

# 広帯域地震計の断熱カバー内部における温度変化の測定： 測定装置の開発と観測点監視への応用

大塚宏徳<sup>\*†</sup>・佐伯綾香<sup>\*\*</sup>・安藤美和子<sup>\*\*</sup>・竹尾明子<sup>\*\*\*</sup>

## Measurement of Thermal Variability inside an Insulation Cover for Broadband Seismometer: Development of Instruments and its Application for Station Monitoring

Hironori OTSUKA<sup>\*†</sup>, Ayaka SAIKI<sup>\*\*</sup>, Miwako ANDO<sup>\*\*</sup> and Akiko TAKEO<sup>\*\*\*</sup>

### Abstract

Broadband seismographs are highly sensitive to changes in ambient temperature. Therefore, they should be installed in an environment with small temperature fluctuations. Although, there are few examples of measuring the actual temperature changes of a seismometer in operation. We have developed an environmental sensor, which is based on general-purpose microcontrollers, to be installed nearby the seismometer in an underground vault. In addition to being able to measure and record temperature, humidity and pressure, the device has ability to acquire the data through a local area network in quasi-real time. The measured temperature changes indicate that our seismometer is properly insulated. Pressure records inside the insulated cover detected several flooding events in the underground vault. This device was shown to be useful for monitoring the condition of the seismometer, besides evaluating the insulation.

*Key words* : Broadband seismometer, Seismic station, Station monitoring

### はじめに

地震計の設置に際しては観測値の質と観測点の運用の両面から考慮すべき項目が多くある。データの質については地域地質や接地面の性質、設置場所の周辺環境等に注意しなければならない。また運用面では、装置の大きさや形状に合わせた空間の確保、必要に応じた電源や通信の確保について留意することになる。近年スロー地震の観測にもよく用いられる高感度の広帯域地震計は特に長周期ノイズへの注意が必要である。長周期成分に影響を与える因子として気圧変化や温度変化などが指摘されてきた。気圧変化に

起因する傾斜ノイズは地震計の設置深度を大きくするほど低減できると言われている（例えば、Hutt *et al.*, 2017）。吉田ほか（2001）は各種気象要素と広帯域地震計で観測された鉛直成分のノイズとの相関を検討し、温度との相関が支配的であるとしている。Doody *et al.* (2018) は温度変化の小さい横坑で地震計周囲の温度を制御する実験を行い鉛直成分の評価を行った結果、長周期 (>100 秒程度) の観測では温度変化を最大限抑える必要があると報告している。埋設は温度変化を含む環境ノイズを抑える方法として期待できる。そのためセンサー容器全体が直接地面に接するような埋設（直接埋設）に加えてコンクリートや樹脂製の構造物により地下へ設けた空間（地下空間）へ設置する方法などが採用されてきた。日本国内では Hi-net (Obara *et al.*, 2005) や MeSO-net (酒井・平田, 2009) 等、大規模な観測網では中～大深度の縦坑への設置が行われている。直接埋設は表層への設置であるが、地下空間よりノイズ抑制に効果的であるとされる。例えば佐伯ほか（2017）では直接埋設によって表層の環境ノイズを大幅に抑えられることを指摘している。また Aderhold *et al.* (2015) は直

2021 年 9 月 30 日受付, 2021 年 12 月 14 日受理.

<sup>†</sup> hotsuka@port.kobe-u.ac.jp

<sup>\*</sup> 神戸大学海洋底探索センター

<sup>\*\*</sup> 東京大学地震研究所技術部総合観測室

<sup>\*\*\*</sup> 東京大学地震研究所観測開発基盤センター

<sup>\*</sup> Kobe Ocean Bottom Exploration Center, Kobe University

<sup>\*\*</sup> Technical Supporting Section for Observation Research, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

<sup>\*\*\*</sup> Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

接埋設と比較して、地中へ小空間を設けて設置した場合は春から夏にかけて水平成分の長周期ノイズ（20-170秒）が高くなることを報告している。吉田ほか（2001）は小空間への広帯域地震計の埋設方法を検討し、地中の小空間に設置した地震計の周囲を砂で充填する方法を提案した。しかし直接埋設の場合は保守性が低下するため、特に湿潤な気候である日本国内への設置ではコネクタ周辺部の防水対策などに細心の注意を払う必要がある。ボアホール型の地震計は防水性能が高いものの、初期投資やメンテナンス費が高額になりがちである。そのため、長期にわたって観測を継続する施設（定常観測点）においてはその保守性の高さから直接埋設よりもマンホールやコンクリートブロック等を用いた地下空間への設置が好まれる場合がある。地下空間への設置では直接埋設に比べて断熱に工夫が必要である。空間を砂で充填する方法は効果が大きいとされるが、保守の際に砂を除去する手間がかかる。水の比熱を利用してウォーターブロックを敷き詰める観測点もあるが、短周期の観測への影響が十分に検討されていない（Doody *et al.*, 2018）。また横坑や自然洞窟を利用した観測点においては埋設が困難であることが多く、地震計周囲の空気の流動を遮断するには何らかの対策が必要である。そこでしばしば一般的な発泡スチロールや、より断熱性能の高いスタイロフォーム<sup>TM</sup>が代替として使われる（吉田ほか, 2001; Ackerley, 2014; Doody *et al.*, 2018 など）。スタイロフォームの断熱カバーで長期運用されている観測点において断熱カバー内部の温度変化を継続的に測定した報告例は国内では乏しく、様々な型式の地震計で十分に検証されているとは言えない。そのため広帯域地震計の観測点を新設する際には過去の事例に倣うか現場で試行錯誤することが多い。仮に断熱に不備があったとしても設置完了後に改良することは施設の設計によっては困難であり、コスト面でも不利になるため設計時に考慮しておくことが望ましい。そこで運用中の観測点で期待通りに断熱されているか検証することを目的として、地震計近傍の温度変化を実測する実験を実際の観測点で行うことにした。この観測点ではまず計測システムの確立を目指し、断熱材で覆った防水カバー内部の温度変化を試験的に測定した。近年のIoT（Internet of Things; Ashton, 2009）関連技術の普及により極めて安価に環境計測が可能になっていることから、湿度および気圧についても環境情報として取得する。本稿では測定器の開発と初期的な測定結果、観測点の監視への応用例を報告する。

### 観測点概要

2017年6月13日に佐伯鶴見観測点（大分県佐伯市鶴見大字下梶寄；32.94319N, 132.07509E）にCMG-3T（Güralp Systems Ltd.; 固有周期120秒）を設置し、観測を開始した。地震観測点としての詳細は佐伯ほか（2017, 2019）を参照

されたい。新設の観測点であり、環境測定装置の導入を前提に設計できることや測定装置の設置に伴う欠測など地震観測への影響を避けることが出来るため本実験の対象とした。観測点の全体設計に際しては地震研究所で近年設置された標準的な定常観測点（例えば、藤田ほか, 2011; 宮川・渡邊, 2011）を基準に、同一プロジェクトで先行して設置された観測点の記録を参考にした（安藤ほか, 2016; 田中ほか, 2015 など）。本観測点では150cm掘り下げた内径90cmのマンホール（観測井）の底部に45cm四方のコンクリート製の地震計台を設置した。観測井から約7m離れた位置に引込柱を立て、ステンレスバンドを用いて電源系のキャビネットおよび収録系のキャビネットを引込柱に固定した。観測井の断面を図1aに示す。本観測点では新たな試みとして地震計の防水を目的とした高さ500mm（内径250mm）の塩化ビニル製カバー（以後は防水カバー）を導入した（図1d）。この「防水カバー」は底部が開放されているが、観測井が冠水してもカバー内部に空気が残存する事を利用して地震計を保護する。防水カバーは地震計台に打ったアンカーに4本のM8ボルトで固定し、冠水時の浮上を防止した。防水カバーは形状に合わせてくり抜き加工した厚さ5cm程度のスタイロフォームで覆った（図1c）。加えて観測井内部にスタイロフォームとロックウールを組み合わせた断熱処理を施した（図1a）。地面から防水カバーの最上部（断熱材を含む）までの空間はスタイロフォームで挟まれたロックウールによって充填し、地震計周囲に残された空間での対流を抑止することを目指した。環境測定装置は防水カバー内側の最上部に設置し、電源および通信ケーブルは埋設した電線管を通して地震観測系と一緒に観測井からキャビネット内へ引き込んだ。

