

## 海底ケーブル釜石局舎地下ピットにおける 気圧変動に対する広帯域地震計の応答

橋本 匡<sup>\*†</sup>・田中 伸一<sup>\*\*</sup>・篠原 雅尚<sup>\*\*\*</sup>

### Response of a Broadband Seismometer to Atmospheric Pressure Variations in the Basement Pit of the Kamaishi Station for the Optical-cable-type Ocean-bottom Seismometer and Tsunami Meter System off the Sanriku Coast

Tasuku M. HASHIMOTO<sup>\*†</sup>, Shinichi S. TANAKA<sup>\*\*</sup> and Masanao SHINOHARA<sup>\*\*\*</sup>

#### はじめに

2020年に岩手県釜石市沖合の海域において、高精度地下構造探査実験が行われた。この実験では、制御震源に白鳳丸のエアガンを用い、その受振には、三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム（三陸沖 OBCS (Ocean Bottom Cable System)）および、その光ファイバケーブルのダークファイバ（未利用のファイバ）を利用した分散型音響センシング観測（DAS (Distributed Acoustic Sensing) 観測）、並びに、ポップアップ型海底地震計（OBS (Ocean Bottom Seismometer)）、ハイドロフォンストリーマが用いられた（Shinohara et al., 2022, Fukushima et al., 2025）。また、三陸沖 OBCS のケーブル陸揚げ局（陸上局舎）の地下ピットに、リファレンスとして広帯域地震観測点（釜石八木浜観測点）を設置した。この広帯域地震観測点ではエアガンの発振や地震イベントを収録することができていたものの、長周期ノイズがしばしば発生していることがわかった。

構造探査実験の終了後に局舎周辺の災害復旧工事が行われることになり、釜石八木浜観測点の観測を一時休止したが、今後も三陸沖 OBCS の光ファイバを用いた DAS 観測

が頻繁に行われる見込みのため、引き続き釜石八木浜観測点の広帯域地震観測を行うことになった。しばしば発生する長周期ノイズの原因を調査するため、3種類の広帯域地震計や気温・気圧計を同時に設置して試験観測を行ったところ、空調設備の稼働に伴う気圧変動ノイズであることが推察されたため、その詳細を報告する。

#### 陸上局舎について

東京大学地震研究所は三陸沖で発生する地震・津波を観測するため、1996年に三陸沖 OBCS を設置した。システムの陸上局舎は岩手県釜石市にあり、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって流出してしまっていたが、2014年に津波に耐えうる構造で再建した（田中ほか, 2014）。

再建した建屋は鉄筋コンクリート構造で、1階にコンピュータ室があり B1 階に海底ケーブルを引き込む地下ピットがある。地下ピットの下には厚さ約 1.5m のコンクリートの耐圧版が設けられ、さらに地下深部に長さ約 15m の地盤アンカー 8 本が打ち込まれている。

陸上局舎には 1 階に鋼製の水密扉があるのみで、窓はなく海底ケーブルや商用電源などの引き込み口も浸水防止処理がなされている。1 階と B1 階には梯子が架かっており自由に上り下りができる間口がある。また、1 階と B1 階をつなぐ通気口が複数あり、海底ケーブルや商用電源ケーブル、GPS 信号ケーブルなどが地下ピットから通気口を経由して 1 階コンピュータ室の各種装置に接続されている。コンピュータ室には温度管理のためにエアコンが 2 基、結露防止のために除湿器が 1 基設置されている。エアコンの室外機は局舎外に設置されているが、2 台とも冷媒管の耐圧試験によって冷媒管を 4 MPa 加圧し気密が保たれていることを確認している。

2025 年 9 月 30 日受付, 2025 年 12 月 25 日受理.

