

高知県沖の島におけるオンライン広帯域地震観測点の設置

田中伸一^{*†}・森 健彦^{*}・藤田親亮^{*}・小原一成^{**}

Construction of an online broadband seismic station in Okinoshima, Kochi prefecture

Shinichi S. TANAKA^{*†}, Takehiko MORI^{*}, Chikaaki FUJITA^{*} and Kazushige OBARA^{**}

Abstract

To detect seismic waves from a shallow very low-frequency earthquake, we constructed an online broadband seismic station on the island of Okinoshima, Kochi prefecture. We started with a preliminary investigation on the island. From a preliminary investigation, it was recognized that an Okinoshima elementary school was well suited as the seismic station site. Because a precursory event occurred, we deployed a temporary broadband seismometer on the foundation of the gymnasium of the school. However, the observed horizontal component data included large amplitude noises at low-frequency bands under strong wind conditions. Our interpretation was that the noise was likely caused by the ground motion of soft sediment coupled with vibration of the building structure of the gymnasium. Therefore, we designed a seismic observation station for a broadband seismometer by using a sectional manhole installed in a solid concrete foundation on the base rock. This seismic station was constructed at the edge of the playground of the school. To compare recorded data between the permanent and temporary stations, we performed simultaneous observation for about 1 month. Though the new station was only 100 m away from the temporary station, the vertical and horizontal noise components under strong wind conditions had very small amplitudes at the new station compared with those at the temporary station. In particular, an FFT analysis of the noise of horizontal components at the permanent station indicated that the power across all frequency bands was less than 1/10 that of the temporary station. Therefore, the new station can detect vertical and horizontal seismic waves from shallow very low-frequency earthquakes. In the future, it will be necessary to consider the environmental conditions around the observation location for installing a broadband seismometer. One month after installing the new Okinoshima seismometer, we discovered a small amount of water leakage into the manhole due to a few gaps present at a manhole joint. We filled the gaps with thin acrylic board and strong high-strength adhesive, and no further water leakage was observed. To deal with any problems that arise, periodic inspection after the construction of a seismic station is important.

Key words : Broadband seismometer, Constructed seismic station, Low-frequency band noise, Sectional type manhole

1. はじめに

南海トラフ沿いでは、海溝型巨大地震である東南海地震・南海地震が繰り返し発生し、西南日本を中心に甚大な被害をもたらしてきた。これらの地震の発生にはフィリピン海

プレートの沈み込みが強く関わっている。

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートとの境界では、海溝型巨大地震が約 100 年間隔で繰り返し発生するが、その震源域のプレート境界下部延長側で、深部低周波微動と呼ばれる微弱振動が世界で初めて発見された (Obara, 2002)。この微動は、数日間かけてゆっくりプレート間がずれ動く短期的スロースリップに伴って発生することが多い (Obara *et al.*, 2004, 図 1)。

また、南海トラフ付近では、浅部超低周波地震という現象が発見された (Obara and Ito, 2005)。さらに、豊後水道では約 6 年ごと (1997 年, 2003 年, 2010 年) に発生す

2015 年 11 月 11 日受付, 2016 年 1 月 29 日受理.

[†] sst@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所技術部総合観測室

^{**} 東京大学地震研究所観測開発基盤センター

^{*} Technical Supporting Section for Observational Research, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

^{**} Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

る長期的スロースリップイベントに伴って、そのすべり域の両側に存在する浅部超低周波地震と深部低周波微動が、同時に活発化するという現象が観測された (Hirose *et al.*, 2010, 図 1)。

これらのスロー地震は、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う逆断層型であり、1946年に発生した南海地震(Mw 8.3)と同じである。これらの震源域は隣接しているため(図 1)、スロー地震と巨大地震は相互に影響する可能性がある。その影響度を明らかにするためには、まずスロー地震間の相互作用のメカニズムを解明する必要がある。

豊後水道の長期的スロースリップイベントと同時に発生する浅部超低周波地震は、卓越する周期が 10 秒程度であり、その現象を正確に把握するために、短周期地震計ではなく広帯域地震計を使用する。四国では、定常的広帯域地震観測点が数点整備されているが、現象をより詳しく把握するために、四国西部に新たに 3 点の機動的広帯域地震観測点を設置した。そのうちの 1 点は、できるだけ対象とする震源に接近するため、高知県宿毛市沖の島内に設置することとした。本稿では、沖の島における観測点候補地選定のための予備調査、長期的スロースリップイベントの兆候を受けて臨時の広帯域地震観測点の設置と問題の発覚、それを踏まえた本観測点の設計と設置について記述する。

2. 予 備 調 査

沖の島(図 2)は高知県の南西に位置し、その大きさは

南北約 6.0 km, 東西約 3.5 km である。沖の島は、そのほとんどが花崗岩で成り、急峻な斜面が多い地形である。

2014 年 9 月 2 日に実施した現地視察では、地盤が良く人工ノイズの影響が少ないこと、商用電源が利用できること、地震観測装置の時刻校正に必要な GPS 信号を受信できること、を条件として広帯域地震観測点の候補地を探索した。その結果、宿毛市立沖の島小学校グラウンド脇・廃工場・ヘリポート脇の 3 箇所(図 2)を広帯域地震観測点の候補地として選定した。この 3 点で地動ノイズ観測を行い、人工的なノイズの有無を調査した。使用機材はレナーツ社製 LE-3Dlite MarkII (固有周期 1 Hz, 磁北に合わせて設置)と白山工業社製 LS-8800 を用い、サンプリング周波数を 200 Hz, アンチエイリアスフィルタを最小位相フィルタに設定した。電源には単二乾電池 8 個を直列(約 12V)に接続して駆動させた。

各調査点の波形、二乗平均平方根(RMS)、ランニングスペクトルを図 3 に示す。廃工場およびヘリポートでは、水平動成分において、50 Hz 付近と 20 Hz 付近のスペクトル密度が高いが、小学校の予備観測ではこれらの傾向が見られなかった。次に、上下動成分においても小学校に比べて、廃工場、ヘリポートでは全体的にスペクトル密度が高い。また、上下動成分は水平動成分とは異なり、10~30 Hz 付近にスペクトル強度が高い傾向にあった。沖の島の商用電源は 60 Hz であるため、水平動成分に見られる 50 Hz 付近のスペクトル密度の卓越は商用電源由来のハム

