度計

を3台組み合わせて，直交3成分加速度計となるようにした。JA-28GAを搭載した従来の1年間連続観測できる加速度計搭載海底地震計は，直径65cmのチタン製耐圧球を用いていた（篠原ほか，2009）。今回の余震観測では観測期間が6ヶ月間であり，電池の搭載量が少ないため，内部空間の小さい直径50cmのチタン製耐圧球を用いた。従来の海底地震計は，高感度の地震計が搭載されていたため，規模の大きな地震の記録が飽和することが多かった。そのため規模の大きな余震に対しても飽和しない地震記録を収録できるように，この加速度計搭載海底地震計を準備し，本震近傍と房総沖に1台ずつ設置した。

長期観測型1Hz海底地震計は，1Hz直交3成分地震計，データレコーダー，そしてそれらに電力を供給する電池を直径50cmのチタン製耐圧球内に搭載した海底地震計である（図3）。観測期間が6ヶ月間以上に及ぶ場合は，この海底地震計を使用すると，短期観測型海底地震計のように繰り返し再設置する必要がない。そのため観測データを2～3ヶ月ごとに順次取得することはできないが，設置・回収の作業量を軽減できる。

圧力計付海底地震計は千葉大学により準備された（図4）。直径43cmのガラス製耐圧球内に4.5Hz直交3成分地震計を搭載し，外装部分に圧力計としてParoscientific社製8B7000-2を搭載している（佐藤ほか，2011）。絶対圧力



図 1. 圧力計搭載型広帯域海底地震計. 直径 65 cm のチタン製耐圧球内に広帯域センサー (Guralp 社製 CMG-3T) を搭載し, 耐圧球の外装部分に圧力計 (Paroscientific 社製 8B7000-2) を取り付けている.



図 2. 加速度計搭載海底地震計. 直径 50 cm のチタン製耐圧球内に, 加速度計 (日本航空電子社製 JA-5typeⅢまたは JA-28GA) を搭載している.



図 3. 1 Hz 地震計を搭載した最長 1 年間連続観測可能な長期観測型海底地震計. 1 Hz 直交 3 成分地震計, 長期観測に対応できる MCXO 搭載のデータレコーダー, そしてそれらに電力を最長 1 年間供給できる電池が直径 50 cm のチタン製耐圧球内に納められている.

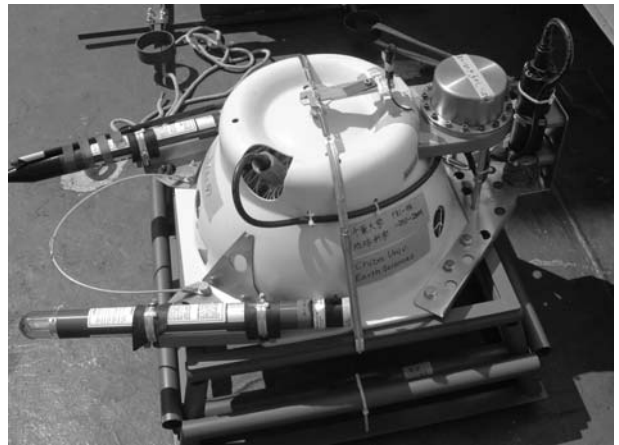


図 4. 圧力計付海底地震計. 直径 43 cm のガラス製耐圧球内に 4.5 Hz 直交 3 成分地震計を搭載し, 外装部分に圧力計 (Paroscientific 社製 8B7000-2) を取り付けている. (佐藤利典氏より画像提供)



図 5. 1 Hz 地震計を搭載した短期観測型海底地震計. 直径 43 cm のガラス製耐圧球内に 1 Hz 直交 3 成分地震計, レコーダー, 電池が搭載されている. 耐圧球と音響通信装置は, 4.5 Hz 地震計を搭載した短期観測型海底地震計と同じものを使用する. (植平賢司氏より画像提供)

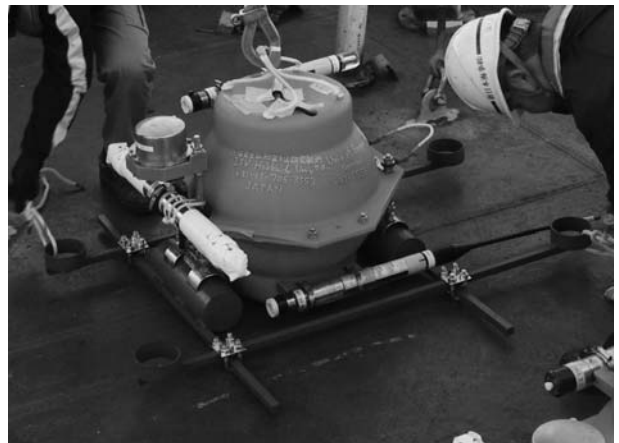


図 6. 北海道大学の短期観測型海底地震計.

