

広帯域地震観測点選定のためのノイズ調査における 簡便な地震計設置方法の検討

佐伯綾香[†]・大塚宏徳^{*}・安藤美和子^{*}・宮川幸治^{*}・藤田親亮^{*}・竹尾明子^{**}

Simplified Installation for Noise Survey before Constructing a Broadband Seismic Station

Ayaka SAIKI[†], Hironori OTSUKA^{*}, Miwako ANDO^{*}, Koji MIYAKAWA^{*},
Chikaaki FUJITA^{*} and Akiko TAKEO^{**}

はじめに

地震観測では、地震計を用いて地面の揺れを計測することが観測の基本である。しかし観測データには、地震動以外のさまざまなノイズが含まれている。例えば、波浪・風・雨などの自然現象や交通機関・工場などの人間活動によって引き起こされる地動ノイズ、商用電源や雷サージなどに起因する電気ノイズ、地震計や収録装置自身が持つ自己ノイズなどである。

各種ノイズの中で、地動ノイズの大きさは、地震計の設置場所や設置方法に大きく依存するため、うまく選定することで大きくノイズを軽減することができる。一般に、柔らかい土よりも固い岩盤上に設置したほうがより明瞭に地震を記録することができ、地表に設置するよりも埋設設置したほうが、観測される地動ノイズが小さくなる傾向がある。特に広帯域地震計では、周囲の温度や気圧の変化に敏感に反応して周期数十秒以上の長周期ノイズレベルが変動することが知られている(吉田ほか, 2001)ことから、周囲の環境変動による影響を抑えることも重要となる。

地震観測点を構築する際、事前の地動ノイズ調査によって観測に適した場所を選定することは重要である。今回、文部科学省の新学術領域「スロー地震学」のA01班「海陸機動的観測に基づくスロー地震発生様式の解明」(課題

番号 16H06473)の一環で、卓越周期 10 秒から 100 秒の深部超低周波地震活動(Ito *et al.*, 2007)を観測することを目的とした新たな広帯域地震観測点を大分県に設置するにあたり、事前の地動ノイズ調査を行うこととなった。

事前の地動ノイズ調査を行う際、対象となる地域が遠く、荷物が多くなれば発送の手間や料金がかさみ、また作業時間が長くなると滞在時間が長くなるか観測期間が短縮される。即ち、観測データの質に支障がない程度であれば、より簡便な設置方法の方が準備や設置作業の時間が短縮できて好ましい。そこで今回、異なる 3 つの方法で広帯域地震計を設置して同時観測を行い、どの方法が地動ノイズ調査に適しているか検討したので報告する。

地震計設置方法

東京大学地震研究所 2 号館前にある植え込み脇の空き地(図 1)に広帯域地震計を 3 台設置し、2017 年 1 月 30 日から 31 日にかけて同時観測を行った。この設置場所は、地震研究所 2 号館から南に約 4 m, 1 号館から北西に約 15 m, また正門前の道路から東に約 80 m の所に位置する。

設置は下記の 3 つの方法で行った。

a) 地表設置

地面の上にコンクリート板(20 cm×20 cm×3 cm)を敷設し、地震計をコンクリート板に載せ、石膏で固定する(図 2a)。地震計はプラスチック製ボックスを被せて保護する。

メリット : シャベルや移植ごてが不要。

穴を掘る必要が無いため設置時間が短縮される。

デメリット : 石膏とコンクリート板が必要。

石膏の硬化を待つ必要がある。

2017 年 10 月 6 日受付, 2017 年 12 月 5 日受理。

[†] saiki@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, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