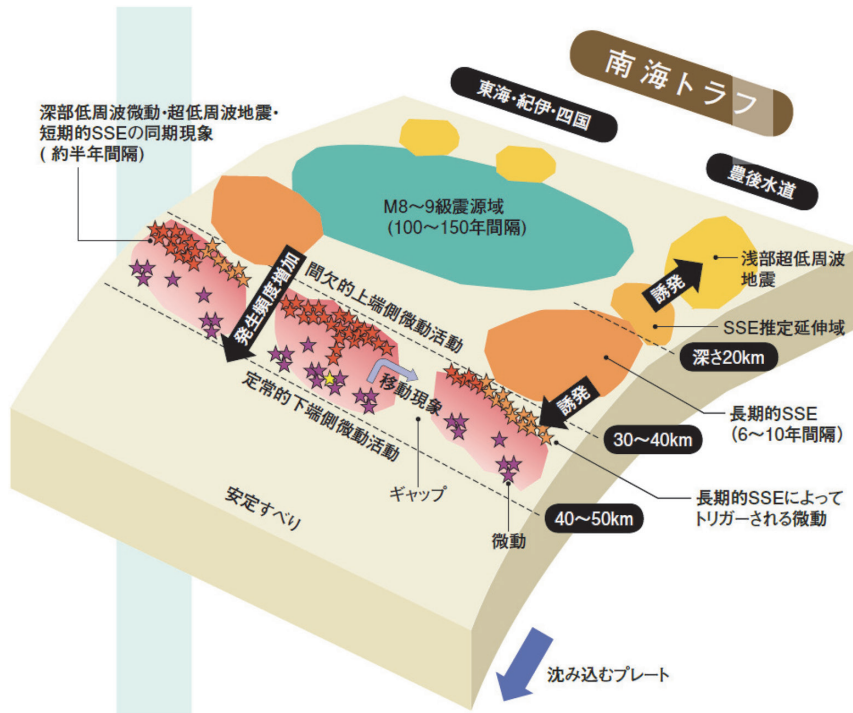


図 1. 南海トラフのプレート運動と各現象の関係 SSE はスロースリップイベントの略 東京大学地震研究所ニュースレター PLUS No. 16 より引用

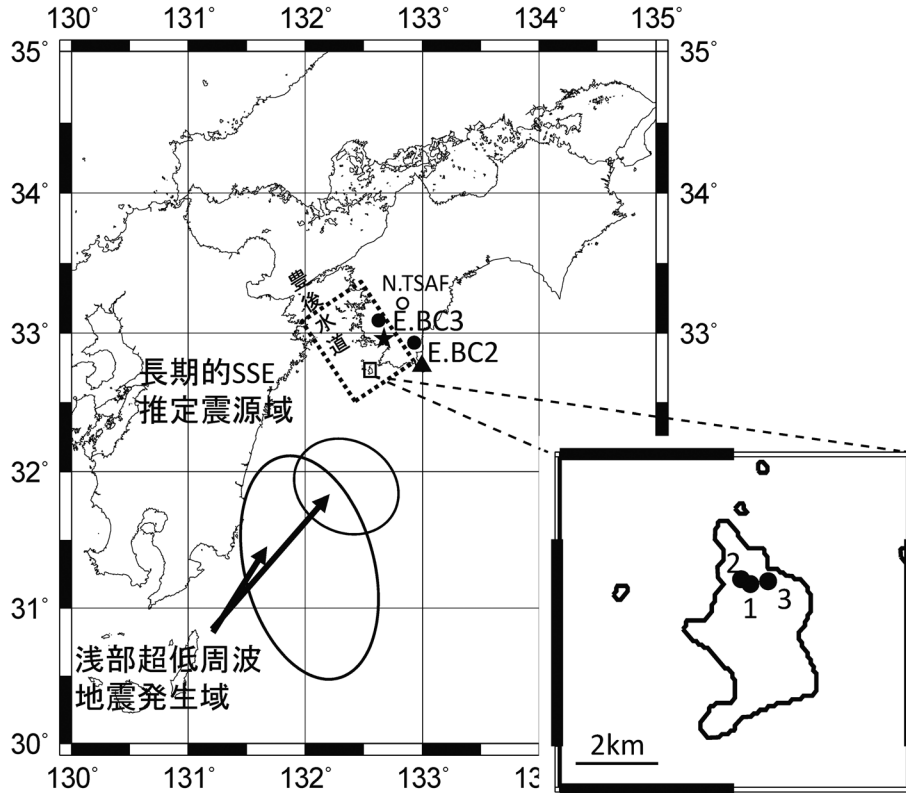


図 2. 高知県宿毛市沖の島の拡大図

1. 沖の島小学校 (E.BC1), 2. 廃工場跡, 3. ヘリポート脇

※ 2015 年 6 月に E.BC2 (四万十深木) および E.BC3 (宇和島榎川) が新設された。また、防災科学研究所の F-net (○ N.TSAF), 気象庁のアメダス観測点 (★宿毛, ▲清水) を地図に示した

ではなく地動ノイズと考えられる。

いずれの調査点も人工ノイズは見られなかったが、地動ノイズが低いことに加え、トラブルが発生したときに問い合わせが可能であることを勧告し、沖の島小学校グラウンド脇に広帯域地震観測点を設置することに決めた。また、現地の通信インフラ状況も併せて調査したところ、NTTの固定電話回線や第三セクターの高速インターネット回線などは無線通信のため、悪天候時に通信断が発生することが分かった。したがって、島内の大部分で安定して通信できる NTT ドコモの 3G や LTE の回線を使用することにした。

3. 臨時観測点の設置

沖の島小学校において地震観測を行うことを決めたが、長期的スロースリップイベントの兆候が GNSS 観測網の解析結果から見られた (小原ほか, 2015) ため、2014 年 10 月 15 日に急遽、臨時観測を行った。商用電源が取れ、時刻校正用の GPS 信号が受信でき、人の出入りも限られる沖の島小学校体育館の半地下部倉庫 (建屋の基礎コンクリート上) に臨時的広帯域地震観測点を設置した (図 4)。

卓越する周期が 10 秒前後である浅部超低周波地震を検

出するため、地震計は周期 100 秒から 50 Hz まで捉えることができる Guralp 社製 CMG-3T を選択した。地震波形を収録するロガーには、リモート操作で CMG-3T のマスポジション調整コマンドやロック/アンロックコマンドを出力できる白山工業社製 LF-1100R+LF-2100R を用いた。地震研究所へのデータ転送は、NTT ドコモの回線インフラを利用できる MVNO を利用した。通信モジュールに NTT ドコモ社製 L-05A を用い、それを接続するルーターはセンチュリーシステムズ社製 NXR-120/C を用いた。

沖の島は、海底ケーブルにより四国本土から電気の供給を受けているが、台風などの強風で送電線の地上部がダメージを受け、停電する可能性がある。そこで、バックアップ電源として、シールドバッテリー 20 Ah を 4 並列して合計 80 Ah とし、バッテリーチャージャー (電菱社製 BP-1210) にてバッテリーの充電および各機器への給電を行った。但し、テレメーター機器は消費電力が大きいため、バックアップ系から除外し、観測の持続時間を優先とした。これらの構成により、バックアップ電源にて約 1 週間の観測が可能となる。