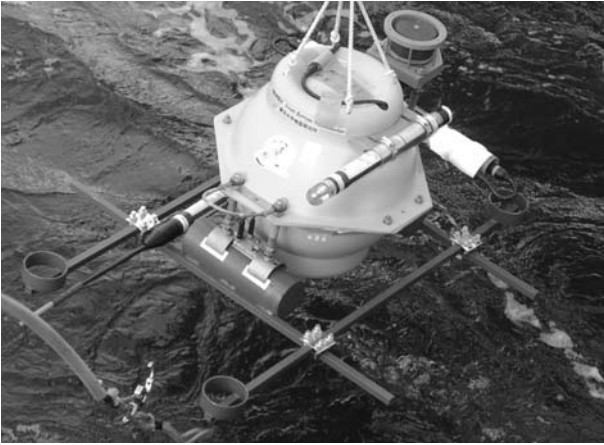


図 7. 東京大学地震研究所の短期観測型海底地震計.

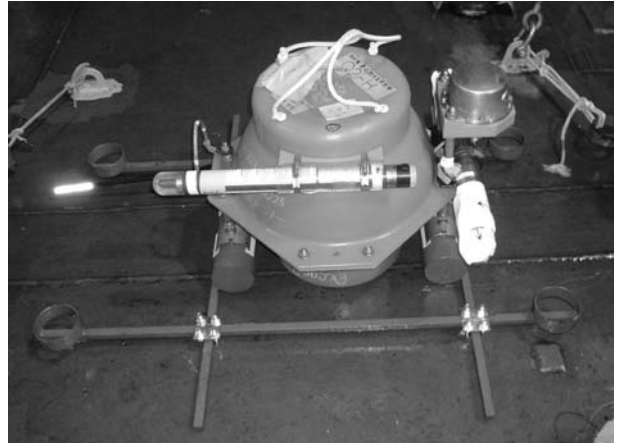


図 8. 九州大学の短期観測型海底地震計. (植平賢司氏より画像提供)



図 9. 鹿児島大学の短期観測型海底地震計. (植平賢司氏より画像提供)



図 10. 海洋研究開発機構の短期観測型海底地震計. 4.5 Hz 直交3成分地震計とハイドロフォン (HIGH TECH 社製 HTI-99-DY または BENTHOS 社製 AQ-18) を搭載している.



図 11. 気象庁・気象研究所の短期観測型海底地震計. 4.5 Hz 直交3成分地震計とハイドロフォン (HIGH TECH 社製 HTI-99-DY) を搭載している. (平田賢治氏より画像提供)

計からの出力は約30秒毎に連続1年間、4.5 Hz 直交3成分地震計の出力は連続6ヶ月間収録できる。それぞれの計測データは1台のSSDの別々のフォルダに保存される。

短期観測型海底地震計は、1 Hz または 4.5 Hz 直交3成分地震計を搭載した海底地震計である。この海底地震計は、直径43 cmのガラス製耐圧球を使用した海底地震計で、長年にわたる運用実績のある海底地震計である。本観測では、最も運用台数が多く、延べ173台を準備した。1 Hz 地震計を搭載した海底地震計は、九州大学が準備した(図5)。また4.5 Hz 地震計を搭載した海底地震計は、北海道大学・東京大学地震研究所・九州大学・鹿児島大学・海洋研究開発機構・気象庁・気象研究所の各機関により準備された(図6～図11)。海洋研究開発機構・気象庁・気象研究所が準備した海底地震計は、4.5 Hz 直交3成分地震計に加えて、ハイドロフォン (HIGH TECH 社製 HTI-99-DY または