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

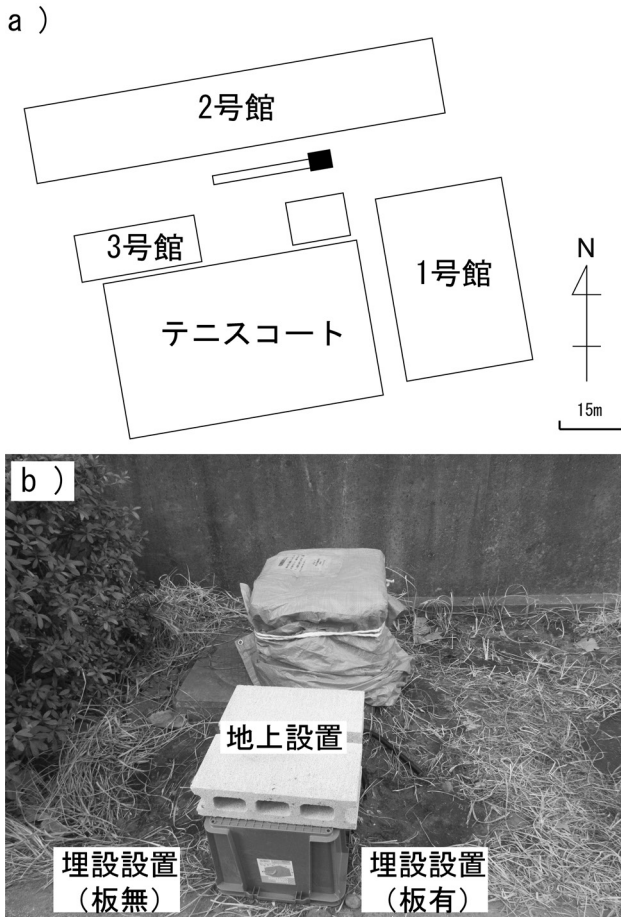


図 1. 地震計設置場所. a) 東京大学地震研究所見取り図. 黒四角: 設置場所, b) 設置写真. 地震計の設置方法は, 左から埋設 (コンクリート板無し), 地表, 埋設 (コンクリート板有り). 奥にあるのは収録機器とバッテリーを収納した箱.

b) 埋設設置 (コンクリート板有り)

地面に穴 (深さ: 約 30 cm, 直径: 約 25 cm) を掘り, 石膏を流し込んだ後コンクリート板 (20 cm × 20 cm × 3 cm) を水平に敷設し, 地震計をコンクリート板に載せ石膏で固定する (図 2b). 防水・防塵の為, 地震計はビニール袋に入れて保護する.

メリット : 地震計がしっかり固定される.
地表より温度変化が抑えられる.

デメリット: 準備物が多い.
コンクリート板を敷設できる大きさの穴を掘る必要がある.
石膏の硬化を待つ必要がある.

c) 埋設設置 (コンクリート板無し)

地面に穴 (深さ: 約 40 cm, 直径: 約 35 cm) を掘り, 底面に脚を外した地震計を直接設置する (図 2c). 地震計は防水・防塵の為, ビニール袋に入れ, 保護する.

メリット : 準備物が少ない.
石膏の硬化を待たなくて良い.

地震計 (高さ: 約 13 cm, 直径: 約 9 cm) が埋まる分だけ掘れば良い.

デメリット: 埋設時に周りの土をしっかりと固めないとい地震計の固定が不安定になる.

地震計の水平が取りづらい.

地震計は 0.01 秒から 100 秒の帯域で, フラットな特性をもつ 3 成分一体型の Trillium Compact (Nanometrics 社製) を使用し, 収録機器は LS-7000XT (白山工業製) を使用した. サンプル周波数を 100 Hz, AD 分解能を 24 bit に設定し, 12 V 105 Ah の鉛蓄電池を使用して観測を行った.

なお, 使用した地震計は事前に地震研究所 2 号館地下の地震計台で動作に問題ないことを確認している. 動作確認時のデータから, Trillium Compact は設置後 2 時間程度経過すれば, 出力が安定して解析に使えるデータが得られることも分かった.

連続波形記録

まず, 2017 年 1 月 30 日午後 6 時から 2017 年 1 月 31 日午前 9 時までの約 15 時間の上下動成分の連続波形記録を出力した (図 3). 波形モニターツール shmp (鶴岡, 2003) を用いて横軸 1 時間の時系列波形を 3 つの設置方法ごとに作成し, 波形の全体像を比較した.

夕方と朝方には, パルス状の波形が, 3 つの図に共通に同じような振幅で見られることから, この場所の地動をそれぞれ正しく捉えていたと言える. しかし, 地表設置の記録 (図 3a) のみ, 100 秒を超えるような長周期のふらつきが見られる. 観測期間中は, 日本だけでなく世界中でも, 特に顕著な地震が発生していなかったため遠地地震由来の表面波の可能性は低い. 埋設設置した波形記録 (図 3b, 3c) には見られないことから, 地表設置に特有のノイズが考えられる. この日は夕方から平均風速が 5 m/s 程度の北西の風が吹き, 瞬間風速が 10 m/s を超えることもあり, やや風が強い夜であった. よって地表設置では, 風による揺れの影響を大きく受けてしまうため, 地震計を埋設する必要があるのではないかと考えた.

スペクトログラム

次に, 地震波形の時間周波数解析ツール (宮川・酒井, 2008) を用いて, 周期解析を行った. 解析したい時間帯の WIN ファイルを作成して解析を行い, 単チャンネルの時系列波形とスペクトログラム (図 4, 図 5, 図 6) を作成した. 今回は時間幅 1000 秒のウィンドウの 50% をオーバーラップさせて周波数解析を行った.