臨時観測点の設置風景を図 5 に示す。広帯域地震計である CMG-3T は気温の変化が出力に影響するため、厚さ

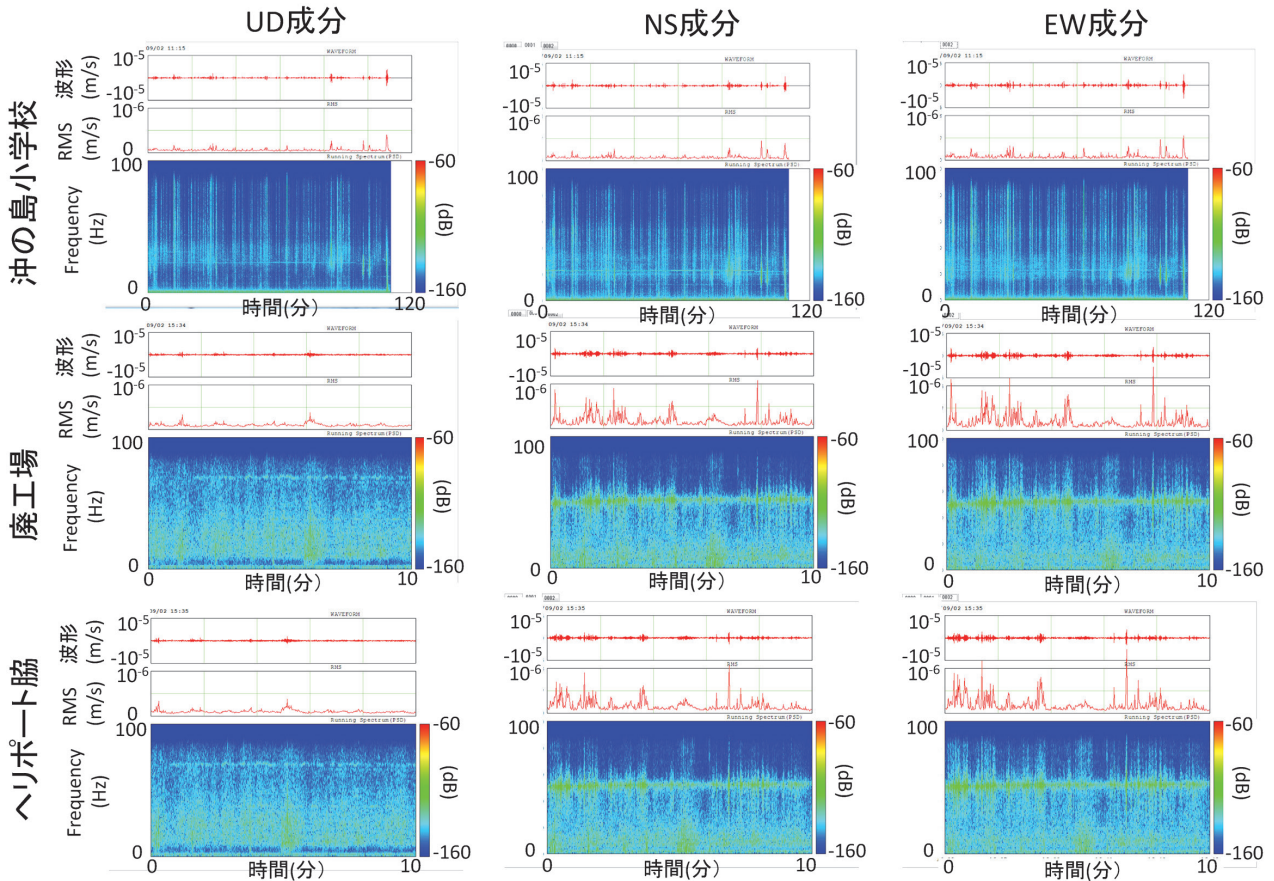


図 3. ノイズ調査結果

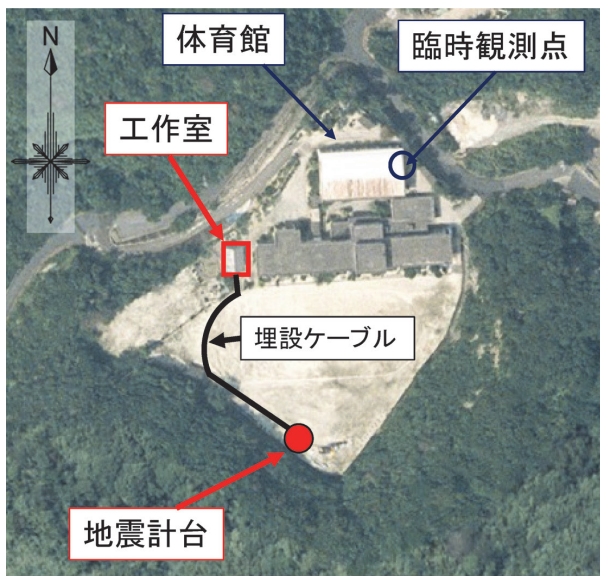


図 4. 沖の島小学校の航空写真 臨時観測点、本観測点の地震計台と工作室(局舎)をそれぞれ示しており、その距離はおおよそ 100m である。国土地理院撮影の空中写真を使用した

10cm のスタイロフォームを組み合わせて接着した直方体の断熱カバーにて覆った。ローガーやバックアップ電源、テレメーター機器はプラスチックボックスに収め、児童が

誤って感電しないよう配慮した。また、NTT ドコモの携帯通信状況をよりよくするため、外部アンテナを東側の窓に貼り付けた。

臨時観測点から得られたデータを確認したところ、UD 成分には大きな問題はみられないものの、水平成分の長周期帯域に大きな変動が見られた(図 6 (a))。また、その長周期変動は NS 成分と EW 成分が逆位相であり、10 分間のパーティクルモーションを描くと、およそ北西から南東の直線を示した(図 6 (b))。この NS/EW 成分の長周期帯域の変動は、数時間~1 日程度の間隔で増減していた。沖の島から 25~40 km 離れているが、気象庁 AMeDAS 観測点(清水観測点と宿毛観測点)の風速の増減と関係することがわかり、臨時観測点の環境は強風や強風によって励起される波浪などに影響される可能性が高い。これらはローカル~メソスケール(数十 km 程度)の気象現象であるので、同様の空間スケールである地盤などの立地条件や体育館の構造などにも水平成分長周期帯の大きな変動の要因があると考えられる。

沖の島は急峻な地形であり、沖の島小学校は山の斜面を大きく掘削しており、図 4 の航空写真からもグラウンド東側から西側にかけて岩盤を大きく掘削して造成した跡が見

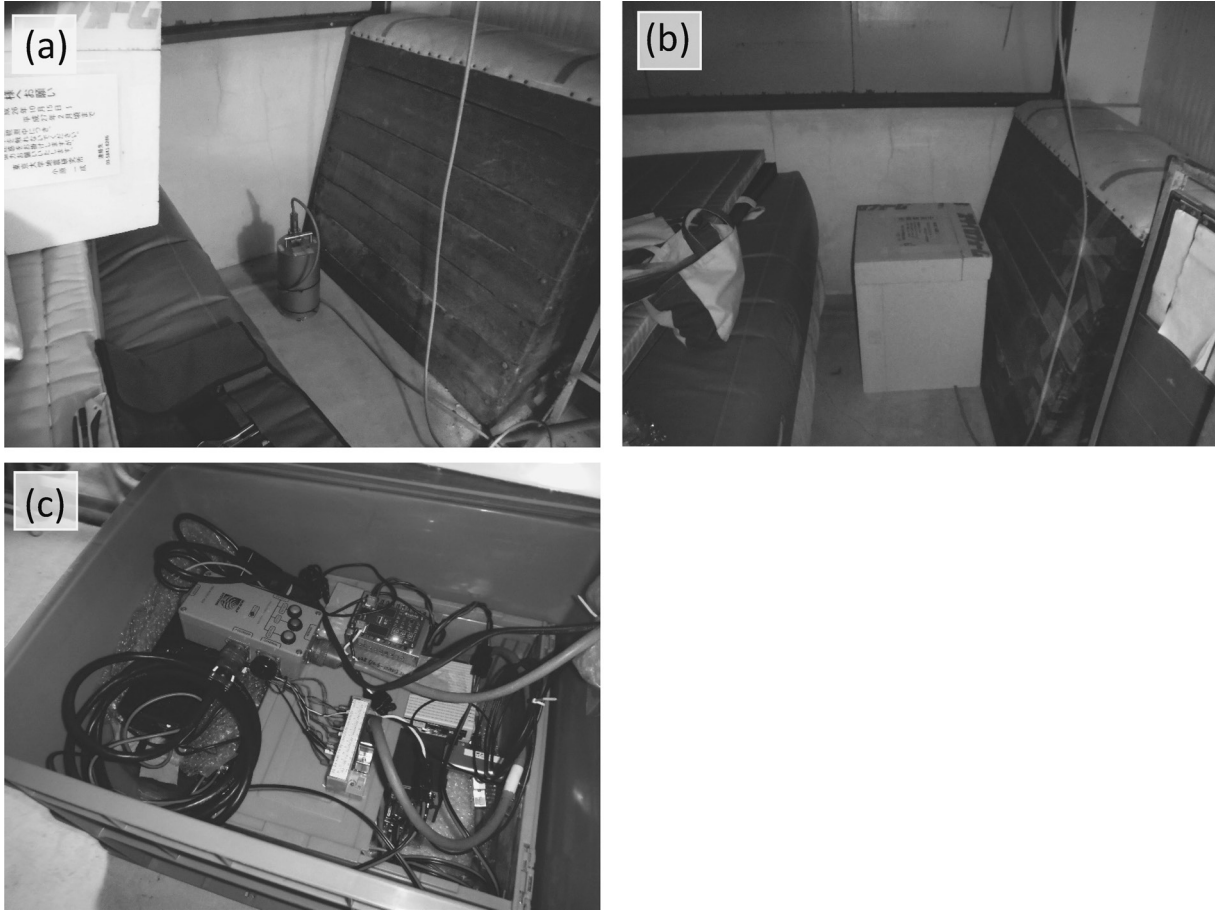


図 5. 臨時観測点設置風景 (a)CMG-3Tは人が触りにくい場所に設置した (b)CMG-3Tに断熱カバーをかぶせた (c)ロガーやブレイクアウトボックス バックアップ電源はプラボックス内に収めた

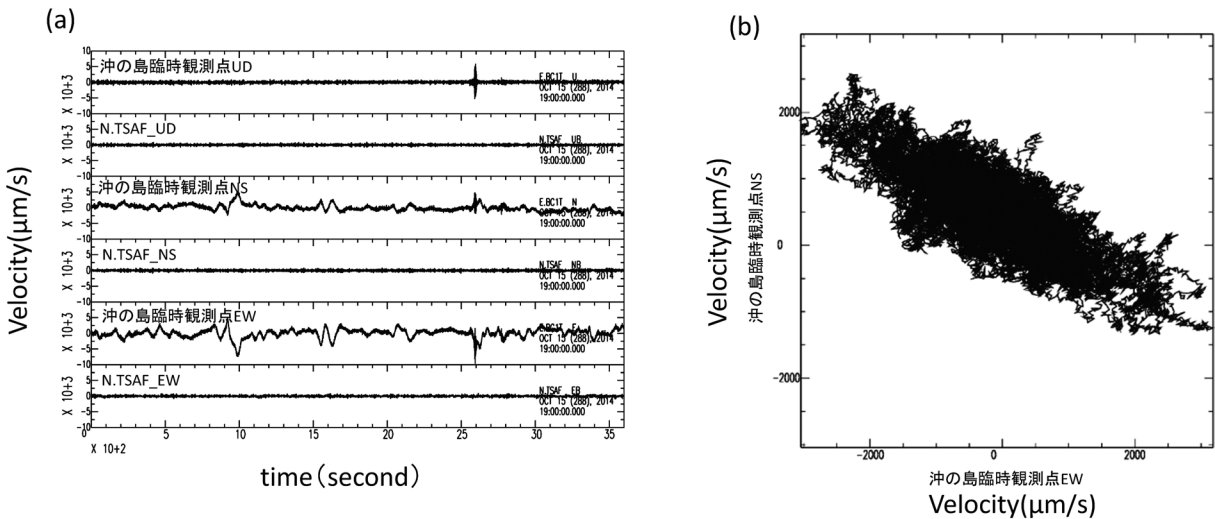


図 6. (a) 沖の島臨時観測点と近隣の F-net (N.TSAF, 位置は図 2 を参照) のバックグラウンドノイズ波形 (1 時間) (b) 沖の島の NS 成分と EW 成分を用いたパーティクルモーション (10 分)