<sup>†</sup> task@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*</sup> 東京大学地震研究所技術部技術開発室

<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研究センター

<sup>\*</sup> Laboratory for Technical Support, Technical Division, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

<sup>\*\*</sup> Technical Supporting Section for Observational Research, Technical Division, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

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

よって、陸上局舎の建屋内部は外気と隔離されているが、1階コンピュータ室とB1地下ピットは空気の循環が発生する環境である。

### 長周期ノイズの確認と一時撤収

2020年9月1日に陸上局舎地下ピットで釜石八木浜観測点を立ち上げた。主な機器構成としてセンサーはNanometrics社製のTrillium120QA、ロガーは白山工業製のLFシリーズを使用した。翌日の夕方にデータチェックを行ったところ、局舎の水密扉を閉めた直後から水平動2成分の波形に約20分間隔の一定のリズムで長周期ノイズが混入していることを確認した(図1)。センサーケーブルの配線方法の変更、測定環境等について検討し、どうやら水密扉を閉めた時だけ長周期ノイズが発生することが分かったものの具体的な原因については言及できなかった。

長周期ノイズの混入があったものの、2020年11月3日から9日にかけて行われた白鳳丸のエアガン発震に伴うシ

グナルは検出することができた。一方で2019年10月12日に発生した台風19号による被害の復旧工事が陸上局舎近傍で行われるにあたり大きな振動が広帯域地震計に影響する懸念があることから釜石八木浜観測点の撤収を行うこととなった。

### 釜石八木浜観測点の再設置と長周期ノイズ調査

2021年11月に再度三陸沖OBCSを利用したDAS観測が行われることとなり、今後もDAS観測が見込まれることから釜石八木浜観測点を再設置し定期的に観測することとなった。また、定期的に観測するにあたり長周期ノイズを詳しく調査することとした。

再設置は2021年11月11日に行った。機材構成はセンサーが固有周期120秒のNanometrics社製のTrillium Compact(以下、TC120s)、ロガーは白山工業製のLT-7700を使用し、UPS(オムロン製BW55T)にて電源をバックアップすることとした。LT-7700の設定は、サンプリング