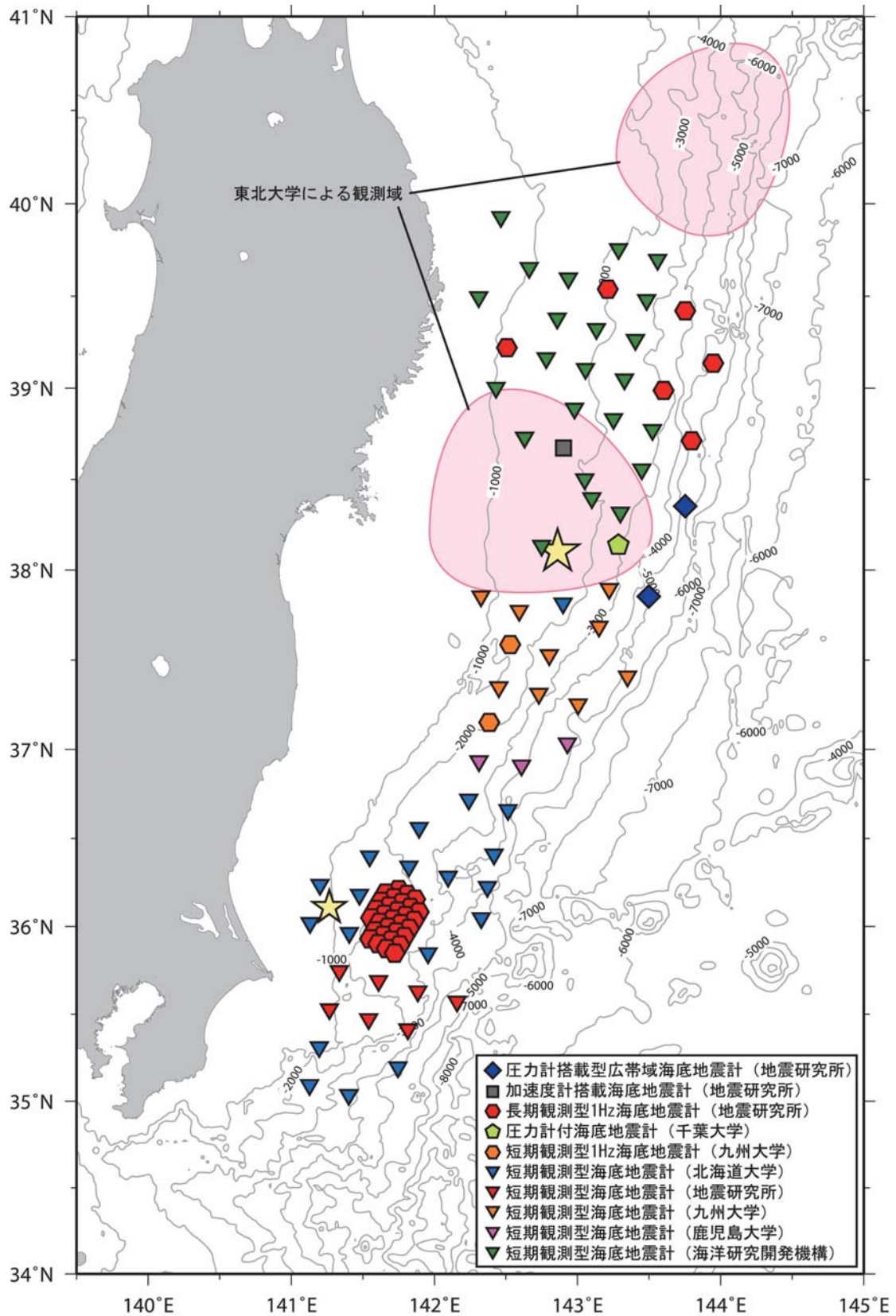


図 12. 第一期余震観測 (2011年4月2日時点) における海底地震計の設置地点。大きい星印は本震, 小さい星印は最大余震の震央を示す。等深線は1000m間隔である。