て取れる。岩盤掘削後は、グラウンドや校舎を作るために盛土されている。体育館は斜面の谷側に位置するため、もっとも盛土が厚いと考えられる。すなわち上下動成分に対し

て水平動成分が動きやすい軟弱な地盤である。次に、体育館は巨大な中空構造物であり、外壁に強い風をうけると体育館全体がゆがむと考えられ、これが体育館の基礎コンク

リートまで影響を及ぼすかもしれない。

4. 地震観測点のデザイン

浅部超低周波地震は卓越する周期が10秒程度であるため、臨時観測点で見られる長周期帯の変動は極力抑える必要がある。そこで、地震計台は、グラウンドを掘って強固な岩を露出させ、アンカーを打ち込んでコンクリートの基礎を直接打設することで、地動ノイズの発生を極力押さえることにした。また、広帯域地震計の温度変化による機械ノイズを減らすため、なるべく深く掘り進めて断熱効果を高めることを考えた。

このような地下空間を作る場合は、直方体より円筒形の方が強固である。2011年度に茨城県の5箇所に設置された広帯域地震観測点では、ヒューム管を鉛直方向に設置して空間を作っている(宮川・渡邊, 2012)。今回のケースでは2m以上の深さに及ぶため、地震計の設置のことを考えると、大人が内部で作業できる空間を確保する必要がある。しかし、沖の島は離島であるため、複雑な工事をするためには、専用の重機を本土から輸送する必要があり、費

用が増大する。そこで、地下に配管、配線する際に使われる組立式マンホールを利用した。

組立式マンホールは、様々な直径、長さの鉄筋入りマンホールを組み合わせてことができ、耐震性が高く耐用年数も数十年を超える。施工は移動式クレーンを兼ねるバックホウが1台あれば足りるため、沖の島においても施工が可能である。地震計台の概念図を図7に示す。今回は、施工を簡単かつ構造を強固にするため、組立式マンホールの下部を基礎と一体化した。

局舎の設計については、商用電源を引き込む電柱を立て、そこに耐候性のキャビネットを設置する方法がここ数年の標準であったが(例えば、森ほか, 2014)、沖の島には電柱を立てる重機がないため、しばらく使用する予定のない工作室の一角を間借りした。工作室から地震計台までは直線距離で約50m離れているが、グラウンドのトラックを迂回させると約80m離れているため(図4)、その間を有線でつなぐ必要がある。使用する地震計は臨時観測点と同じCMG-3T(固有周期100秒)であり、もし多芯のセンサーケーブルを80m伸ばすとすると、回線毎に雷対策を施す

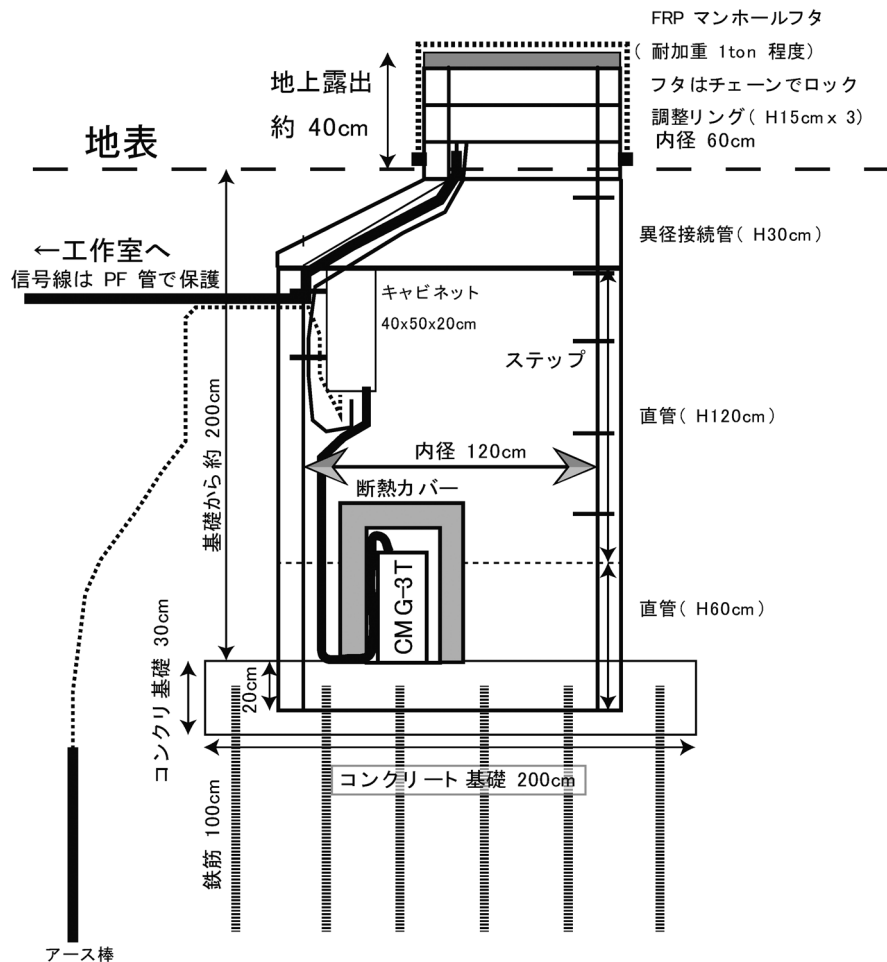


図7. 地震計台の概念図

必要があるため簡単ではない。一方で、白山工業製の LF シリーズにおいて、LF-1100R（コントローラー）と LF-2100R（デジタイザ）の接続は Controller Area Network (CAN) が採用されており、4 芯のケーブルで済むため、その雷対策は容易である。そこで、地震計台には LF-2100R を配置し、約 80m の CAN 用通信ケーブル（昭和電線 TDN24U-100G）を介して工作室の LF-1100R と接続し、その両端に CAN 通信用避雷器（エム・システム技研社製 避雷器 MD-DNS）を取り付けた。テレメーター方法は、臨時観測点で安定して通信できた実績のある MVNO を利用した。使用機器は臨時観測点と同じく、通信モジュールに L-05A、それを接続するルーターはセンチュリーシステムズ社製 NXR-120/C を用いた。

5. 沖の島広帯域地震観測点の設置

宿毛市教育委員会、沖の島小学校、施工業者との協議や調整を終え、2015年2月12日より施工を開始した。第一に、最も時間のかかる地震計台の施工から始めた。設置予定点（図4）をバックホウのショベルでおよそ1m掘り進めると硬岩が露出した。そこでショベルをブレイカーに換装し、硬岩を破壊しながら約2.2mまで掘り進めた（図8）。

可能な限り岩盤の底面を水平に仕上げ、鉄筋アンカーを計25本打ち込んだあと、4箇所に高さ10cmの木製スパー

サーを置き、組立式マンホールの直管（内径120cm、長さ60cm）を据え置いて、コンクリートを底面から約30cmの高さまで流し込んだ。コンクリートの表面は、それを流し込んだ直後に1回、半日後に1回、左官職人により平らに仕上げられた（図9）。

2段目のマンホール直管にコンクリートドリルで配管を通す穴を開けるとともに、同じくドリルで4箇所に穴を開けてボルトを差し込み、コンクリートボンドで固めて樹脂製のキャビネットを据付けた。また、地震計を覆う断熱カバーも臨時観測点と同じく10cm厚のスタイロフォームで組み上げた。

地震計台のコンクリートが固まったため、2月16日に地震計台の設置施工を再開した。マンホールの繋ぎ目には Oリングをかませ、シール剤を塗りこんで防水とする作りである。バックホウでマンホールの周りに土を戻して振動コンパクターで締め固めた（図10）。その後、マンホール内側の隙間をシール剤で埋め、また、あらかじめ信号線を通しておいたケーブル保護管をマンホールに空けた穴へ通し、隙間をシール剤で埋めた（図10）。また、マンホールの口径が60cmであり、地震計を覆う断熱カバーが通らないため、あらかじめ中に入れておいた。その後、グラウンドのトラックを迂回するように信号線保護管（信号線を既に通している）を埋設し、工作室内に引き込んだ。