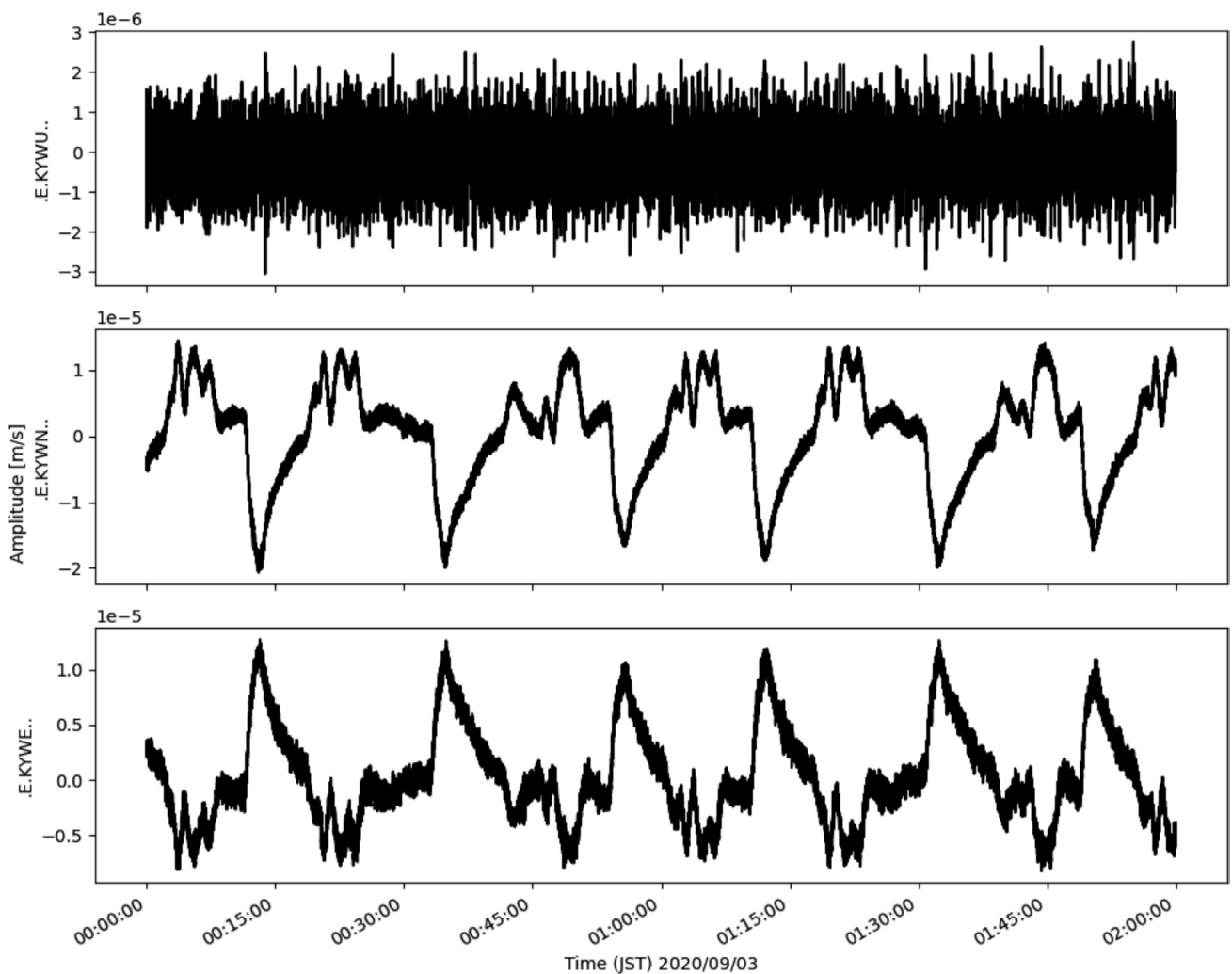


図1. 2020年9月2日の釜石八木浜観測点立ち上げ直後の波形(Trillium120QA) 上からUD成分・NS成分・EW成分で並べている

周波数を 100 Hz, 形式分解能を 24 bit, フィルタを最小位相とし, ACT プロトコル (森田ほか, 2010) にて地震研究所のサーバーにリアルタイムで地震波形データを伝送/蓄積する. また, LT-7700 は気圧・気温・湿度計を内蔵しており, リアルタイムでそれらのデータを取得できる. FOG (Fiber Optic Gyroscope) コンパス (日本航空電子工業製 JM7711) を用いて地下ピットの真北を求め, Trillium Compact の方位を真北に合わせて設置した. 地震計の足は接着剤 (CEMEDINE 製 スーパー X ゴールド) でコンクリートの床に固定した.

機材を地下ピットに設置し, 水密扉を閉めると, UD・NS・EW 成分に長周期ノイズが混入することを確認した (図 2). UD 成分で周期約 25 分, 振幅約  $1.5 \times 10^{-6}$  m/s と長周期帯の観測に影響がでるレベルのノイズだった. この長周期ノイズについて詳しく見るために, コーナー周波数 0.01 Hz のローパスフィルターを適用した (図 3).

3 成分の波形を重ねてみると (図 4) 上下動成分は緩やかに増減しているのに対し, 水平動成分は上下動成分の値が上昇すると一度パルス的なノイズが見られ NS 成分は+

方向に立ち上がり EW 成分は - 方向に立ち下がるように発生する. その後上下動成分の上昇のピークが来ると再度パルス的なノイズが発生しており, 今度は EW 成分が立ち上がるように発生し, NS 成分が立ち下がるように発生していた.

携帯型気象計 (ケストレル社製 KestrelDropD3) を地震計の隣に置いて観測したところ, 温度変化は一定であるのに対し気圧変動は上下動成分の変動とよく似た波形を示しており, 先行する気圧変動の数秒後に上下動成分のノイズが発生していた (図 4).