長周期側では, 3 成分共にノイズレベルに差が見られ, 特に周期 30 秒より長周期側で顕著である. 研究のターゲットである周期 10 秒から 100 秒の帯域では, 埋設設置の上下動成分 (図 4b, 4c) では約 -160 dB ~ -90 dB だが, 地

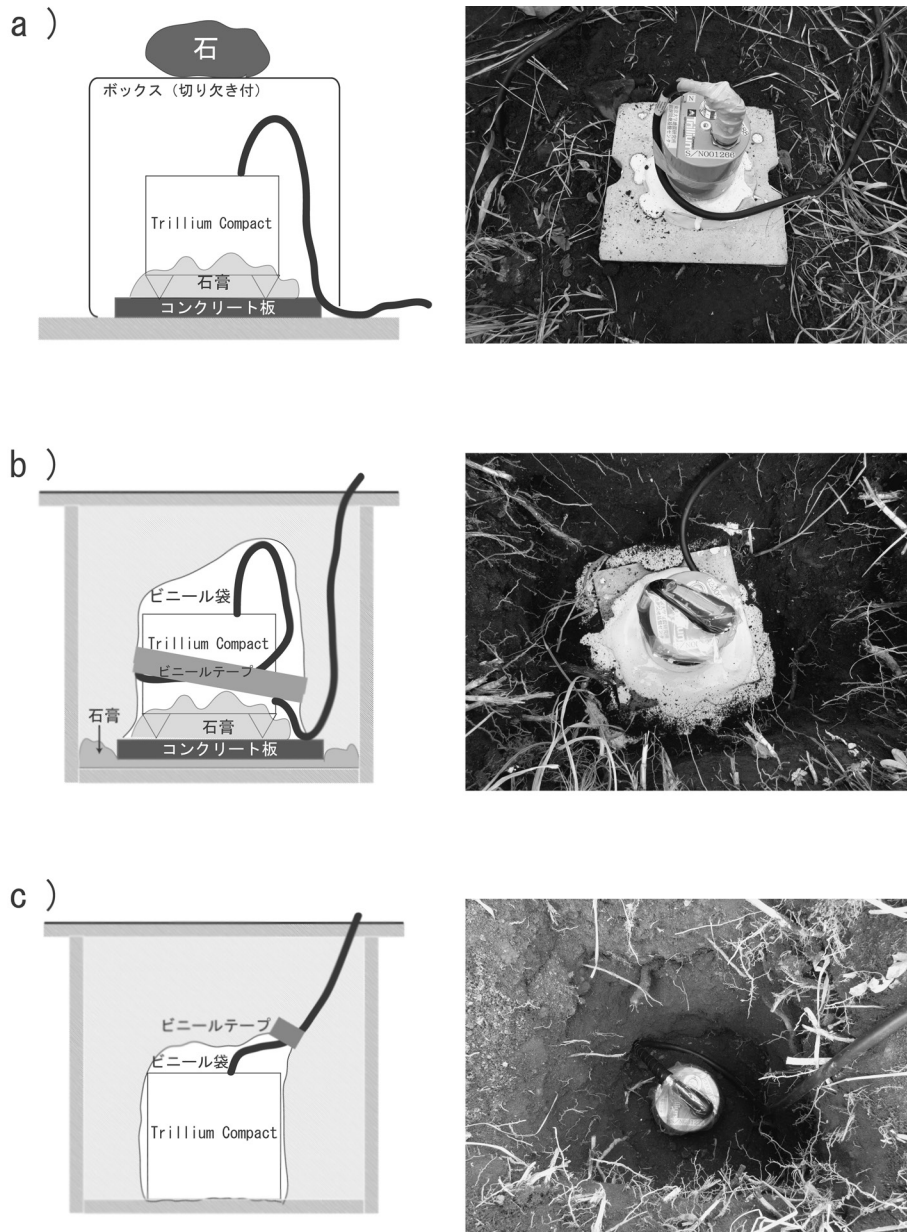


図 2. 設置方法の概略図と写真. a) 地表設置, b) 埋設置 (コンクリート板有り), c) 埋設置 (コンクリート板無し).

表設置 (図 4a) は約 -120 dB \sim -60 dB と常時ノイズレベルが高いことが分かる. これは水平動成分 (図 5, 図 6) でも同じ傾向が見られる. また, 埋設置の上下動成分 (図 4b, 4c) では 01:00 頃より周期 10 秒から 100 秒の帯域で, 約 -110 dB から徐々に約 -140 dB までノイズレベルが低下し, 05:00 頃には約 -140 dB から徐々に約 -110 dB までノイズレベルが上昇する傾向が見られるが, 地表設置の上下動成分では同様の傾向が見られない. また, 埋設置のコンクリート板有り (図 4b) とコンクリート板無し (図 4c) を比べると, 研究のターゲットである周期 10 秒以上の帯域を含め, ノイズレベルの時間変化に有意な違いは見られない.

パワースペクトル密度

次に, 地震波形の時間周波数解析ツールで出力した複数チャンネルのパワースペクトル密度 (Power Spectral Density: PSD) が重ね描きされたグラフ (図 7) の比較を行う.