### 測定装置の作製

ハードウェアの要件：

導入する測定装置は地震観測への影響を最小限にしつつ、既存の観測点にも後から容易に導入できるシステムが望ましい。測定値を準リアルタイムで把握することを目的とし、測定装置の必要条件を次のように定めた。①測定値の記録および外部通信のためのデバイスを収録系キャビネット内に配置する。②キャビネットのデバイスと地下のセンサは有線で通信する。③防水カバー内部に設置するセンサは、CMG-3Tと干渉しない大きさにする。④地震観測とは独立したシステムとする。⑤可能な限り簡素な設計かつ低予算な構成とする。

1号機：

計測の要となるセンサはBosch社製BME280（Bosch, 2021）を採用した。この素子は温度・湿度・気圧の3項目を単体で出力でき、パッケージサイズはフットプリント

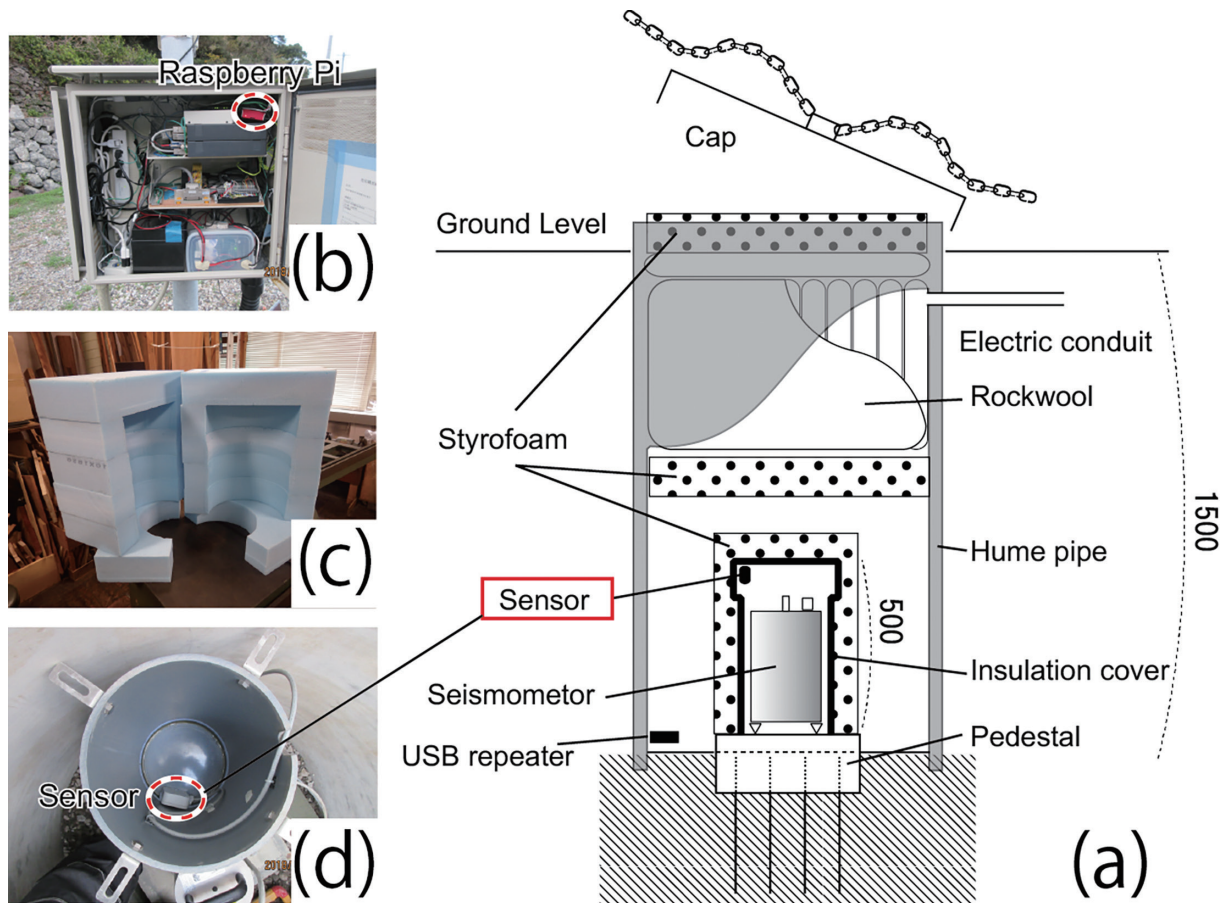


図 1. 観測井の概略図と各部の写真. (a) 観測井の断面図. (b) キャビネット内の配置. 記録および外部通信用の Raspberry Pi は丸の位置に配置した. (c) 地震計台のスタイロフォーム. メンテナンス時の着脱を容易にするため半割し, 最下部は分離できるようになっている. 装着は荷締バンドで固定した. (d) 防水カバー内部: 測定装置は塩化ビニール製の防水カバーの上部にマジックテープ (表 1: 11) で取り付けた. CMG-3T のコネクタと干渉しない位置を選んだ.

2.5mm 角, 高さ 0.93mm と非常に小型である. 素子内部で AD 変換され (温度と気圧は 20bit, 湿度は 16bit) 応答速度は 1 秒である. 温度の測定精度は公称で  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 分解能は  $0.01^{\circ}\text{C}$  であり, 日変化や年変化といった相対変動を確認するには十分であると考えられる. 本装置では BME280 が表面実装された基板 (表 1: 03) を利用した. BME280 にはインターフェイスとして I<sup>2</sup>C と SPI 通信が用意されており, デジタルで測定値を取得することができる. ただし両規格とも通信可能距離が短いため, 本装置では汎用マイクロコントローラである Arduino とセンサ間で I<sup>2</sup>C 通信を行い, Arduino から記録装置までの 10m 程度をシリアル通信で結ぶ方式を採用した. Arduino シリーズの中でも Arduino Nano は基板サイズが小型であり, かつ I/O ポートが十分にあるため開発の柔軟性が高い. 今回は低価格な Arduino Nano 互換基板 (表 1: 02) を用いた (以後 Arduino). キャビネット内に配置する記録および外部通信装置は入手性の高いシングルボードコンピュータの Raspberry Pi (3B; 表 1: 01) を使用し, 1号機では

表 1. 使用部材一覧.

番号	名称
01:	Raspberry Pi 3B / 2B
02:	Arduino Nano 互換機 (aitendo N328P)
03:	BME280 実装基板 (aitendo BME280-6P)
04:	MAX485 搭載 RS485-TTL 変換基板 x 2 (aitendo M485-4P)
05:	センサー側ユニバーサル基板 (Sunhayato 288GV)
06:	4 芯シールドケーブル 15m
07:	IP67 耐候性防水ケース (タカチ電機工業 WP8-10-4G)
08:	ケーブルグラウンド (タカチ電機工業 RM12S-7)
09:	透湿防水キャップ (タカチ電機工業 PMF-12HAS)
10:	コネクタ (Molex Standard 0.62" 3.68mm pitch 4pin, 2pin x 2)
11:	マジックテープセット (TPD25MTSW)
12:	Ethernet サージ保護器 (APC PNET1GB)
13:	避雷器 (サンコーシア 雷止くん TEP-5B)
14:	ブルボックス防水型 (タカチ電機工業 BCAS081807G)
15:	USB リピータケーブル (サンワサプライ KB-USB-R212)
16:	USB アイソレータ (ストロベリー・リナックス LTM2884)
17:	microSD カード (Transcend TS8GUSDUI 8GB)



Arduino への電力供給 (5 V・約 20mA) とシリアル通信の実装が容易な USB 接続で行った。USB の通信距離は規格上 5m までのため、12m のリピータケーブル (表 1: 15) を使用して計 17m に延長した (図 2a)。USB リピータとの接続部は防水ケース (表 1: 14) に入れた (図 2b)。センサ部の防水ケースには防水透湿キャップを取り付け、湿度の監視も可能にした (表 1: 07-09)。防水ケース内の湿度上昇に備え、Arduino および BME280 インターフェイス基板の BME280 素子以外の部位にはソルダーレジストを塗布し、絶縁処理を施した。地震観測系への落雷の影響を最小限にするため、Raspberry Pi はサージ保護器 (表 1: 12) を介して Ethernet ハブに有線接続した。USB については当初アイソレータ (表 1: 16) を使用する計画を立てたが、本システムでは通信が確立できなかったため断念した。代替として、電源系に流入するサージから地震観測系を守るため、避雷器 (表 1: 13) を介して Raspberry Pi に電源を供給する方式とした。