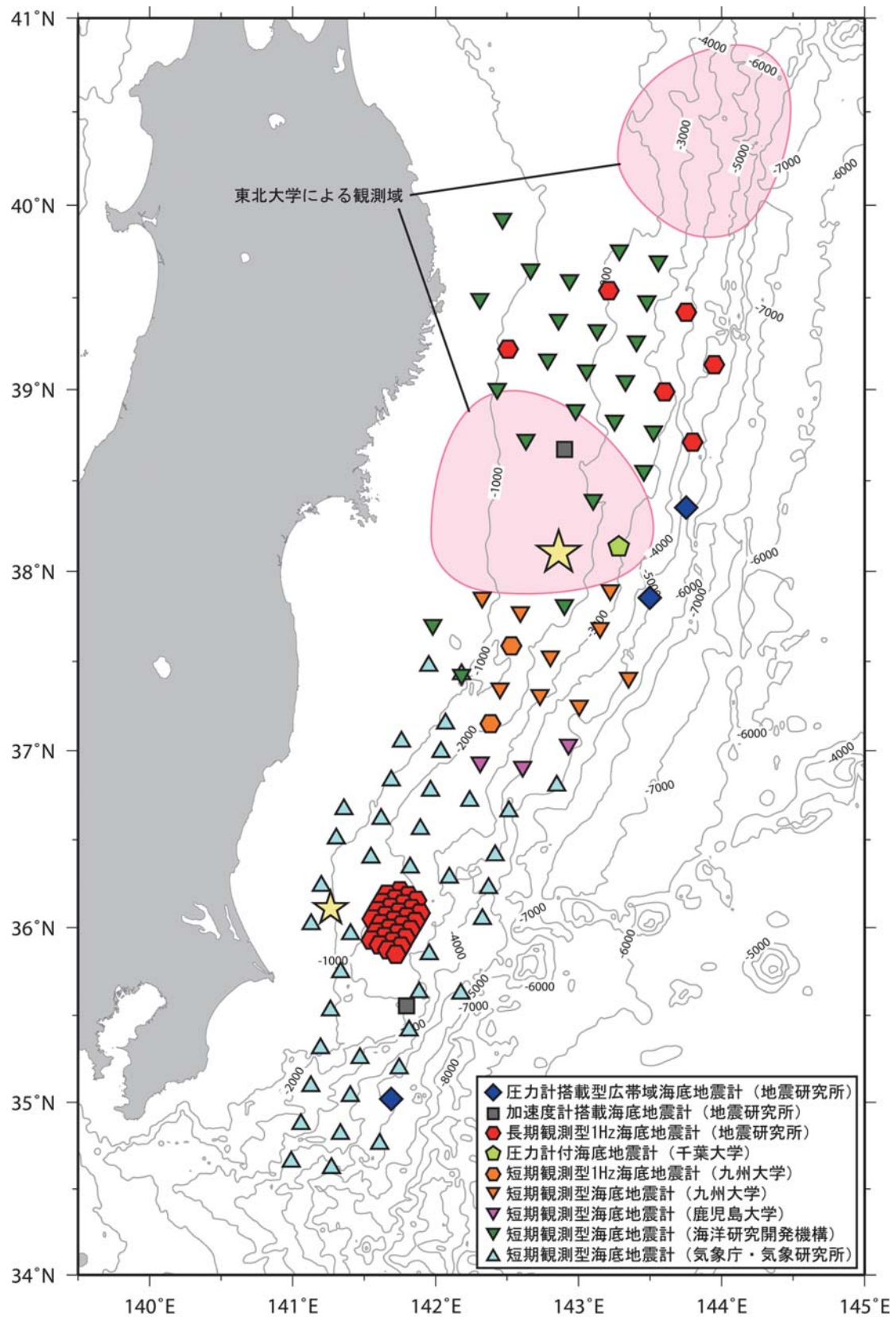


図 13. 第二期余震観測 (2011年5月5日時点) における海底地震計の設置地点.