陸上局舎の水密扉を閉めてエアコン (DAIKIN 製パッケージエアコンスカイエア FVP63CB) の自動運転モードを OFF にして, 手で冷房や暖房に切り替えた時に地下ピットに設置したロガー (LT-7700) に搭載された気圧計で気圧を測定する実験も行ったところ (図 5), 暖房設定後に気圧が約 8 hPa 上昇し冷房設定後に気圧が約 15 hPa 低下することが分かった.

次に, 長周期ノイズの対策のため寸胴の鍋に切り欠きを作りセンサーにかぶせて, 鍋と床・ケーブルの出てくる切り

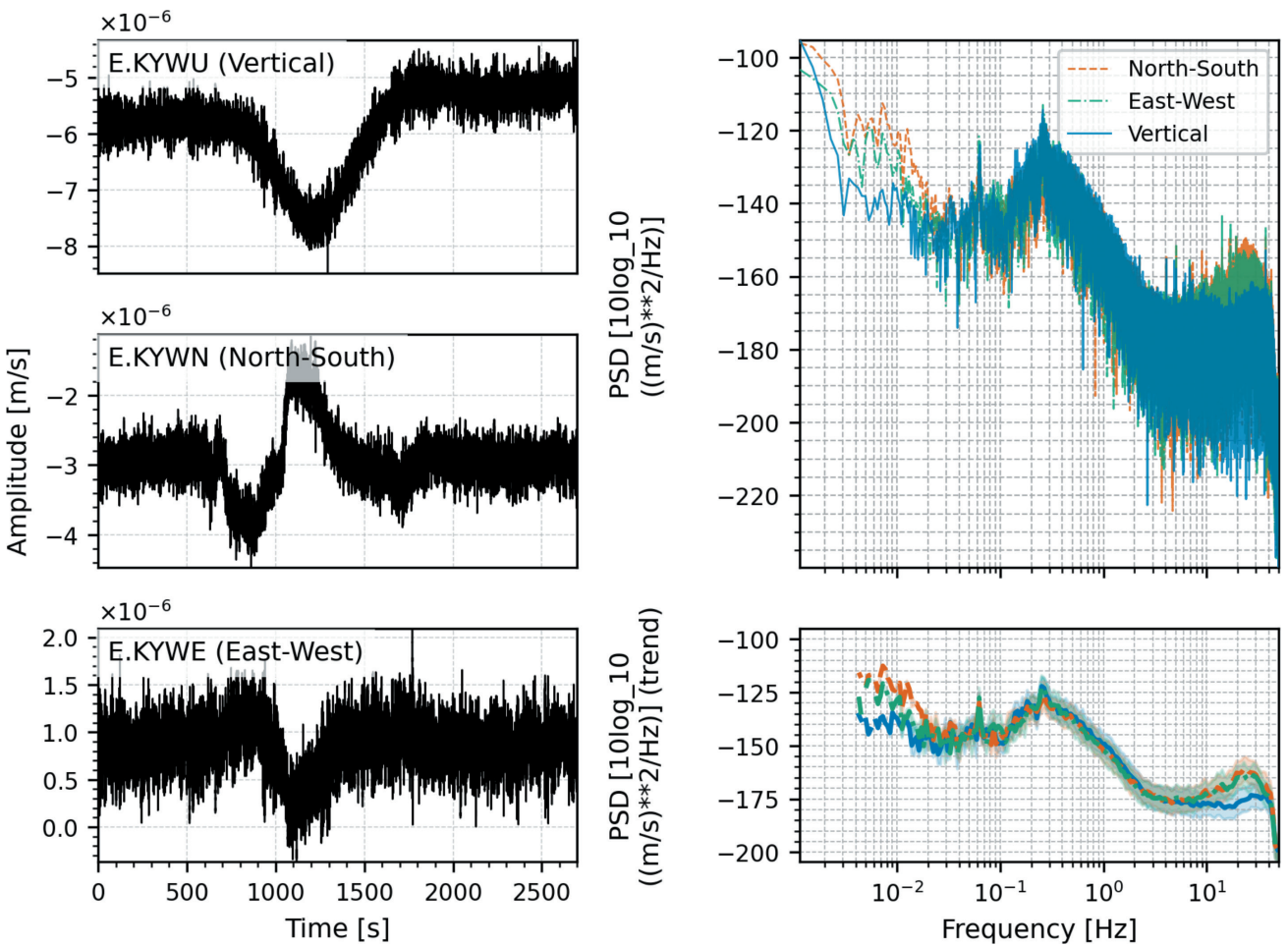


図 2. 2021 年 11 月に釜石八木浜観測点再設置直後の生波形 (左) とパワースペクトル密度関数 (PSD) (右上), 