上下動成分ではおよそ周期 6 秒以下の短周期帯において, 全ての設置方法でほぼ同じ振幅である. しかし, それ以上の長周期帯, とくに周期 10 秒から 100 秒の帯域では, 地表設置は埋設置に比べ, およそ 3 倍から 100 倍もノイズレベルが高い事が分かる. また水平動成分では, 周期 0.1 秒より短周期側において地表設置より埋設置の方が, ノ

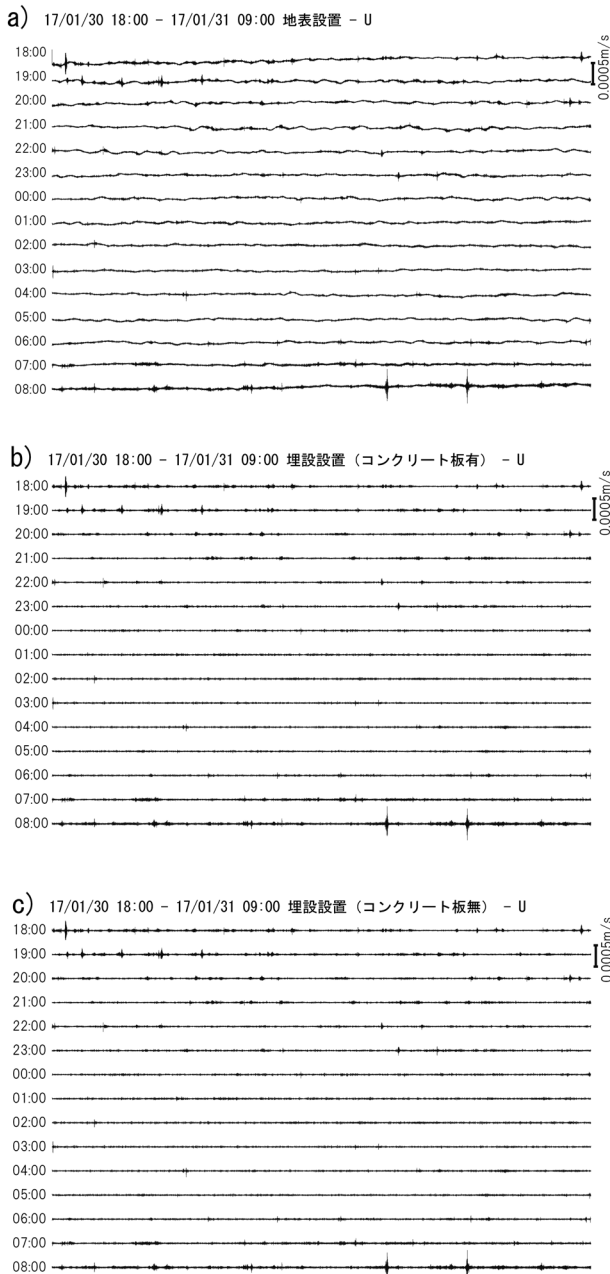


図 3. 各設置方法の上下動成分波形. 1 トレース: 1 時間. a) 地表設置, b) 埋設設置 (コンクリート板有り), c) 埋設設置 (コンクリート板無し).

イズレベルが低い. 次に周期 10 秒から 100 秒の帯域では, 東西動成分を見ると地表設置は埋設設置よりおよそ 10 倍ノイズレベルが高い. しかし, 南北動成分を見ると地表設置は埋設設置よりノイズレベルが高いが, その違いは他の 2 成分ほど顕著ではない.

考 察

今回の解析結果では, 全ての設置方法において上下動成分のノイズレベルが低いため, 上下動成分のスペクトログラムを使用して設置方法の比較を行った.

Trillium Compact のような広帯域地震計の長周期側のノイズは, 温度や気圧の変化が大きな原因となることが分かっている (山田, 1991; 大滝ほか, 2013). 今回の結果でも, およそ周期 6 秒より長周期側では埋設設置より地表設置の方がノイズレベルが高く, また周期 10 秒から 100 秒の帯域において, 地表設置のノイズレベルは埋設設置の 3 倍から 100 倍高い事が分かった. これは温度変化によるものや風の影響を受けたものである可能性が高いと考える. これらの結果から, 地表はノイズレベルが高いので, 地中で見られるような微細な時間変化を見る事ができない. よって, 広帯域地震計は埋設するのが適切である.

埋設設置をコンクリート板の有無で比較すると, 結果に顕著な違いが見られなかった. よって, コンクリート板の有無はノイズ調査の設置方法として重要な要素の 1 つとは言えない. またコンクリート板を敷かないことで地震計の固定が不安定になる恐れがあるが, 今回のノイズ調査のように観測が短時間であれば, 埋設時に地震計周りの土をしっかり押し固めて, 地震計が少々の振動では動かないようにすることにより地震計の挙動が変化するほど傾くことは考えにくい. よって, コンクリート板や石膏を用意する必要がなく, 地面を掘る時間が半分となり設置作業が容易である埋設設置 (コンクリート板無し) が, Trillium Compact を用いたノイズ調査の設置方法として 3 つの方法の中では一番適していると言える.