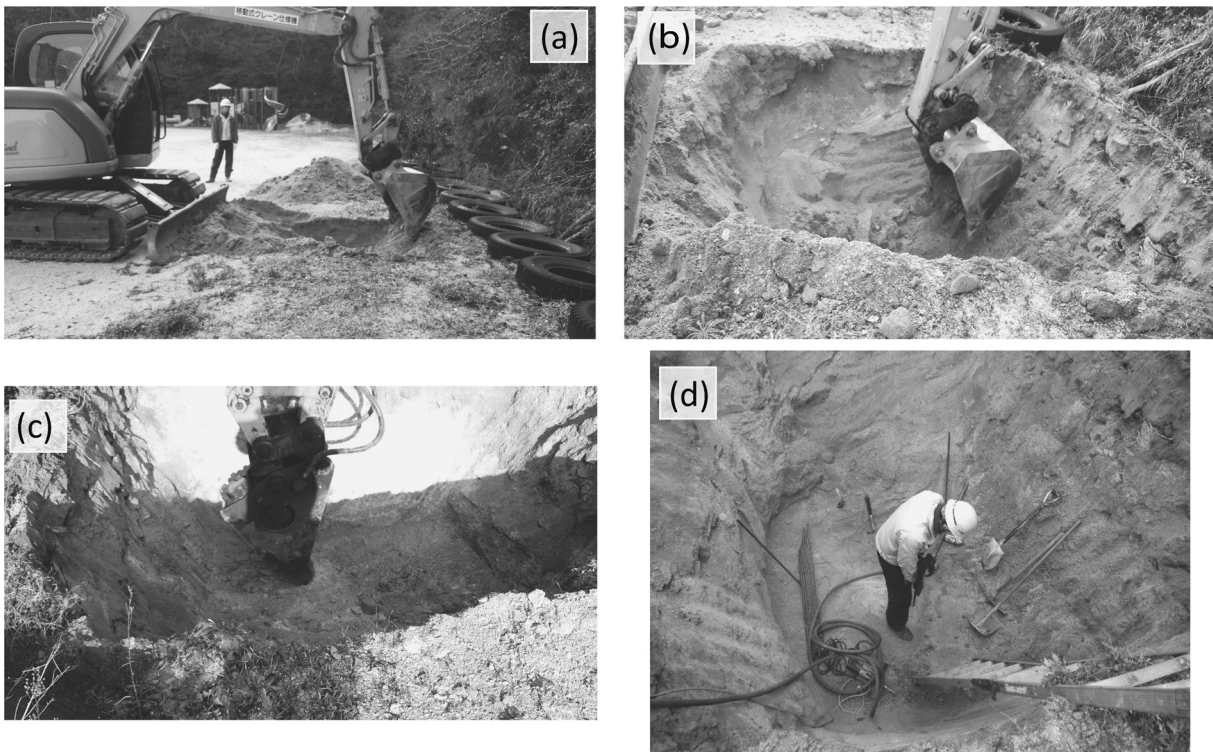


図 8. バックホウによる地震計台設置点の掘削
 (a) 4m²の空間を掘削 (b) ショベルで掘り進める
 (c) およそ1mで硬岩が露出したのでブレイカーで破碎して掘り進める
 (d) 1mの鉄筋アンカーを打ち込む様子

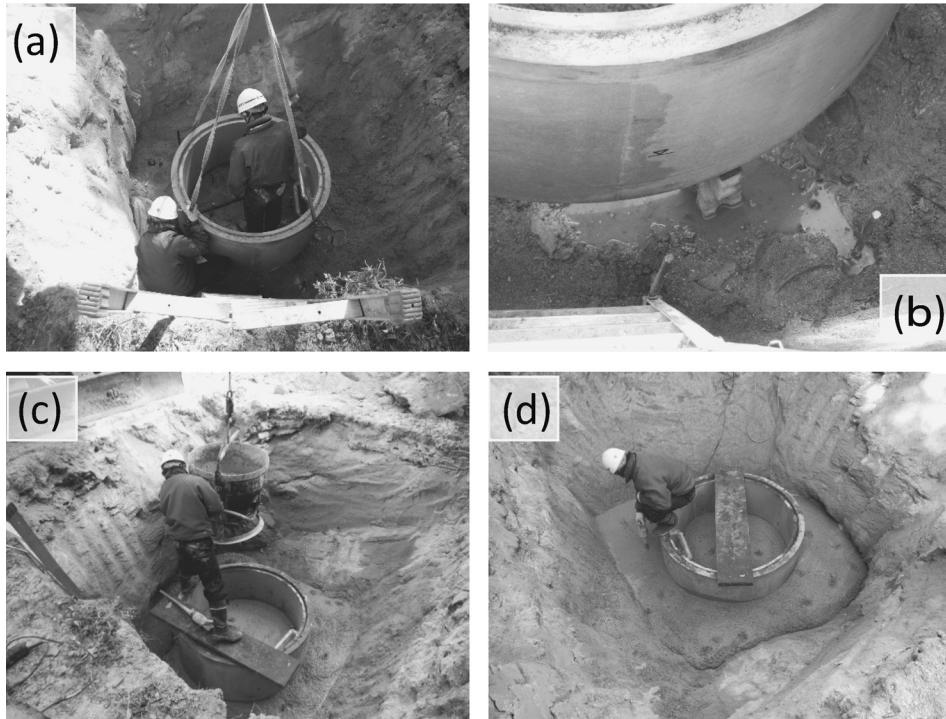


図 9. 地震計台の基礎部分の施工 (a) 長さ 60cm 内径 120cm の直管を移動式クレーンで据える (b) 4 箇所木製の下駄をはかせ水平を取る (c) コンクリートを流し込み直管ごと固める (d) 職人によりコンクリートの表面を仕上げる。このとき、直管が長すぎると仕上げ作業が難しくなる点に注意が必要である。

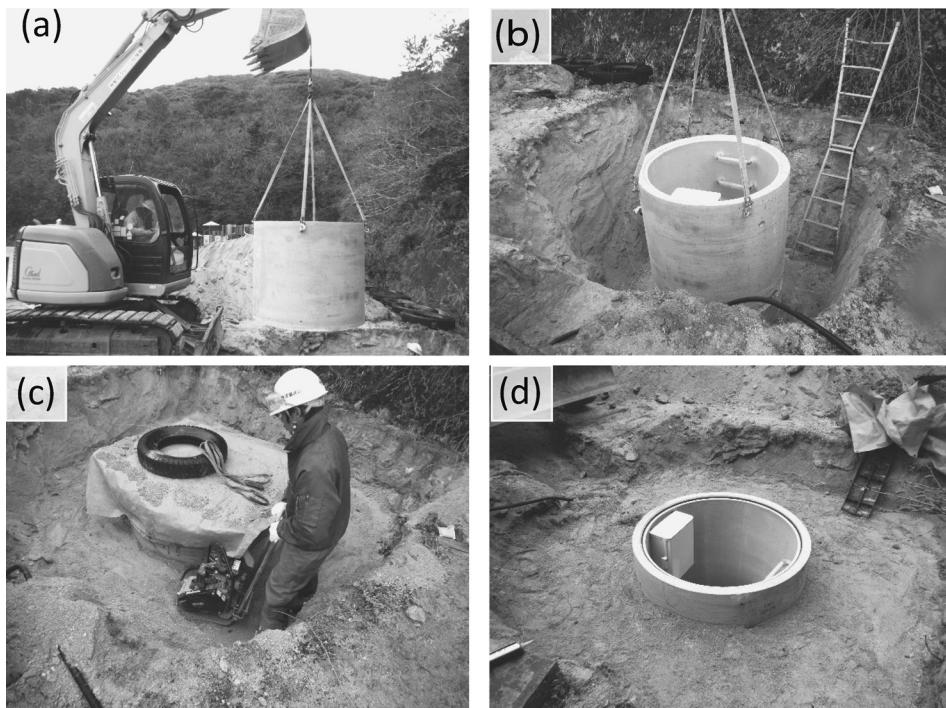


図 10. 組立式マンホール 2 段目の据付風景 樹脂製キャビネットを取り付けた状態で組み付け、周りの土を戻して締め固めた

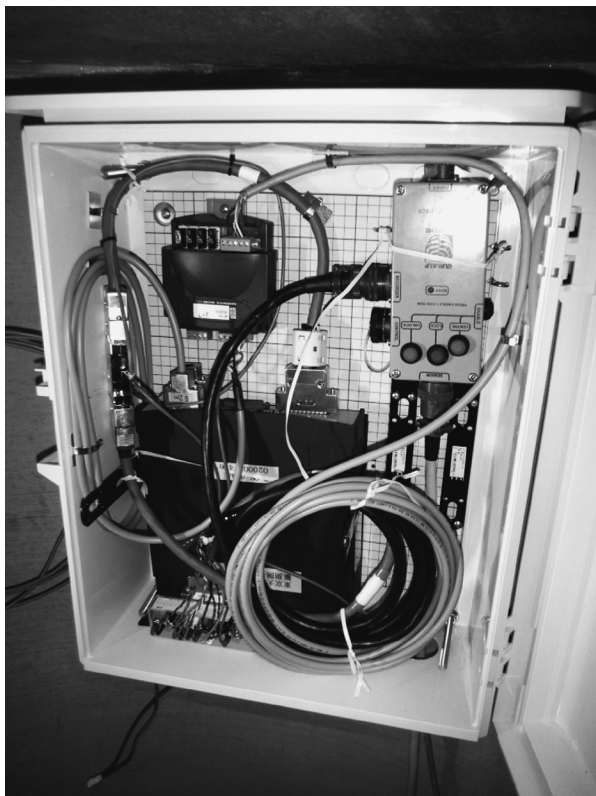


図 11. 地震計台内のキャビネット LF-2100R (デジタルイザ), CAN 通信用避雷器, ブレイクアウトボックスを木板に固定した. センサーケーブルはブレイクアウトボックス下方の穴から通しており, 湿気の流入を極力防ぐため油粘土で塞いだ.