#### 2号機：

1号機は冠水によって USB リピータが故障して測定

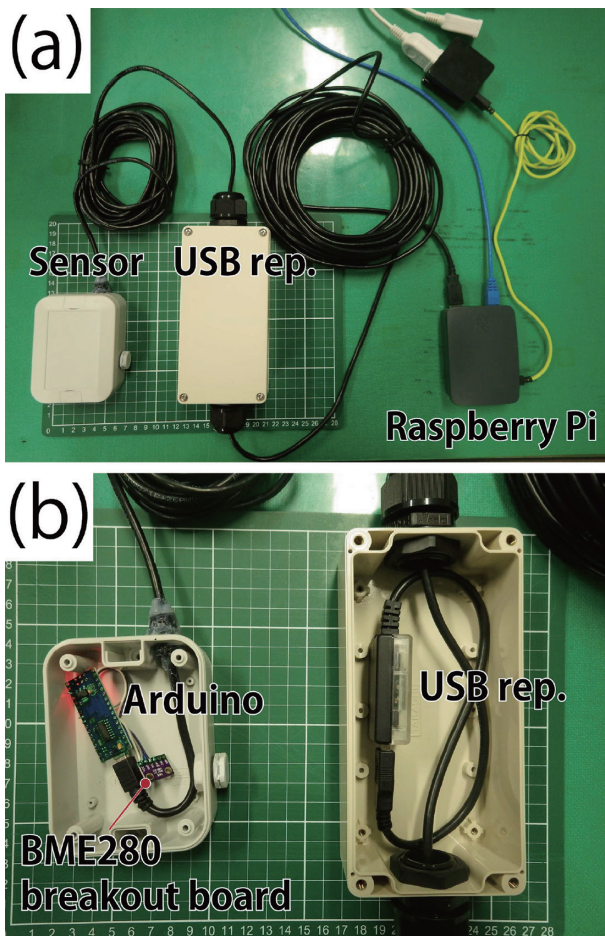


図 2. 1号機の構成。(a) 外観。(b) 防水ケースの内部。

継続が不能となったため、より堅牢な 2号機を作成した。冠水についての詳細は「地震計台の監視装置としての運用」で述べる。2号機の基本設計は1号機と同じであるが、通信・電源ケーブルを接合部無しの構成にするため USB 通信を排し RS-485 通信を採用した。RS-485 は規格上 1200m の距離まで通信可能であるため、様々な観測点に対応できる。本装置では Raspberry Pi (2B; 表 1: 01) と Arduino 両者に RS-485 / RS-422 トランシーバである MAX485 搭載のモジュール (表 1: 04) を接続し、それぞれの GPIO 端子から 3.3V を給電して動作させている。通信 (RS-485 の TX, RX) と Arduino への 5V 電力供給, GND 端子は 4 芯のシールドケーブル (15m; 表 1: 06) で直結した。装置の簡易配線図と外観を図 3 に示す。またシステム全体に使用した部材については表 1 にまとめた。このシステムでは RS-485 間の相互通信を行う必要が無いため、センサ (Arduino) 側は常に送信モード, キャビネット (Raspberry Pi) 側は常に受信モードで動作させている。

#### ソフトウェア：

BME280 での測定は Arduino 側のスケッチ (プログラム) で I<sup>2</sup>C 通信による 1 秒サンプリングとし、結果をシリアルポートに常時出力するようにした。ノイズの除去、データ量の節約および SD カードへの書き込み頻度を減らすた

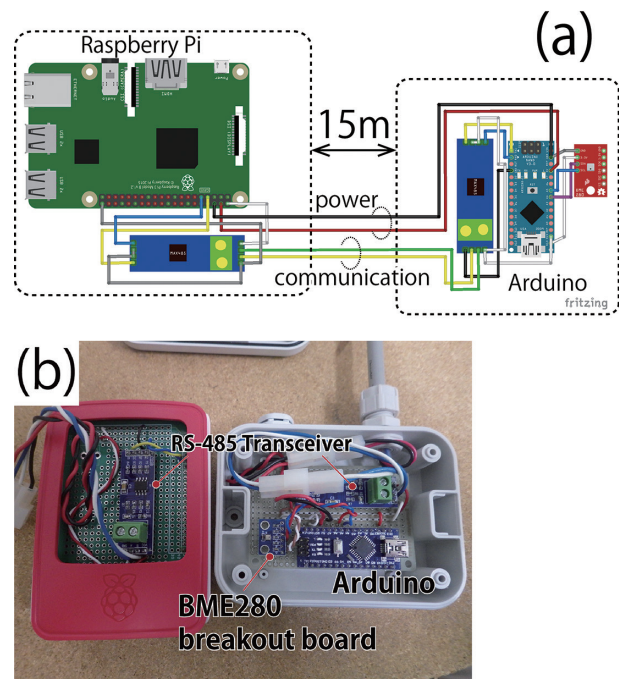


図 3. (a) 2号機の簡易配線図。キャビネット側 (左) と地震計側 (右) を RS-485 モジュール間通信として、中間接合部の無い構成とした。(b) 2号機の外観。左: RS-485 モジュールを載せたハットを取り付けた Raspberry Pi (2B)。右: センサ部を取めた防水ケース。モジュール基板はユニバーサル基板 (表 1: 05) にまとめた。4 芯ケーブルとの接続には汎用のコネクタ (表 1: 10) を用いた。

め、Raspberry Pi 側の Python スクリプトで測定値の時間平均を算出した。1号機は2分平均（120 サンプル）、2号機は5分平均（300 サンプル）とした。測定値は時刻、温度、湿度および気圧をスペース区切りで非圧縮のプレーンテキストとしてSDカードに書き込む。ファイルは1日ごとに分割する。インターフェイスとしてRaspberry PiにApache2で簡素なHTTPサイトを立ち上げた。サイトにはgnuplotによる直近1時間および直近24時間の簡素なグラフを配置し、cronにより15分間隔でグラフを上書き更新するようにした。また、データを収録したテキストファイルを回収できるようにファイルリストへのリンクを配置した（図4）。地震観測網を監視する既存のサーバ内で新たな自動回収スクリプトを走らせることは避け、本実験のデータについては上記のリンクからの手動回収とした。

測定値の精度と校正：

測定装置の特性にどの程度個体差があるかを確認するため、2台の測定装置を用いた並行観測を行った。試験に用いた2台は本番用の1号機、および比較用に同構成の測定装置でセンサモジュール基板のみ秋月電子製 AE-BME280に変更したものである。サンプリングは1Hzとし、2分平均値を記録した。試験は地震研究所1号館の室内で2つのセンサを隣接した状態で実施した。装置やセンサ基板全体を収納できる恒温槽を用意できなかったため、センサ部に風よけのポリエチレン袋を被せた状態で測定した。センサの自己発熱の影響については同程度と仮定する。加えて現地での測定は防水ケース内に収納するArduinoの発熱による影響も受けると考えられるものの、本システムにおいてはArduinoに高負荷をかけるような演算は行っていないため影響は一定かつ限定的であると想定する。図5に2017年4月24日18時50分から2017年5月1日1時54分（JST）までの測定値の時系列と散布図を示す。散布図が示すように試験期間内のデータはばらつきが小さく概ね1次の回帰直線上に乗ることが分かる。試験期間中のそれぞれ全4500サンプルについて最小2乗法により得られる回帰直線では、回帰係数が0.945であり相関係数は0.990となる。この測定試験の結果から基準となる装置との並行観測を実施すれば測定値を補正できる見込みとなった。一方で温度の絶対値は約1℃の開きがある。BME280のデータシート（Bosch, 2021）によると測定値は環境温度だけでなくPCB基板の温度やセンサ素子の自己発熱の影響を受けており、一般的に環境温度より高い値が得られるとある。そのため絶対値を得るためには検定済みの温度計を用いて基準装置の校正も必要である。

設置作業：

1号機は地震観測点の設置作業と同時に行い、2017年6

月13日に地震計システムと同時に測定を開始した。装置の各部は図1に示す位置に設置した。Raspberry Piはキャビネット内（図1b）、センサ部は防水カバー内部（図1d）、USBリピータ部はマンホール底部に設置した（図1a）。2号機の設置は2018年12月5日に行い、故障した1号機の現況確認も同時に行った。埋設した電線管への引き