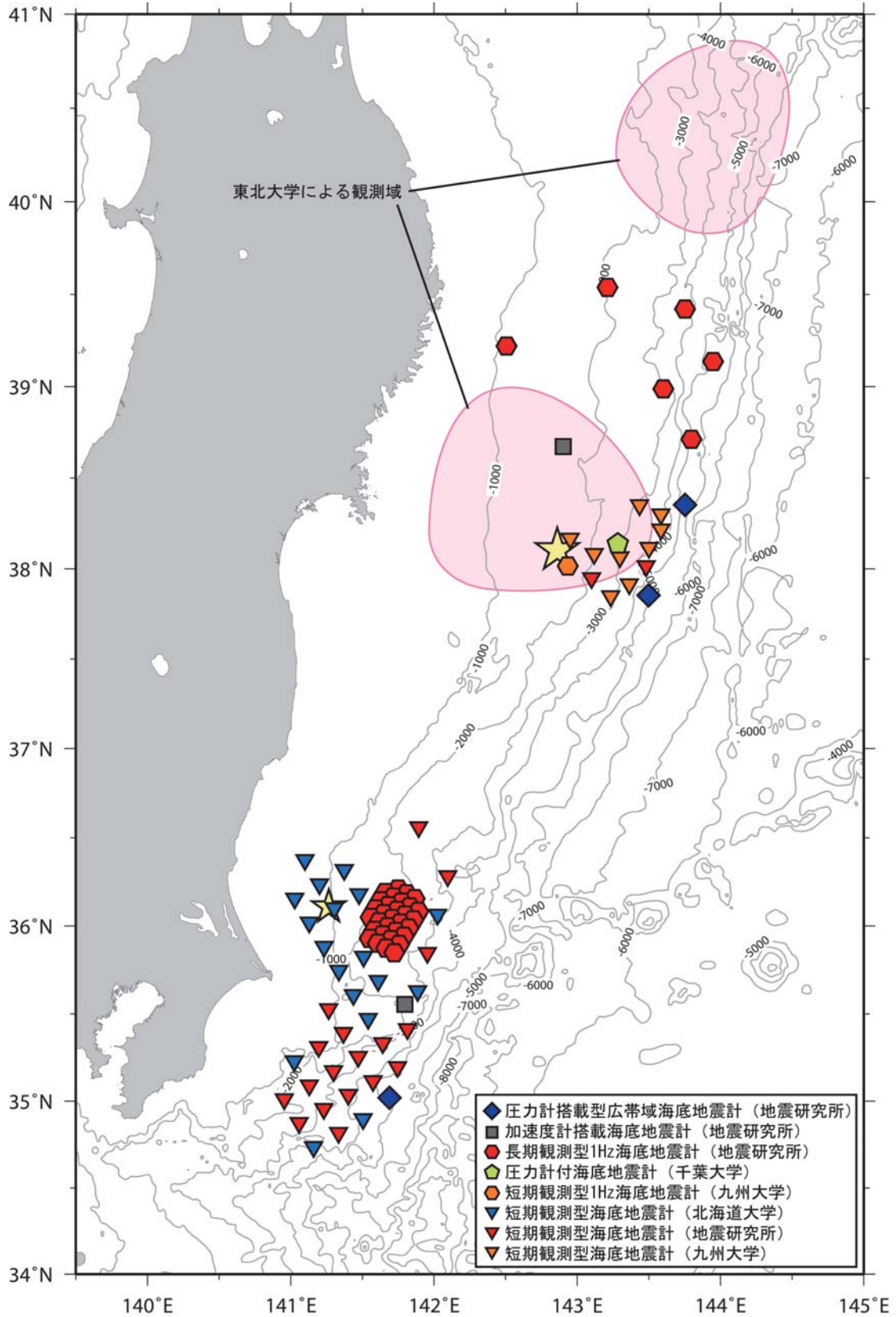


図 14. 第三期余震観測 (2011年7月18日時点) における海底地震計の設置地点。

6月3日から7月12日にかけて回収を試み、72台を回収した。

第三期余震観測

第三期余震観測では、6月3日から7月17日にかけて、「よこすか」・「かいゆう」で短期観測型海底地震計48台を新たに設置した。7月18日の時点では、91台により観測が行われた(図14)。第三期では、宮城沖の海溝寄り、茨城沖から房総沖までの海域を重点観測海域とした。これらの海域に、第一期・第二期より稠密に約17km間隔で海底地震計を設置した。

本震発生前より茨城沖で観測を行っていた長期観測型1Hz海底地震計31台と、第一期または第二期より連続観測を行った圧力計搭載型広帯域海底地震計2台・加速度計搭載海底地震計2台・長期観測型1Hz海底地震計6台、および第三期で観測を行った北海道大学・地震研究所・九州大学の短期観測型海底地震計48台の計89台は、「新世丸」・「第七海工丸」を使用して、9月14日から10月4日にかけて回収を試み、81台を回収した。