2月17日に組立式マンホールの上部を据付けて土を埋め戻し, 地震計台が完成した. 地震計台内において, ジャイロにより方位測定を行ったところ, ロールとピッチはそれぞれ 0.15° と 0.31° であり, 基礎コンクリートの仕上げは良好であった. 地震計台内のキャビネットにLF-2100RやCMG用ブレイクアウトボックス等の機器を設置した後(図11), CMG-3Tを真北に合わせて水平に設置した.

工作室内の局舎は日東工業社製耐候性キャビネットRA25-66にアングルで組んだ土台に載せて床に据え置いた. このキャビネットにはLF-1100R (コントローラー), CAN 通信用避雷器, バックアップ電源 (105 Ah 鉛蓄電池 + 充電器 BP1210), 12V を 24V に昇圧する LVD1224, テレメーター装置を収めた (図12).

LF-1100R に接続する GPS アンテナは工作室外壁にヘリカル型を取り付ける予定であったが, 外壁の木板が想像以上に劣化しており, ネジ止めしても強風で飛ばされる危険があったため, 工作室西側の窓付近に設置した. 電波受信状態をなるべく良い状態にするため, LF を起動して衛星捕捉数を計測し, 安定して衛星を 4~6 個捕捉できる場所を見つけて固定した. また, 念のため LF の設定を GPS 位置固定モードにし, 衛星を 1 つでも捕捉すると時刻補正



図 12. 工作室内の局舎 (キャビネット) 上段からテレメータユニット, LF-1100R, CAN 通信用避雷器, LVD1224 (12V から 24V への昇圧), バッテリー充電器 BP1210, G&Yu 社製 105 Ah 鉛蓄電池, アースは工作室の庭にアース棒を 3 本打ち込んだ.

を行うようにした.

全ての接続を終え, 機器の電源を入れて観測状態にし, 地震計の極性チェック, テレメータデータの確認などを行い, 全て正常であった. 最後にマンホールのフタ (FRP 製で耐過重 1 トン) を載せ, チェーンと南京錠でフタをロックし, 耐候性のグリーンシートを被せて養生とした (図13).

6. 本観測点と臨時観測点のデータ比較

臨時観測点は, 本観測点とのデータの比較検討のため, 2015年3月23日まで稼働させた. 図14は2015年3月1日05:00から05:10までに得られた両観測点の波形である. 同時刻に近隣では地震が発生していないので, バックグラウンドのノイズ記録である. 同日は比較的風が強く, 臨時観測点の水平成分の長周期帯の変動が大きい, 本観測点では, その変動が $1/10$ 以下の振幅に抑えられている. また, UD成分の振幅も小さくなっており, 本観測点と臨時観測点でおおよそ100mしか距離が離れていないことを勘案すると, 岩盤に打設したマンホールタイプの地震計台はノイズ低減の効果があったと考えられる.

次に UD 成分と NS 成分のスペクトルの比較を図 15 に

示す。UD 成分は 0.1 Hz 付近を除いてほぼ全帯域で臨時観測点のスペクトル強度が高く、本観測点はかなりノイズが軽減されている。また NS 成分では、全帯域で 10 倍程度高いスペクトル強度が見られ、本観測点は大幅にノイズが軽減されている。これにより、本観測点において豊後水道で発生する浅部超低周波地震を観測する体制が整った。

長周期が卓越する遠地地震の波形を比較するため、2015 年 2 月 20 日 13:25 ごろに宮城県沖で発生した M6.1 の地震の波形を図 16 に示す。13 時 28 分ごろ P 波が到達し、その後、様々な長周期の波を捉えているが、臨時観測点の水平成分の最大振幅は図 15 の強風環境下のノイズとほぼ同じレベルであった。同日は気象が比較的穏やかであり、臨時観測点の水平成分において長周期のノイズは見られていない。

それらのスペクトルを計算すると、臨時観測点の UD 成分は本観測点に比べて 3~40 Hz 付近においてスペクトル強度の幅が広がっている (図 17)。NS 成分においても UD 成分と同様に 3~40 Hz 付近において臨時観測点のスペクトル強度の幅が広い。一方で、3 Hz から 0.02 Hz (周期 50 秒) においては鉛直、水平成分共にスペクトル強度に有意な差が見られなかった。浅部超低周波地震は卓越する周期が 10 秒程度であるため、天候が比較的穏やかな日に臨時観測点で得られた水平成分の波形は解析に使用する

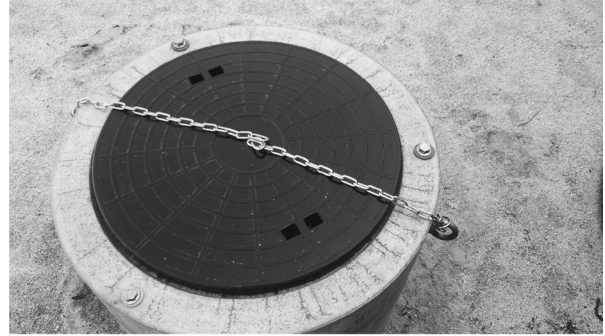


図 13. 完成し、養生された地震計台 マンホール上部には FRP 製のフタを置き、チェーンと南京錠でフタをロックして児童があやまって落ちることのないようにした。最後に耐候性のグリーンシートを被せて雨避けにし、目立たないようにした。

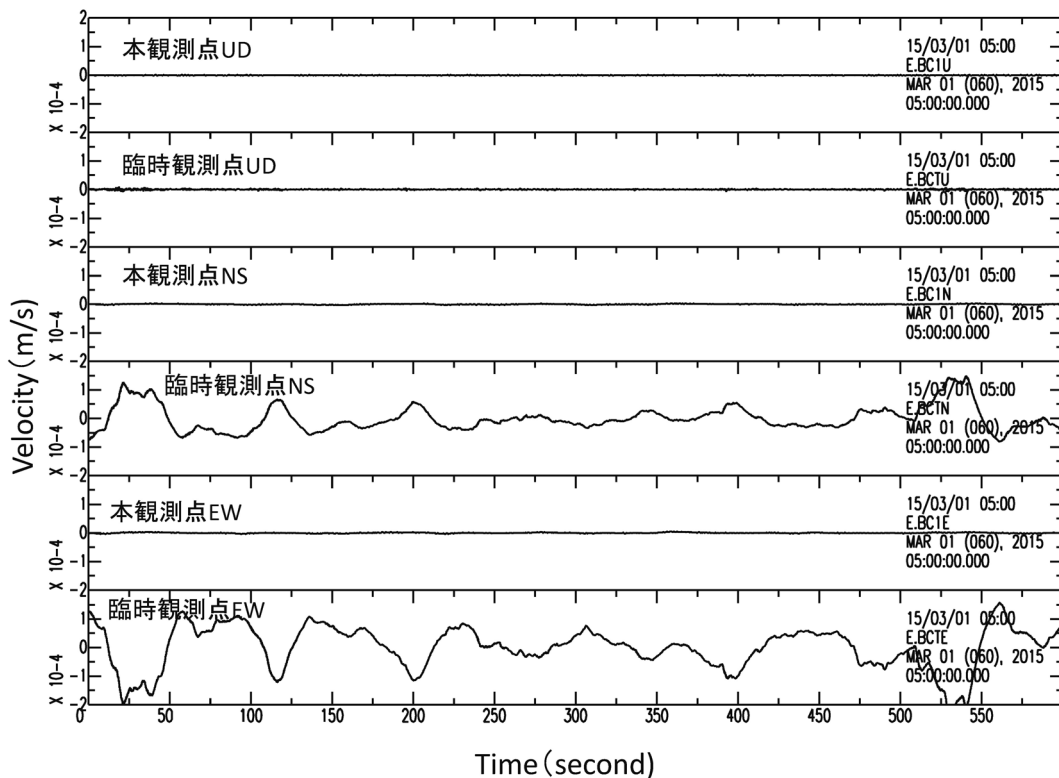


図 14. 本観測点と臨時観測点の波形比較 (2015 年 3 月 1 日 05:00 から 10 分間) NS 成分、EW 成分の長周期帯の変動が劇的に小さくなっている。