Environment in the Thermal insulation cover

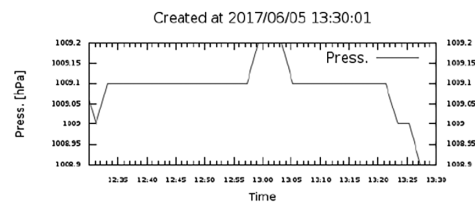
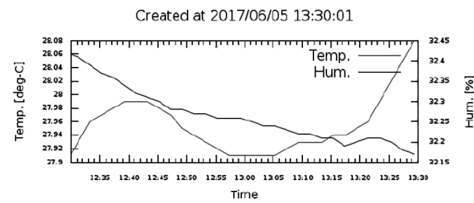
Latest : 2017-06-05 13:29:21+0900

Temperature: 28.08 [deg-C]

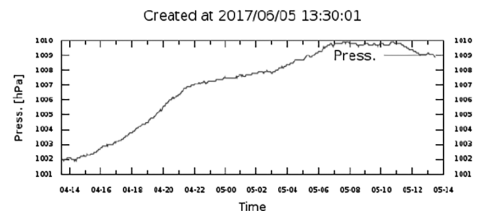
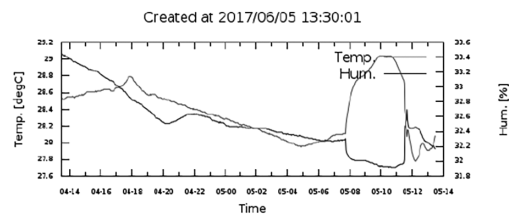
Humidity : 32.17 [%]

Pressure : 1008.9 [hPa]

Past one hour



Past one day



Download data

図4. 監視用 Web ページの表示例（屋内テスト時の画面）。

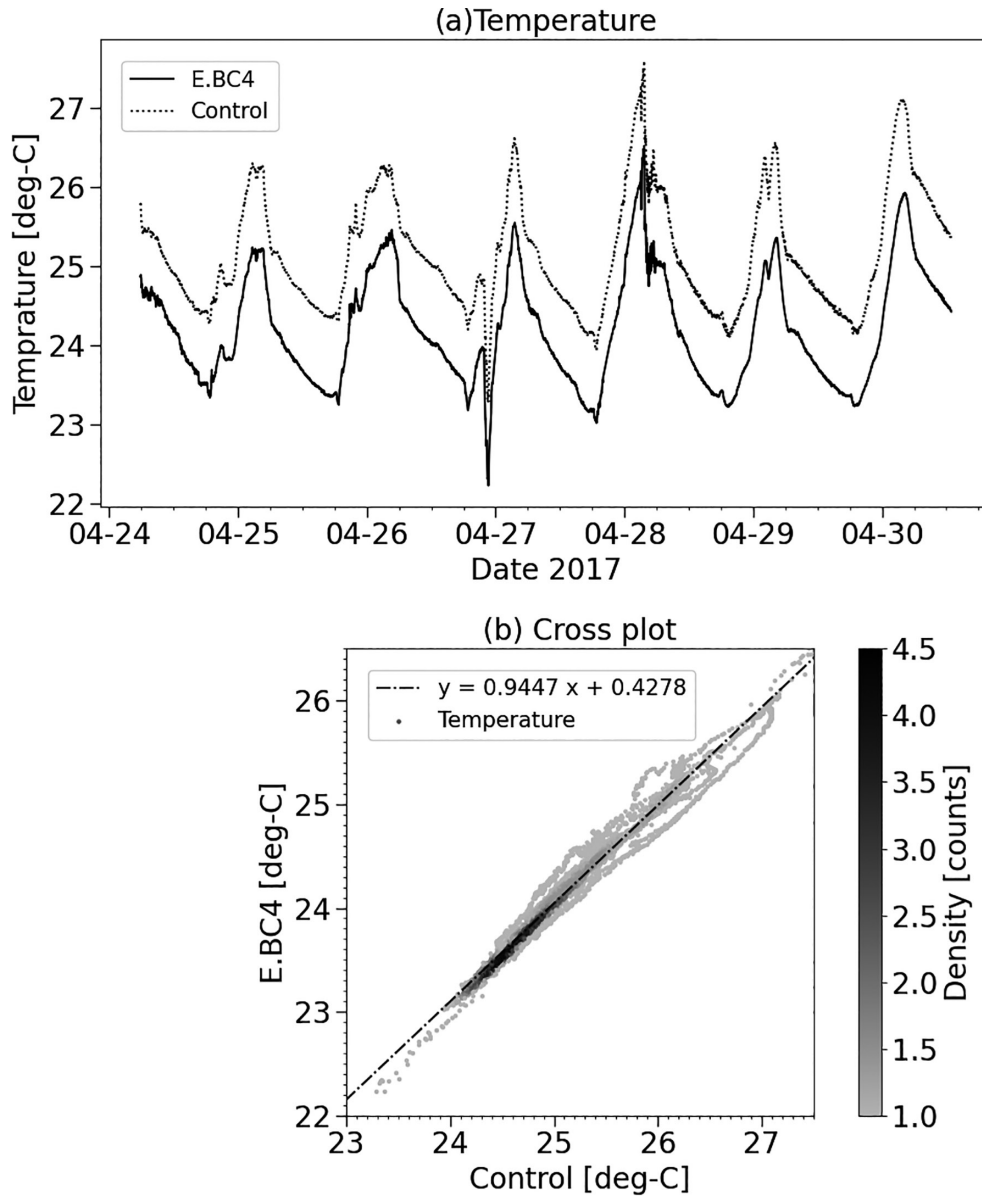


図 5. 観測点に設置したセンサ (E.BC4) と比較用センサ (Control) の測定試験. (a) 温度変化と (b) 温度の散布図. 散布図の両軸の単位は℃. 散布図の点が示す色はカーネル密度推定 (Gaussian kernel) によるデータ密度を示す. 破線で回帰直線示す.

込みには水没した 1 号機の USB 延長ケーブル (廃棄) をメッセージワイヤの代替として活用した. 2 号機による観測では受信側の Raspberry Pi に 1 号機のセンサを USB 接続し, キャビネット内の環境を同時測定する実験も行った. これにより地上と地下の温度変化の比較を試みた.

### 測定結果

1 号機の測定結果:

観測点設置当日の 2017 年 6 月 13 日 14 時 43 分から 1 号機での測定を開始し 2017 年 9 月 17 日 18 時 05 分の故障による観測停止までの連続記録を得た. 図 6a~6c に測定値を示す. 観測点立ち上げ直後から 3 日程度で温度平衡に達

したと思われ, 観測停止まで長期変動の記録を取得することができた. 観測点に最も近いアメダスの佐伯観測所の気温変化 (気象庁) と比較して日変化は抑えられており, 10 日以上周期を持つ緩やかな長周期の変動が確認された. 長周期の変動についても地上の観測値より振幅が小さい.

2 号機の測定結果:

2019 年 8 月 6 日から 2019 年 10 月 31 日までの測定値を図 7a~7c に示す (2018 年 12 月 9 日から 2019 年 8 月 6 日および 2019 年 8 月 26 日から 2019 年 9 月 22 日までは機器不調のため欠測). 後述する冠水時を除き, 気圧は防水カバー内と地上のキャビネット内で整合的な変動を示してい