おわりに

余震観測を行うために、圧力計搭載型広帯域海底地震計を含む海底地震計を延べ185台準備した。長さ約500km・幅約200kmの余震観測域において、本震が起きた4日後の3月15日から海底地震計の投入を開始した。第一期余震観測では、余震観測域全体にかけて海底地震計73台を設置し、既設の海底地震計とあわせて最大104台で観測を行った。第二期余震観測では、福島沖や房総沖の観測域を広げ、新たに海底地震計64台を設置し、最大119台で観測を行った。第三期余震観測では、宮城沖・茨城沖・房総沖を重点観測海域として、新たに海底地震計48台を設置し、最大91台で観測を行った。第三期余震観測以降、11月中旬までに長期観測型1Hz海底地震計39台を新たに設置した。11月14日時点で、既設の圧力計搭載型広帯域海底地震計1台と圧力計付海底地震計1台と併せて、計41台で余震観測を継続中である。

謝辞：海底地震観測の実施にあたり、北海道大学・東北大学・東京大学地震研究所・九州大学・鹿児島大学・海洋研究開発機構・気象庁・気象研究所の各機関の方々から多くのご指導と適切なお言葉をいただきました。特に海底地震計の準備・設置に際しては、北海道大学の和田美穂子氏、千葉大学の水野真理子氏にご協力をいただきました。

た。船上作業に際しては、日本海洋事業(株)の方々に支援していただきました。また海底地震計の設置・回収にあたり、海洋研究開発機構研究船「かいらい」・「淡青丸」・「なつしま」・「よこすか」、気象庁観測船「啓風丸」・「凌風丸」、(株)オフショア・オペレーション「かいゆう」・「第七海工丸」、新日本海事(株)「新雄丸」・「新世丸」の船長・乗組員の方々にご協力をいただきました。また、本稿をまとめるにあたり、査読者の飯高隆准教授・新谷昌人准教授からは有益なアドバイスをいただきました。ここに記して、謝意を表します。また作図にあたり、Wessel and Smith (1998)による描画ソフトウェアGMTを使用しました。

本観測は平成22年度・平成23年度の文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費により実施しました。

文 献

- 金沢敏彦・篠原雅尚・塩原 肇・望月将志・荒木英一郎・末広潔, 2001, 海半球ネットワークによる広帯域地震観測網, 月刊地球, **23**, 18-26.
- Sakai, S., T. Yamada, M. Shinohara, H. Hagiwara, T. Kanazawa, K. Obana, S. Kodaira, and Y. Kaneda, 2005, Urgent aftershock observation of the 2004 off the Kii Peninsula earthquake using ocean bottom seismometers, Earth Planets Space, **57**, 363-368.
- 佐藤利典・松原忠泰・河野昭博, 2011, 自己浮上式海底地震計へ搭載可能な上下変動計(圧力計)の開発, 地震学会講演予稿集2011年度秋季大会, P2-59, 226.
- 篠原雅尚・山田知朗・金沢敏彦, 2009, 海底における強震動観測のための加速度計搭載海底地震計の開発, 海洋調査技術, **21**, 2, 15-24.
- Shinohara, M., T. Yamada, K. Nakahigashi, S. Sakai, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Ito, R. Azuma, Y. Kaiho, T. No, H. Shiohara, R. Hino, Y. Murai, H. Yakiwara, T. Sato, Y. Machida, T. Shinbo, T. Isse, H. Miyamachi, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Hirata, S. Yoshikawa, K. Obara, T. Iwasaki, and N. Hirata, 2011, Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, Earth Planets Space, **63**, 835-840.
- 塩原 肇・篠原雅尚・一瀬建日, 2011, 広帯域海底地震観測での帯域拡大に向けた取り組み, 海洋調査技術学会講演要旨集, 44-45.
- Uehira, K., T. Yamada, M. Shinohara, K. Nakahigashi, H. Miyamachi, Y. Iio, T. Okada, H. Takahashi, N. Matsuwo, K. Uchida, T. Kanazawa, and H. Shimizu, 2006, Precise aftershock distribution of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake (Mj=7.0) using a dense onshore and offshore seismic network, Earth Planets Space, **58**, 1605-1610.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Am.