課 題

先行研究で温度や気圧変化がノイズレベルに大きな影響を及ぼすことが分かっているが, 今回の検証では設置期間が短く, 3 つの方法を相対的に比較しているため温度・気圧・降水・風・建物の固有周期などの環境変化が考慮されていない. また今回の結果において, 埋設設置では 01:00 から 05:00 の間ノイズレベルの低下が顕著であることが分かった. これは地下鉄運行などの人間活動の減少が大きな原因の一つであると考えられるが, 根拠となる結果が得られていない. これらは観測点を増やし, 長期間で観測を行う必要があるため今後の課題としたい.

ま と め

新しい観測点を設置する上で, ノイズが小さいことは大切な要素の 1 つであり, 事前のノイズ調査は重要である. 今回, 作業時間の短縮と準備物の少量化によって, より簡便に地動ノイズ調査を行う事ができる最適な広帯域地震計設置方法の検証を行った.

地表設置・埋設設置 (コンクリート板有り)・埋設設置 (コンクリート板無し) の 3 つの方法で Trillium Compact による同時観測を行い, データの解析と比較を行った. 地表設置と埋設設置では, 今回のターゲットとする深部超低周

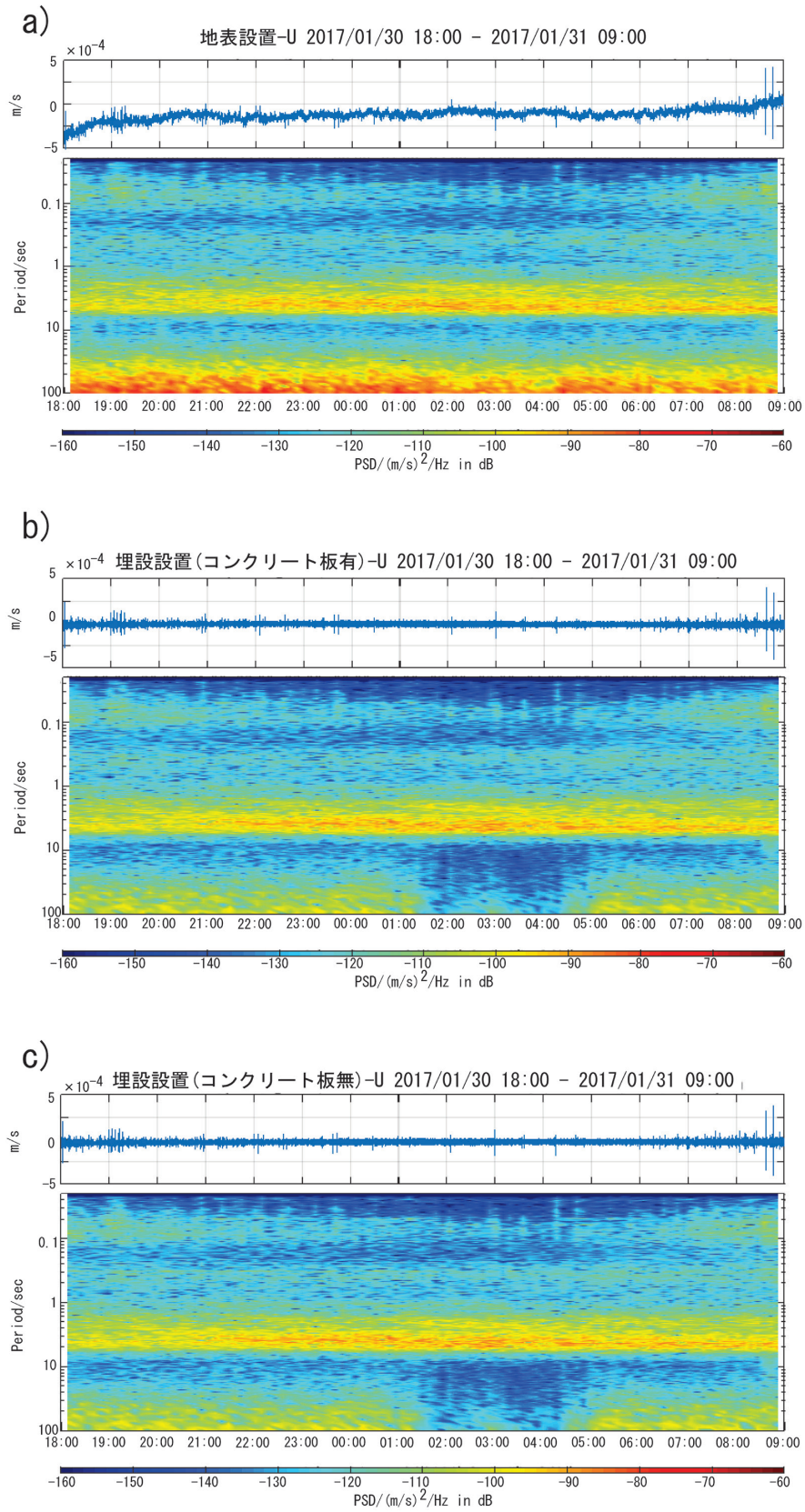


図 4. 上下動成分の時系列波形 (上段) とスペクトログラム (下段). a) 地表設置, b) 埋設置 (コンクリート板有り), c) 埋設置 (コンクリート板無し).