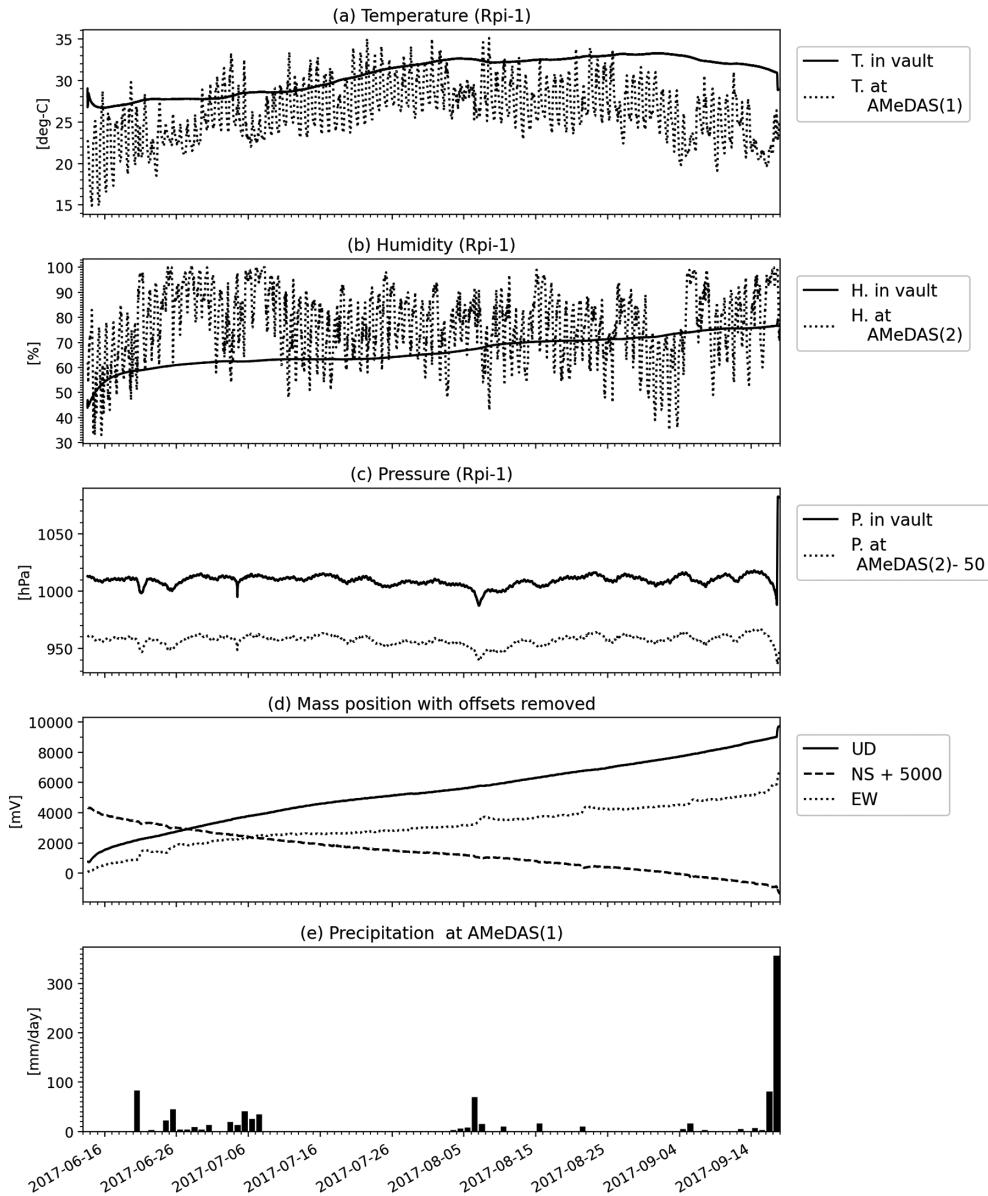


図 6. 1号機の測定値 (2017/6/13-2017/9/17) と諸データの比較. (a) 防水カバー内の温度 (vault) と最寄りのアメダス (気象庁) の気温. (b) 湿度. (c) 気圧 (アメダスは 50 hPa を差し引いた値). (d) ステップを除去したマスポジションの変化. レンジが大きいため NS 成分は 5000 mV 加算した値を示す. (e) 日降水量 (気象庁). アメダスの観測値は気温と降水量についてはアメダス佐伯観測所 (AMeDAS 1), 湿度と気圧については佐伯観測所の観測項目外のため大分観測所 (AMeDAS 2) の値を示す.

る (図 7c). 一方で温度および湿度は顕著な違いを見せる. キャビネット内では卓越した日変動と数日から 10 日程度の変動も明瞭である. 防水カバー内部では連続観測できた約 1 ヶ月では単調な変化を見せており, 日変動や 10 日程度の変動は地上と比べて極めて小さい (図 7a, b).

### 測定値の評価

地震計の波形との比較：

ノイズとの相関を検討するため, 各測定項目と地震計 3 成分の振幅を比較した. 本観測点での主な観測対象である 20~50 秒の成分について検討した. 図 8 に Mean

Absolute Amplitude と測定値 (温度, 湿度および気圧) の 1 日の最大変動幅 (最高値と最低値の差) の関係を示す.

防水カバー内およびキャビネット内のいずれの測定項目も地震計の上下動および水平動との明瞭な相関は認められない. 地上の温度変化と上下動の振幅には弱い負の関係がみられる (図 8d). 特に日中の温度変化が小さくなりやすい雨天や曇天は海況の悪化を伴うことが多く, 波浪由来のノイズが増加すると考えられる.

本観測点については, 防水ケース内部の温度変化が長周期帯の地震観測に与える影響は認められなかった.

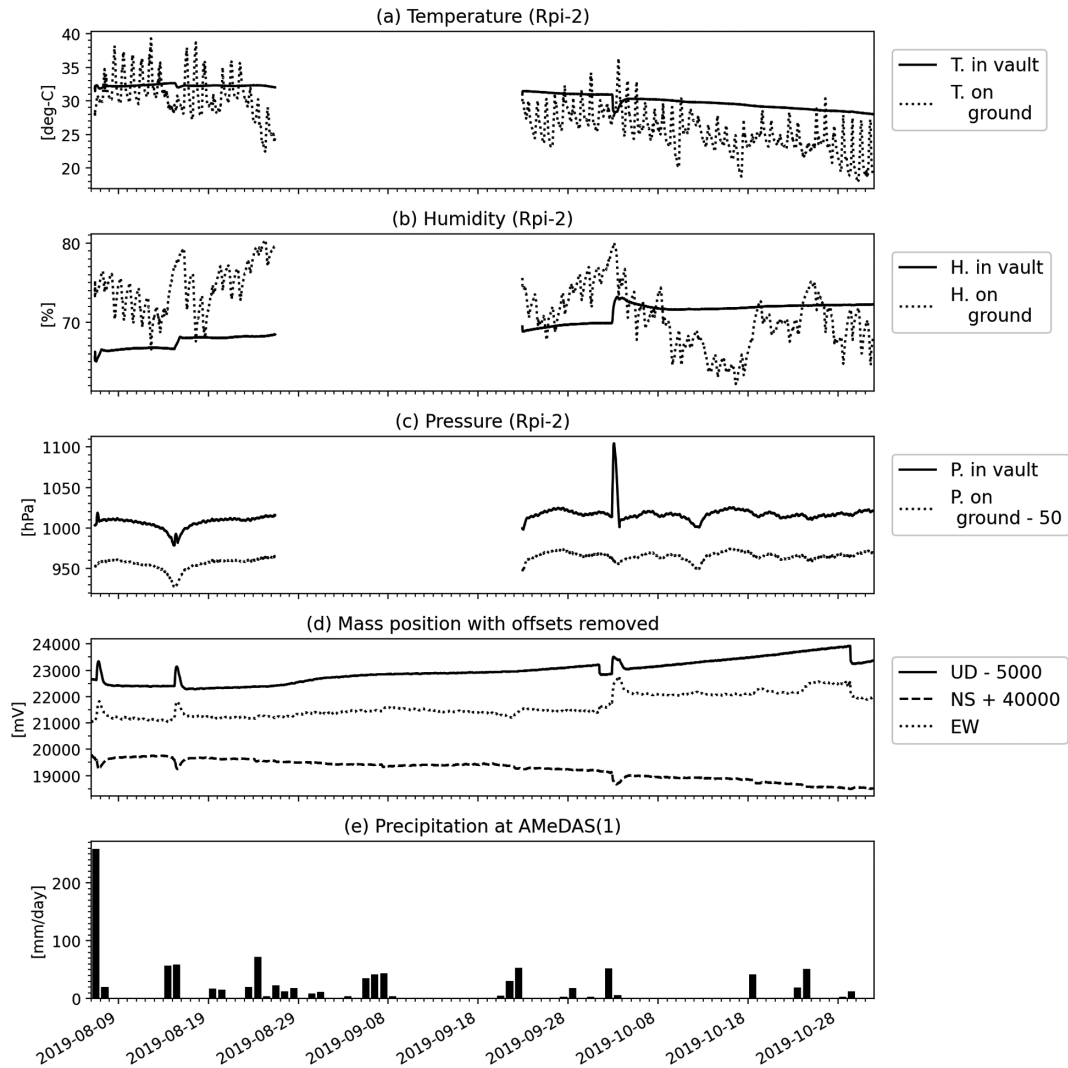


図 7. 2号機の測定値 (2019/8/6-10/31) と諸データの比較. (a) 防水カバー内 (vault) とキャビネット内 (ground) の温度. (b) 湿度. (c) 気圧 (キャビネット内は 50 hPa 差し引いた値). (d) ステップを除去したマスポジションの変化. レンジが大きいため UD 成分は 5000 mV 差し引いた値, NS 成分は 40000 mV 加算した値を示す. (e) アメダス佐伯観測所 (AMeDAS 1) における日降水量 (気象庁).