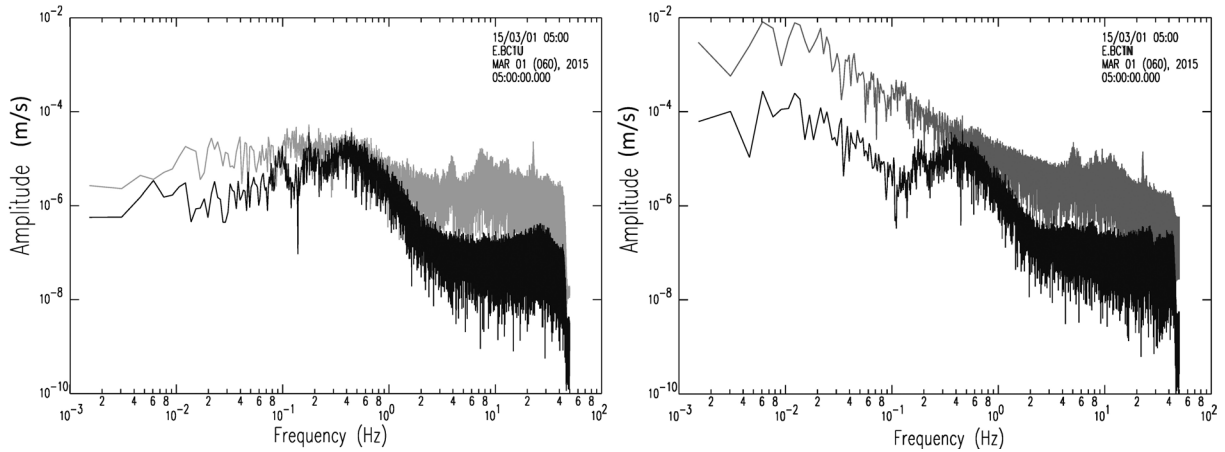


図 15. 本観測点と臨時観測点の振幅スペクトルの比較 (2015 年 3 月 1 日 05:00 から 10 分間). 左が UD 成分, 右が NS 成分であり, グラフの黒線が本観測点, 灰色の線が臨時観測点である. 特に臨時観測点の NS 成分は全周波数帯でスペクトル強度が高い.

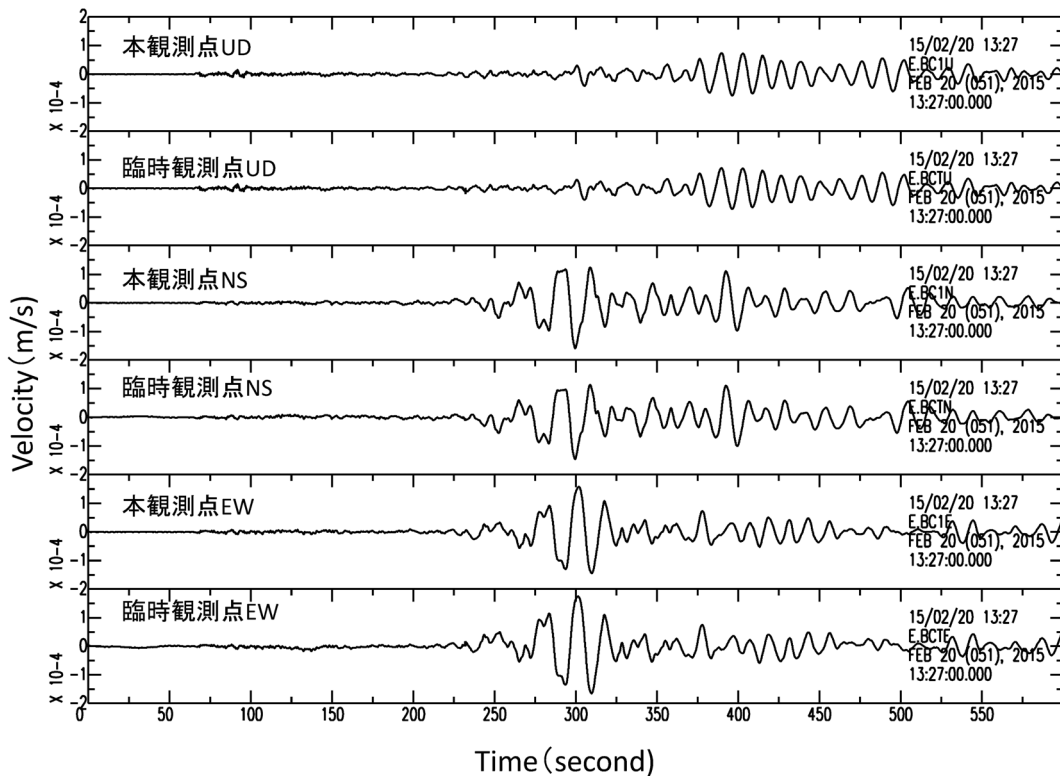


図 16. 本観測点と臨時観測点の波形比較 (2015 年 2 月 20 日 13:27 に宮城沖で発生した M6.1 の波形 (10 分間))

ことができると考えられる.

体育館半地下部に設置した臨時観測点と本観測点の間で見られた水平成分の長周期帯変動の大きな差は, 荒天時のバックグラウンドノイズにのみ現われるが, 長周期の卓越する遠地地震ではほとんど見られなかった. このことから, 荒天時における臨時観測点の水平成分長周期変動は, 地震波や波浪起源の波など地下を伝わって到達した波よりも, ローカル~メソスケールな気象現象である風によって体育

館や地盤が揺らされたことに主な原因があると考えられる. 今後, 広帯域地震計を用いて観測する場合は, できる限り構造物内の設置を避け, 地震計を埋設することが長周期ノイズを低減する有効な手段であろう.

沖の島広帯域地震観測点の観測点コードは E.BC1 と名づけられた. BC は豊後水道 (Bungo current) の略である. 2015 年 6 月には四万十深木 (E.BC2) および宇和島横川 (E.BC3) が完成し, これら 3 つの観測点は安定した観測

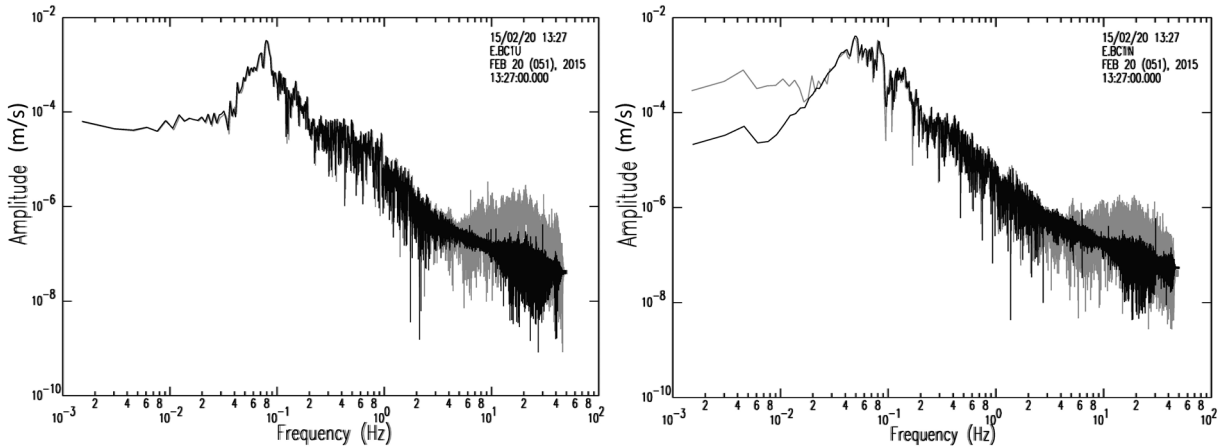


図 17. 本観測点と臨時観測点の振幅スペクトルの比較（2015年2月20日13:27宮城沖 M6.1の10分間波形の解析）左がUD成分、右がNS成分であり、グラフの黒線が本観測点、灰色の線が臨時観測点である。

を続けている。

7. 浸水対策

十分な比較データが取得できたため、2015年3月23日に臨時観測点を撤収した。その際に地震計台の内部を点検すると、およそ1cm程度の深さで水が溜まっていた（図18）。また、組立式マンホールの隙間を埋めるシール剤がまだ完全に乾いていない状態であった。