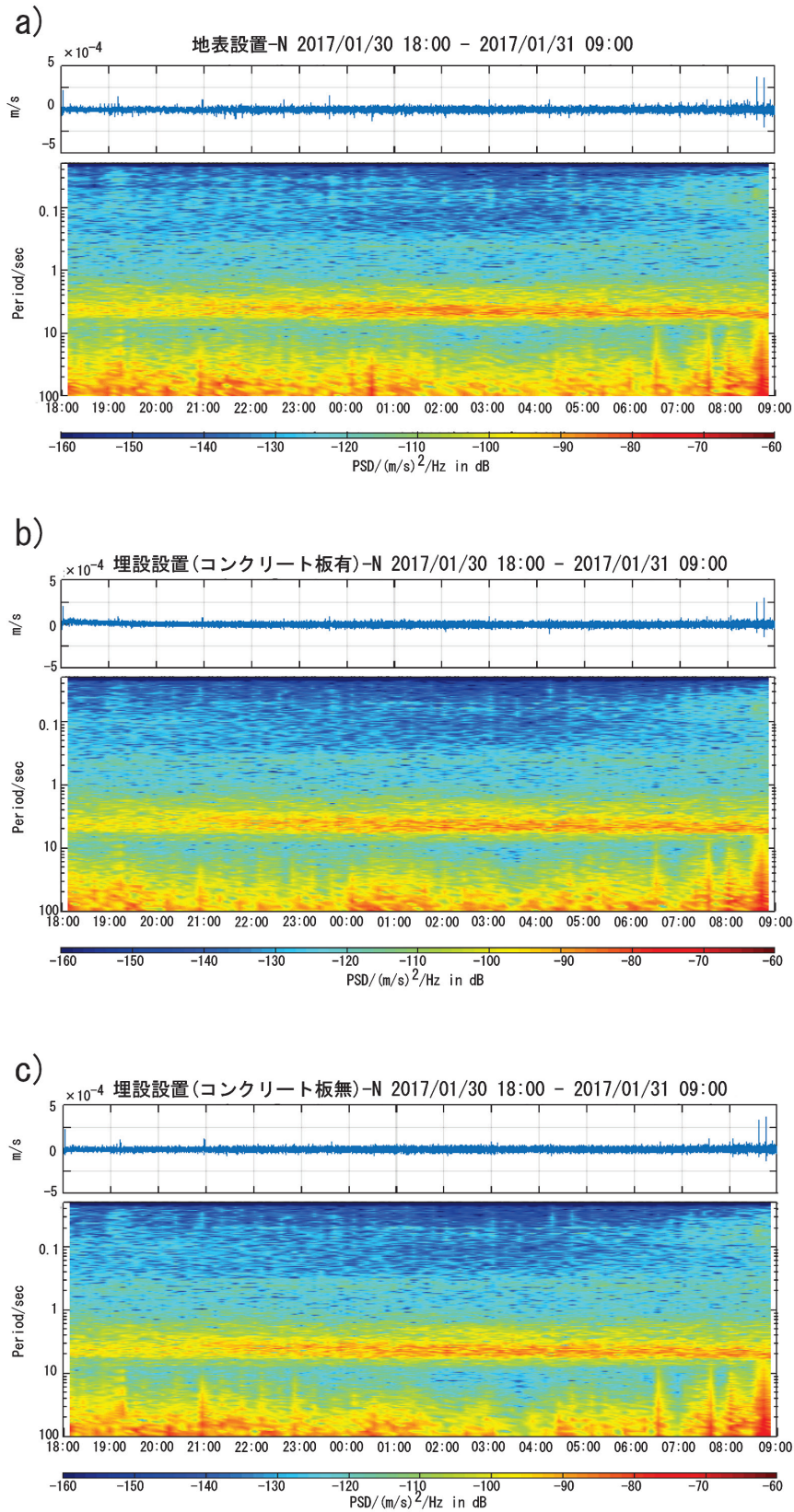


図 5. 南北動成分の時系列波形 (上段) とスペクトログラム (下段). a) 地表設置, b) 埋設置 (コンクリート板有り), c) 埋設置 (コンクリート板無し).