#### 測定値と地震計マスポジションの比較：

抗内温度と地震観測の長期的な関係を評価するため、本装置で得られた温度変化と CMG-3T のマスポジションの時系列変化を比較した。マスポジションは地震計の振り子に対するフィードバックを止めた時に振り子がどの位置に来るかを示すもので、加速度を電圧変換したもの ( $V/ms^2$ ) が出力されている。CMG-3T の場合、出力レンジは  $\pm 10V$  となっており、経時変化により大きすぎた場合は中央付近に戻す操作 (センタリング) を行う。温度変化に反応して地震計内部の構造体が僅かに変形した場合でもマスポジションの値に影響する可能性があるほか、地震計設置後に地震計の姿勢が変化した場合、原理的にはその 3 軸の変化がマスポジションにも表れると考えられる。佐伯鶴見観測点ではデジタイザ (白山工業製 LF-2100R; 白山工業株式会社, 2014) の簡易アナログ入力端子で CMG-3T

のマスポジション (分解能約 4.9 mV) を測定しており、地震研究所のサーバから 20 分間隔で監視している。

該当期間に佐伯鶴見観測点で測定されたマスポジションの時系列を図 6d および図 7d に示す。マスポジションの測定値には任意のタイミングで実施されるセンタリングやメンテナンス時のロック・アンロックに伴うオフセットが乗るため、長期的な変動を評価するためにこれらのオフセットを除去したものを示す。2017 年 6 月の設置直後から UD 成分と EW 成分は + 方向に、NS 成分は - 方向に単調に変動している (図 6d)。2019 年の記録では設置直後に比べて時間あたりの変動量は数分の 1 から 10 分の 1 程度に低下しているが、3 成分とも設置当初から同じ方向への変動が確認できる (図 7d)。センタリングや電源操作以外にマスポジションが顕著な変動を見せるのは 2017 年 9 月 17 日 (図 6d)、2019 年 8 月 7 日、2019 年 8 月 15 日お



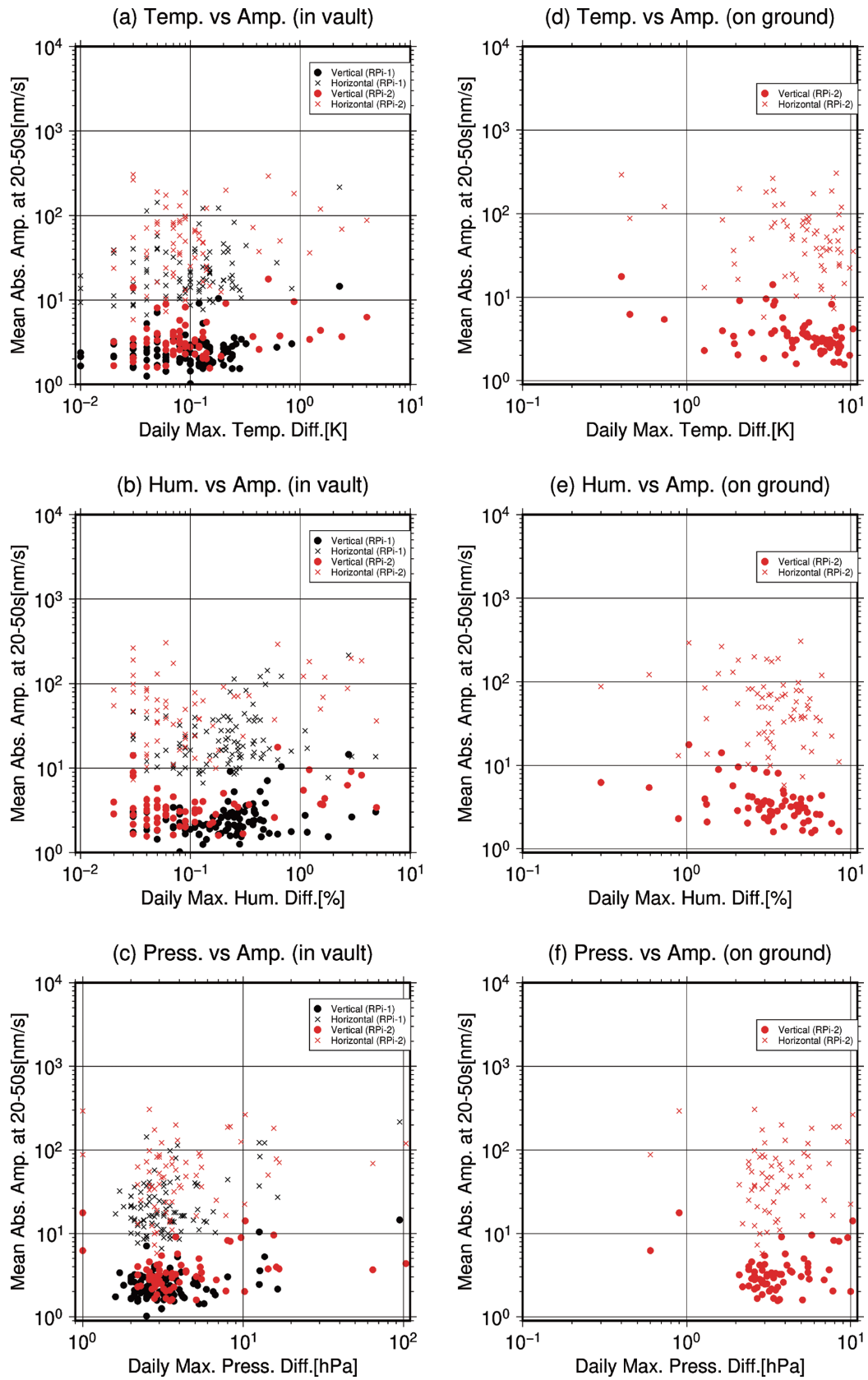


図 8. 20 秒から 50 秒周期帯における Mean Absolute Amplitude と環境センサ取得値の最大日変動の比較。(a) ~ (c) は防水カバー内部のデータ, (d) ~ (f) は地上のキャビネット内のデータを示す. Mean Absolute Amplitude は鉛直成分 (丸) と水平成分 (x) を別に示す. また, 黒で 1 号機 (RPi-1), 赤で 2 号機 (RPi-2) の取得値を別に表す. それぞれ (a) と (d) は温度, (b) と (e) は湿度, (c) と (f) は気圧の値との関係を示す.