周波数スペクトルを対数スケールで分割した区間 (ビン) の中央値 (trend 線) と標準偏差 ( $\pm 1\sigma$ : 陰影) を示すグラフ (右下)

欠き部分の隙間をパテで埋めて簡易耐圧容器とした(図6).  
簡易耐圧容器の内側と外側に携帯型気象計をそれぞれ1  
つずつ配置し気圧変動がどのくらい異なるか調べたところ

(図7), 耐圧容器の内側は外側に比べて気圧変動量が約半  
分まで低減された. また, 内側は外側に比べて気圧変動の  
位相が1-2分ほど遅れて伝わっていることが分かった. か

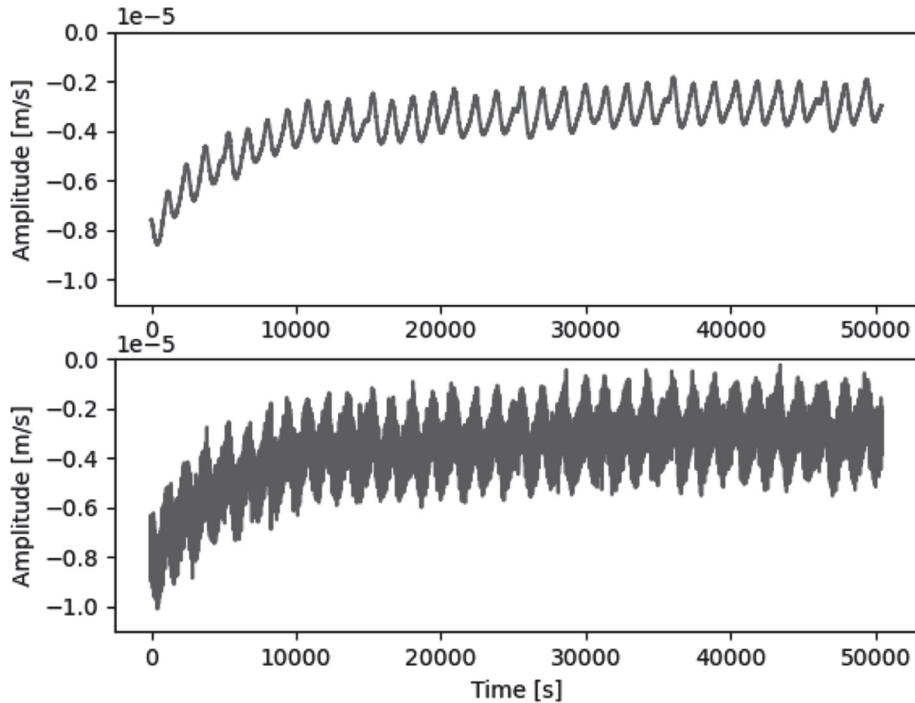


図 3. コーナー周波数 0.01 Hz のローパスフィルターを適用した上下動成分の波形例 (上) と生波形例 (下)