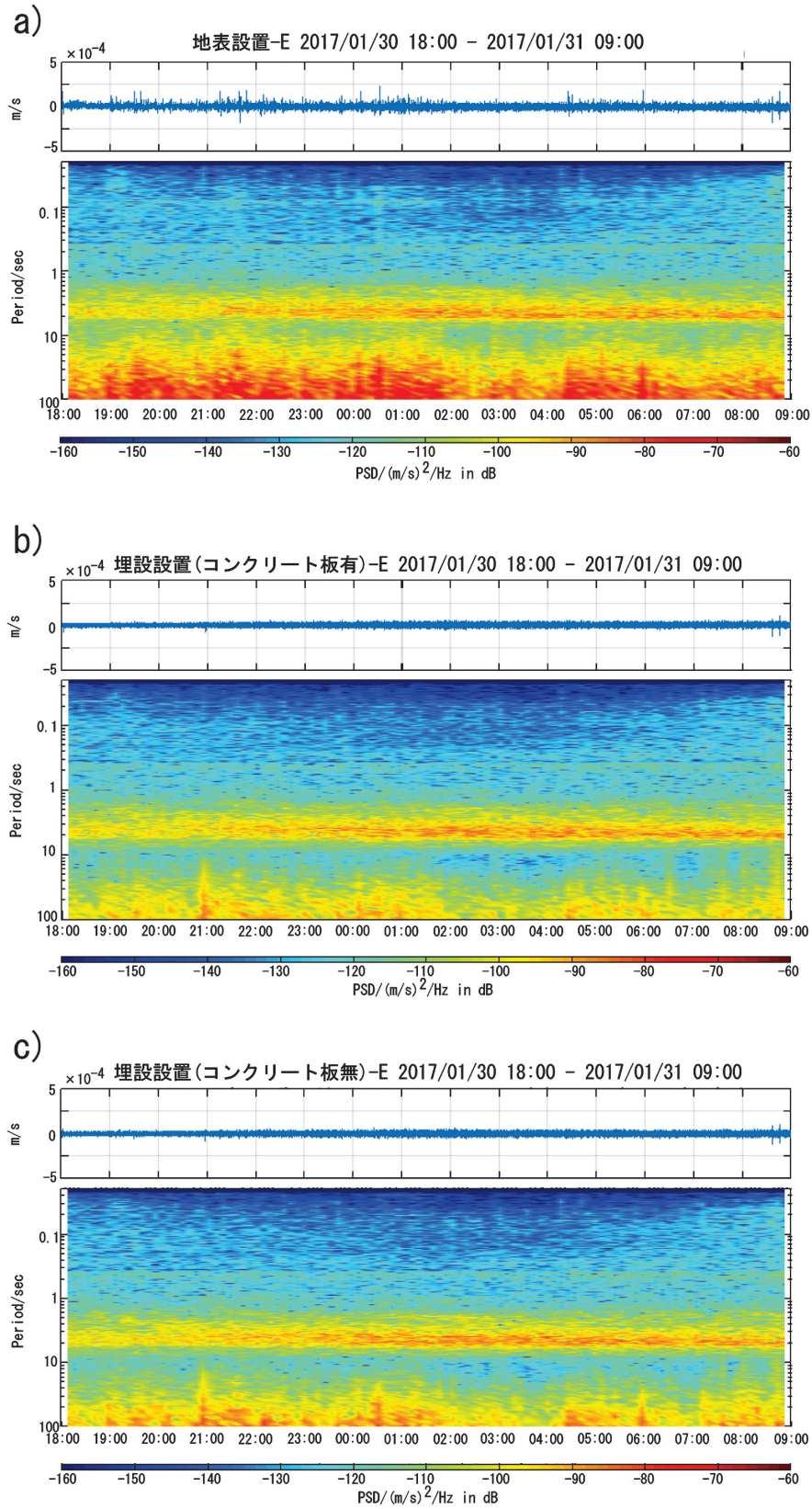


図 6. 東西動成分の時系列波形 (上段) とスペクトログラム (下段). a) 地表設置, b) 埋設置 (コンクリート板有り), c) 埋設置 (コンクリート板無し).