よび2019年10月2日(図7d)であり、いずれもアメダスの佐伯観測所で降雨が確認されている(図6e, 7e)。他にも降雨と連動する若干の変動が見られるものの、変動量はアメダスの降雨量とは比例しない。これらの比較からは、マンホール内の温度変化とマスポジションの関係は認められなかった。

### 地震計台の監視装置としての運用

観測井水没の監視：

本実験による測定では温度の長期変化のほかにも観測点監視に有用な知見を得た。図9に4つの期間の測定値と降水量の比較を示す。いずれも1時間あたりの降水量が10mm以上を記録した後もしくはその最中に、防水カバー内部の気圧および湿度が急に上昇している。それに続き、温度が急激に低下する。その後緩やかに気圧が低下する。2号機で測定した3つの期間については地上の気圧との比較から、気圧が急激に上昇するイベントは防水カバー内のみの現象である事が分かる(図9b-3, 9c-3および9d-3)。1号機については2017年9月17日18:05:54を最後にセンサからの測定値が途絶し、気圧の低下は確認できない。これらの測定値は、観測井の冠水により周囲の静水圧が上昇し、防水カバー内部の水位が上昇した様子を見ていると考えられる。浸水後、時間経過に従い防水カバー内部の空気が周囲から雨水で冷却されたとみられる。また、2017年9月17日16:25分頃(図9a)および2019年8月6日10:00頃(図9b)にみられる0.5℃程度の温度低下は、停電によってセンサ基板やArduinoの発熱が喪失したことによるものと考えられる。関連する気象記録として、2017年9月17日に九州地方へ上陸した台風18号の影響により佐伯市のアメダス観測点で観測史上最大(当時)である1時間降水量84.5mmを記録した(日降水量356.5mmは過去2番目)ほか、2019年8月6日に台風8号が宮崎市付近に上陸、2019年8月14日には台風10号が愛媛県佐田岬半島を通過している(それぞれ図9a, 9b, 9cに対応する)。

2017年9月17日および2019年10月3日についてはピーク時の気圧がモジュールの測定限界である1100hPa付近に達しており、最大値はこれより高かった可能性がある。外気圧との相対値で約100hPaの圧力変化からパスカルの原理を用いて概算すると、高さ約50cmの円柱である防水カバー内部では約5cmの水位上昇と見積られる。また観測井内の水位は約1mまで達したと推定される。防水ケース内の気圧変化から、冠水のピークから地震計台より低い水位まで排水するのに要した時間は7時間から最大で17時間程度であることが分かった。この観測点は排水機構を設けていないものの、比較的水はけが良いことが確認できた。このように、防水カバー内部と地上の気圧差を監視すれば冠水が避けられない観測点において冠水の判定お

よび水位の推定が可能である。

防水性能の確認：

佐伯市のアメダス監視点と本観測点は約16km離れているため局所的な降水量は異なると考えられるが、測定結果から1年に複数回は観測井へ浸水しているとみられる。観測開始から現在まで冠水が原因と思われる地震計の不具合は発生していないことから、防水カバーの能力については有効性が実証できた。また、環境計測装置(2号機)についても冠水に対して堅牢であることが実証できた。

装置故障時の対応と事後保守：

2017年9月の台風通過後にRaspberry Piへリモートログインして動作状況を確認したところシリアル通信が断絶しており、USB接続のセンサを認識できなかった。遠隔操作でシステムの再起動、USBへの給電をON/OFFしても復帰しなかったため故障と判断した。状況から水没を想定してUSB端子への給電を停止し、測定用スクリプトも停止した。2018年12月5日に行った保守でヒューム管の内壁に浸水の痕跡が複数認められた(観測井の底から43cm, 70cm, 不明瞭ながら約150cmの高さ)ほか、ロックウールも濡れていた。さらに防水カバーの内側にも底部の切り欠き上端からさらに約5cm上まで浸水した痕跡が認められた(佐伯ほか, 2019)。これらの事実は本装置での測定結果とよく一致する。また、地震計や環境センサについては水と接触した痕跡が無いことを確認した。一方で、USBリピータ接続部の防水ケースは水没を確認した(図10)。

### 問題点と今後の展開

観測点の監視業務へ資するためには地震観測の全期間に渡って安定運用できることが肝要である。現在直面している問題は、冠水には対応したもののRaspberry Piの動作が不安定であり、本稿執筆時点でデータの取得に問題が生じている。特にデータファイルの読み出し中に不安定化するケースが多いため、原因として以下の2つを想定している。(1)電力不足は動作を不安定にする。冠水まで安定動作した1号機との決定的な違いはセンサモジュールを2台に増やした事である。しかし、センサの消費電流はArduinoと接続基板類を含めてもそれぞれ20mA程度と考えられるため、Raspberry Piの電源端子への最大入力(5V・2A)、4つのUSB端子(type A)からの最大合計出力(5V・500mA)およびGPIOからの最大出力(5V・700mA程度)に対して動作条件は満たしている。従ってRaspberry Pi本体の消費電流が想定より大きく、ファイル操作とEthernet通信を同時使用する際に供給を上回ってしまう可能性を有力視している。対応策として

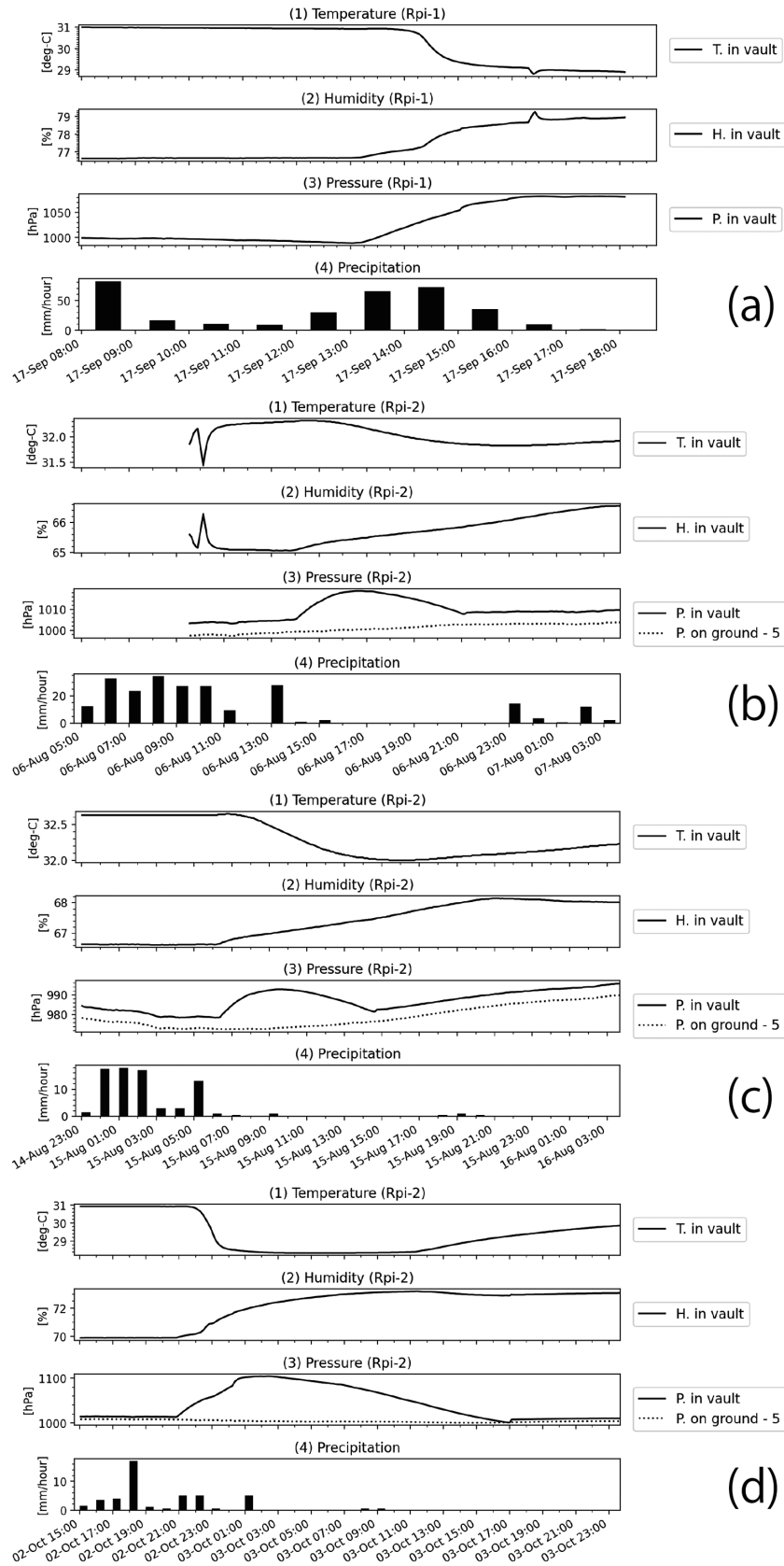


図 9. 測定データと降水量の比較. それぞれ (a) 2017/09/17 8:00-18:59, (b) 2019/8/6 5:00-8/7 3:59, (c) 2019/8/14 23:00-8/16 3:59, (d) 2019/10/2 15:00-10/3 23:59 の期間における (1) 温度, (2) 湿度, (3) 気圧 (キャビネット内は 5hPa 差し引いた値), (4) 1 時間雨量 (気象庁) を示す.