壁面を入念に調べると、マンホールの1段目と2段目の間からわずかに浸水の後が見られた。2段目のマンホール直管を載せる際に、位置が少しずれたので、複数回置きなおしたため継ぎ目のパッキンやシール剤に不均一が生じたものと推測された。また、浸水箇所は、マンホールの継ぎ目が1~2mmほどずれており、その部分のシール剤はまだ乾ききっていなかった。継続的な浸水によりシール剤の固化を阻害したものと考えられる。

そこで、2015年6月12日に、マンホールの1段目と2段目の継ぎ目に1mm厚の亚克力板を強力接着剤（セメダイン製スーパーX）で貼り付けて隙間を埋めた。また、ケーブル保護管に油粘土を詰め、マンホールフタの受け枠の隙間をシール剤で埋めて湿った空気の出入りをなるべく少なくなるよう対策を行った（図19）。

2015年9月に現地業者の目視にて浸水がないことを確認しており、浸水対策は有効であったと考えられる。また、この地震計台は岩盤を掘削して基礎を築いたため、水を外に逃がすことができないが、立地条件によっては水抜き穴などを設置することも有効な対策であろう。

8. まとめ

豊後水道の長期的スロースリップイベントと同時に発生する浅部超低周波地震を観測するため、四国において震源にもっとも近い高知県宿毛市沖の島に注目した。島内で地



図 18. 地震計台内への浸水

震観測が可能かどうか事前調査および現地でのノイズ調査を行った結果、沖の島小学校に広帯域地震観測点を設置することにした。調査直後に長期的スロースリップイベントの兆候が見られたため、臨時の広帯域地震観測点を沖の島小学校体育館に設置した。しかし、鉛直成分の波形は近隣の定常的地震観測点と比べて遜色ないものの、水平成分の長周期帯に大きな変動が見られた。特に荒天時に長周期変動が大きくなったため、体育館の構造や地盤などが影響していると推測された。

そこで、新たな試みとして、小学校グラウンド脇に2m超の穴を掘り、強固な岩盤に組立式マンホールを応用した地震計台を打設した。その結果、荒天環境下において、臨時広帯域地震観測に比べ、本観測点は水平成分の長周期帯域の変動が1/10以下にまで低減され、鉛直成分および水平成分共に浅部超低周波地震を観測する体制が整った。一方で、比較的気象が穏やかな状況で得られた遠地地震の波

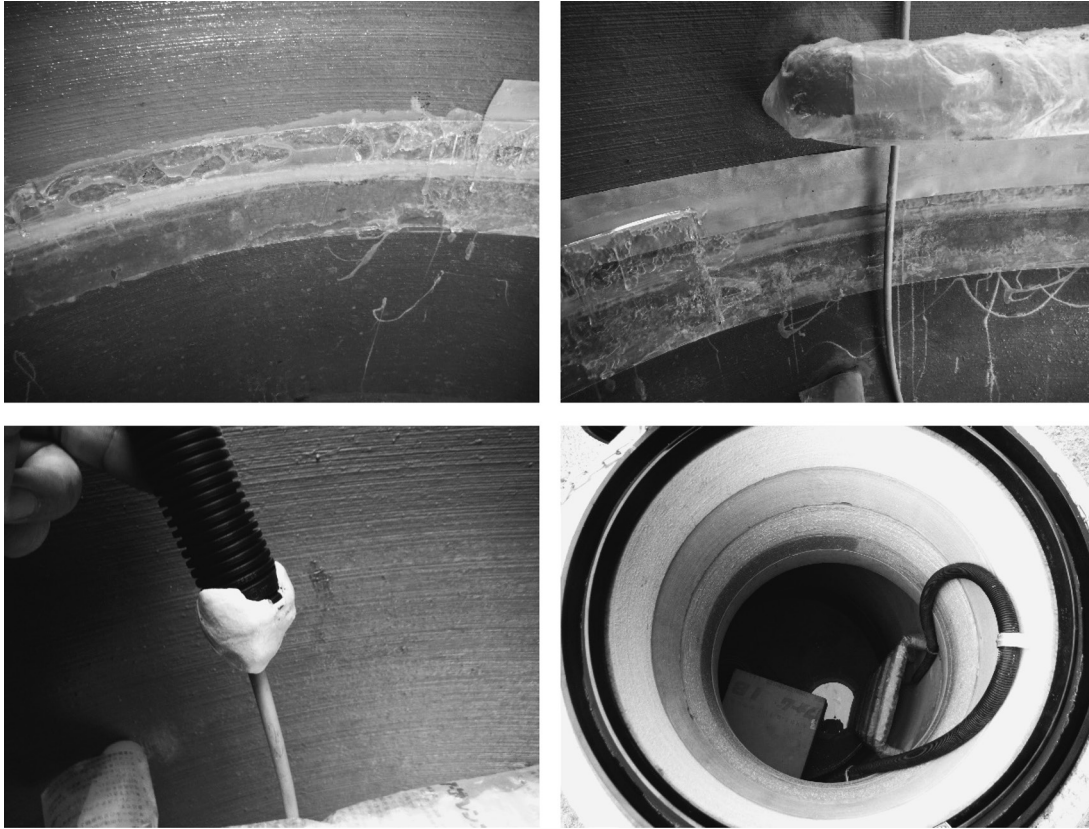


図 19. 地震計台内の浸水対策 マンホールの継ぎ目に 1mm 厚の亚克力板を強力接着剤で貼り付け、浸水経路をせき止めた。また、ケーブル保護管部分に油粘土を詰め、マンホールフタの受け枠の隙間にシール剤を塗布して湿った空気の入りをなるべく少なくなるよう対策を行った。

形は、長周期帯の変動が卓越していたにも関わらず臨時点と本観測点でよく似ていた。従って、臨時観測点に見られた長周期変動は主に強風によって体育館が揺らされたことや、体育館を支える地盤が比較的厚い盛土であることなどが主な要因であると考えられた。今後、広帯域地震計を用いて観測を行う際は、なるべく構造物内の設置を避け、硬い地盤まで掘り進めて埋設することが地動ノイズを軽減させるポイントであろう。

謝辞：沖の島広帯域地震観測点は、災害軽減のための地震火山観測研究「プレート境界すべり現象モニタリングに基づくプレート間カップリングの解明」及び観測開発基盤センター業務にて行われました。沖の島にオンライン広帯域地震観測点を設置するにあたり、高知県宿毛市教育委員会の立田壽行教育長、沢田清隆教育次長、宮本健児学校再編係長、沖の島小学校弘畑佳之校長、また沖の島の住民の皆様には地震観測についてのご理解と格別のご配慮をいただきました。東京大学地震研究所技術部内田正之氏には部材加工やキャビネット土台の製作のご協力をいただきました。同技術部の阿部英二氏、安藤美和子氏、西本太郎氏、宮川幸治氏、渡邊篤志氏、東京大学地震研究所観測開発基盤センターの酒井慎一准教授には予備調査の解析や地震計

台製作、観測点機器設置に関し多大なるご協力をいただきました。地震研究所テレメーター室の出川昭子氏には、LF ロガーやルーターの設定、ならびに地震研究所側のデータ受信サーバーの準備にご尽力いただきました。記して深く感謝いたします。

文 献

- 小原一成・高木涼太・松澤孝紀, 2015, 2014 年豊後水道長期的スロースリップイベントの発生と今後について, 地震予知連絡学会報, **93**, 344-348.
- 宮川幸治・渡邊篤志, 2011, 千葉県と茨城県におけるオンライン広帯域地震観測網の整備, 震研技報, **17**, 23-41.
- 森健彦・藤田親亮・田中伸一・西本太郎・増田正孝, 2014, 衛星回線型地震観測点における設置方法の標準化へ向けた取り組み, 震研技報, **20**, 14-18.
- 東京大学地震研究所ニュースレター PLUS No. 16, 2013.
- Hirose, H., and K. Obara, 2005, Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan, *Earth Planets Space*, **57**, 961-972.
- Hirose, H., Y. Asano, K. Obara, T. Kimura, T. Matsuzawa, S. Tanaka, and T. Maeda, 2010, Slow earthquakes linked along dip in the Nankai subduction zone, *Science*, **330**, 1502.
- Obara, K., 2002, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679.

- Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara, 2004, Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23602.
- Obara, K. and Y. Ito, 2005, Very low frequency earthquake excited by the 2004 off the Kii peninsula earthquake: A dynamic deformation process in the large accretionary prism, *Earth Planets Space*, **57**, 321-326.
- Tanioka, Y. and K. Satake, 2001, Detailed coseismic slip distribution of the 1944 Tonankai Earthquake estimated from tsunami waveforms, *Geophys. Res. Lett.*, **28**: doi: 10.1029/2000GL012284. ISSN: 0094-8276.