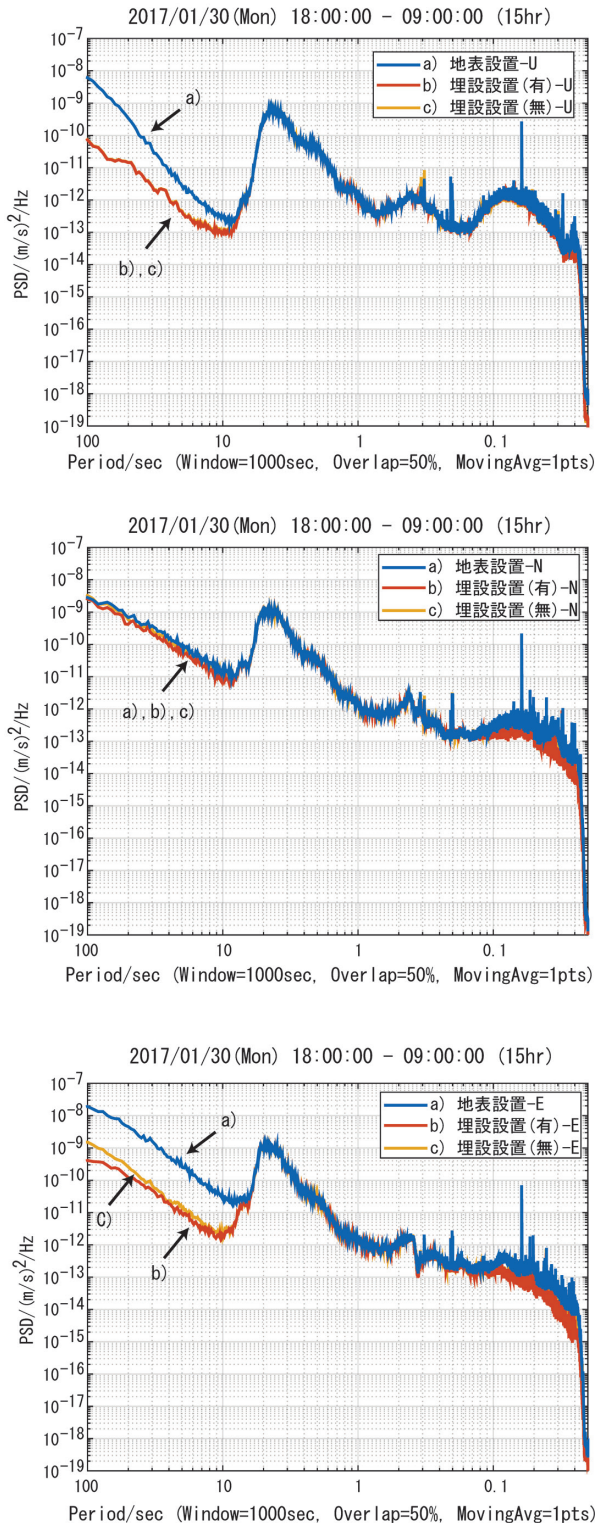


図 7. パワースペクトル密度 上段：上下動成分
中段：南北動成分 下段：東西動成分

波地震の卓越周期 10 秒から 100 秒の帯域において地表設置のノイズレベルがおよそ 3 倍から 100 倍も高い事が分かった。これは温度や気圧の変化, また風の影響によるノイズであると考えられる。埋設設置の比較では, どの周期帯でもコンクリート板の有無で違いは顕著に見られなかった。よって, 準備物が少なく作業が容易である, 埋設設置(コンクリート板無し)の方法が, 広帯域地震計を用いたノイズ調査において, 3つの方法の中で一番適している設置方法であると言える。

後日, 2017年3月2日から3月3日に観測点候補4点にてノイズ調査を行った。埋設用の穴を掘る際, 掘りやすい場所であれば設置作業時間は1時間程度であったが, 場所によっては基盤岩または巨礫岩が露出し, 作業時間は2時間程度となった。今回はコンクリート板無しの方法であったため掘りづらい場所でも2時間程度の作業時間で設置出来たが, コンクリート板有りの設置方法であれば掘る作業時間が倍になる上, 掘りやすい場所を再選定しなければ設置できなかったと考えられ, 予定していた日程では作業が終了しなかった可能性が高い。観測データから設置場所固有のノイズ検出やノイズレベルの評価を行った。この結果を基に設置場所が決定し, 新しい広帯域地震観測点(佐伯鶴見観測点)を立ち上げることができた。

文 献

Ito, Y., K. Obara, K. Shiomi, S. Sekine and H. Hirose, 2007, Slow Earthquakes Coincident with Episodic Tremors and Slow Slip Events, *Science*, **315**, 503-506.
 宮川幸治・酒井慎一, 2008, 地震波形の時間周波数解析ツールの開発—首都圏地震観測網 (MeSO-net) 構築におけるノイズ調査への適用—, *震研技報*, **14**, 13-22.
 大滝壽樹・吉田康宏・神定健二, 2013, 小穴埋設時の広帯域地震計のノイズ調査, *地震*, **65**, 27-30.
 鶴岡 弘, 2003, WIN システム用波形モニターツールの活用, *震研技報*, **9**, 14-19.
 山田功夫, 1991, 最近の地震観測, *地震*, **44**, 3-14.
 吉田康宏・神定健二・原田智史・藤原健治・大滝壽樹・田中明子・金嶋 聡・末次大輔・神谷眞一郎・石原 靖・竹中博士・斉田智治・藤井雄士郎, 2001, 広帯域地震計設置のための埋設法の比較観測, *地震*, **54**, 9-16.