図10. 水没した1号機のUSBリピータ。2018/12/05の保守時に、当該装置を取めたケースを開けた直後の様子を撮影したもの。ケースが雨水で満たされている。水没した状態でしばらく通電していたためか、腐食が激しい。

Raspberry Pi 本体への給電を電源端子経由ではなく、Raspberry Pi とセンサへ並列に給電できる GPIO 端子から変更し、安定して3A程度供給できる電源を導入することや、センサへの給電のみを別電源にすることなどが考えられる。(2) micro SD カードの故障や相性問題についても疑われる。考え得る早期の対応策として、1号機で長期動作の実績がある Raspberry Pi を使用し、システム用 micro SD カードについても同等品(表1:17)との組み合わせに置き換えることを検討している。また BME280 や測定装置に利用した部品類の経年変化については文献が乏しいため、長期運用による影響は現地観測での知見を利用して今後検討することとする。また当初の目的である断熱の効果を定量的に議論するためには坑内の複数箇所での測定が望ましい。RS-485 は物理層で複数台接続が可能だが、通信プロトコルは自分で用意する必要がある。測定箇所を増やす方法は今後の課題である。地震研究所が運用する地震観測点では、機材の共通化や設置方法の標準化に対する努力が続けられている(例えば、宮川・渡邊, 2011; 森ほか, 2014)。しかし異なる年次に徐々に改良を加えながら設置されてきた背景に加えて現場の状況や予算に応じて設計に差異があり、広帯域地震計については様々な方法で断熱を施しているのが現状である。これら既存の観測点でも同様の測定を実施して比較検討することで、実用的かつ適切な断熱方法の確立や最適な観測点設計に対して寄与することを目指したい。

## ま と め

佐伯鶴見観測点に設置するための環境センサを作製した。環境センサは温度・湿度・気圧の測定が可能で2017年6月から測定を開始し、改良を経て測定を継続中である。

現時点では、佐伯鶴見観測点に施した断熱に関連する問題は確認されていない。今回の実験では観測井の水没による気圧の上昇を検出し、水位を推定できた。環境センサの設置は当初の目的である断熱効果の検証に加えて、地震計台の監視に有効であることが分かった。特に、本観測点で使用した防水カバーの能力を確認できたことは今後の観測点設計に有用な情報である。今後は安定した測定を行うためより堅牢な装置に置き換えるとともに、監視対象を広げて観測点ごとの評価を行うことが望まれる。

謝辞：実施にあたり、防水ケースの選定や加工および通信方式等について渡邊篤志技術専門職員および藤田親亮技術専門職員には広範に渡る助言を頂きました。防水ケースの加工および防水カバーに取り付けるスタイロフォームの加工については内田正之技術専門員に助言と協力を頂きました。西本太郎一般技術職員、池澤賢志技術職員(当時)および諏訪祥士技術職員(当時)には地震観測点の機器構成に関する具体的な助言を頂きました。地震観測点の設置については佐伯市のご協力を頂いています。本稿を査読して頂いた塩原肇教授と宮本成悟助教に加え、技術研究報告編集委員の方々には本稿の改善にあたり多岐にわたる有益なご指摘を頂きました。ここに謹んで謝意を表します。本稿の時系列解析と作図には Seismic Analysis Code ver.101.6a (Goldstein *et al.*, 2003; Goldstein and Snoke, 2005), SciPy v1.5.3 (Virtanen *et al.*, 2020), pandas v1.1.3, matplotlib v3.3.2 (Hunter, 2007; Caswell *et al.*, 2020), Generic Mapping Tools ver.6 (Wessel *et al.*, 2019) を使用しました。簡易配線図の作図には Fritzing ver.0.9.3b を用いました。

## 文 献

- Ackerley N., 2014, Principles of broadband seismometry, in "Encyclopedia of Earthquake Engineering", edited by M. Beer, I.A. Kougiumtzoglou, E. Patelli and I.S.K. Au., Springer, Berlin, Heidelberg, pp.1-35, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5\_172-1.
- Aderhold, K., K.E. Anderson, M.M. Reusch, M.C. Pfeifer, R.C. Aster and T. Parker, 2015, Data quality of collocated portable broadband seismometers using direct burial and vault emplacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 2420-2432, doi: 10.1785/0120140352.
- 安藤美和子・西本太郎・森 健彦・藤田親亮・竹尾明子・小原一成, 2016, 四国南西部におけるオンライン広帯域地震観測点の設置, 平成27年度技術業務報告, 震研技報, **22**, 25-27.
- Ashton, K., 2009, That 'internet of things' thing, *RFID J.*, **22**, 97-114.
- Bosch Sensortec GmbH, 2021, BME-280 Data sheet, Document revision 1.22, Document number BST-BME280-DS001-22, Sales Part Number (SPN) 0 273 141 185, <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>, (参照 2021-12-24).
- Caswell, T.A., M. Droettboom, A. Lee, J. Hunter, E.S. de

- Andrade, E. Firing, T. Hoffmann, J. Klymak, D. Stansby, N. Varoquaux, J.H. Nielsen, B. Root, R. May, P. Elson, J.K. Seppänen, D. Dale, J.J. Lee, D. McDougall, A. Straw, P. Hobson, C. Gohlke, T.S. Yu, E. Ma, A.F. Vincent, S. Silvester, C. Moad, N. Kniazev, hannah, E. Ernest, P. Ivanov, 2020, matplotlib: REL: v3.3.2, doi: 10.5281/zenodo.4030140.
- Doody, C., A. Ringler, R. Anthony, D. Wilson, A. Holland, C. Hutt and L. Sandoval, 2018, Effects of thermal variability on broadband seismometers: Controlled experiments, observations, and implications, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **108**, 493–502, doi: 10.1785/0120170233.
- 藤田親亮・森 健彦・荻野 泉, 2011, 福島県南東部におけるオンライン地震観測点の設置, *震研技報*, **17**, 42–47, doi: 10.15083/00032159.
- Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, L. Minner, 2003, SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, in “*The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part B*”, edited by W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings and C. Kisslinger, Academic Press, London, pp.1613–1614.
- Goldstein, P. and A. Snoke, 2005, SAC availability for the IRIS community, *IIS Data Man. Center Elect. Newsltr*, **7**.
- 白山工業株式会社, 2014, LF シリーズユーザーズマニュアル, ハードウェア編, 第4版, 93頁.
- Hunter, J.D., 2007, Matplotlib: A 2D graphics environment. *Comp. Sci. Eng.*, **9**, 90–95, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- Hutt, C.R., A.T. Ringler and L.S. Gee, 2017, Broadband seismic noise attenuation versus depth at the Albuquerque Seismological Laboratory, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **107**, 1402–1412, doi: 10.1785/0120160187.
- 気象庁, 過去の気象データ・ダウンロード, <https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php>, (参照 2021-12-09).
- 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, doi: 10.15083/00032142.
- 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—平成23年東北地方太平洋沖地震後の広帯域地震観測網強化を目的として—, *震研技報*, **17**, 23–41, doi: 10.15083/00032158.
- Obara, K., K. Kasahara, S. Hori and Y. Okada, 2005, A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 021301, doi: 10.1063/1.1854197.
- 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, 2017, 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, *震研技報*, **23**, 14–21, doi: 10.15083/00074444.
- 佐伯綾香・大塚宏徳・安藤美和子, 2019, 大分県佐伯市におけるオンライン広帯域地震観測点の設置, 平成30年度技術業務報告, *震研技報*, **25**, 43.
- 酒井慎一・平田 直, 2009, 首都圏地震観測網の設置計画, *震研彙報*, **84**, 57–69, doi: 10.15083/0000032433.
- 田中伸一・森 健彦・藤田親亮・小原一成, 2015, 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, *震研技報*, **21**, 1–14, doi: 10.15083/00032136.
- Virtanen, P., R. Gommers, T.E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S.J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K.J. Millman, N. Mayorov, A.R.J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C.J. Carey, Í. Polat, Y. Feng, E.W. Moore, J. VanderPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E.A. Quintero, C.R. Harris, A.M. Archibald, A.H. Ribeiro, F. Pedregosa, P. van Mulbregt and SciPy 1.0 Contributors, 2020, SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python, *Nat. Methods*, **17**, 261–272, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- Wessel, P., J.F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W.H.F. Smith and D. Tian, 2019, The Generic Mapping Tools version 6, *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **20**, 5556–5564, doi: 10.1029/2019GC008515.
- 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・齊田智治・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, doi: 10.4294/zisin1948.54.1\_9.