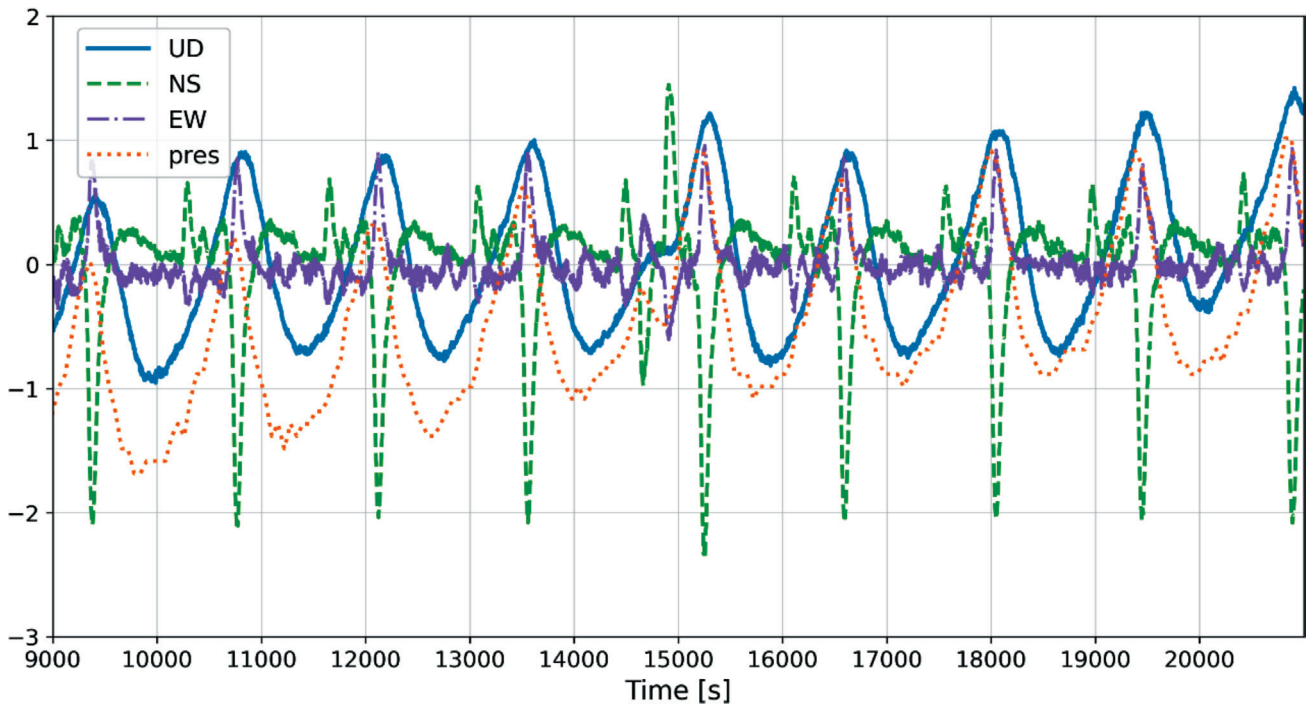


図 4. 地震計波形 3 成分と気圧計のグラフ  
波形ごとの位相差を見やすいよう地震計データ (UD・NS・EW (m/s)) はゼロオフセットを行ったあと  $10^6$  倍しており, 気圧計データ (pres (hPa)) もゼロオフセットを行っている.

ぶせる前と後での上下動成分の地震波形の振幅を比べると約  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  から  $3.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  と約 80% 程度低減していることを確認した。

### 広帯域地震計の比較観測による追加調査

機材運用上の理由から、局舎地下ピットに設置していた TC120s を撤収し、固有周期 20 秒の Nanometrics 社製

Trillium Compact (以下、TC20s) と交換するにあたり、固有周期 360 秒の GURALP 社製 CMG-3T (以下、CMG) も一時的に増設し、それら 3 種類を用いた比較観測を 2022 年 10 月上旬に実施し追加調査を行った。

既存の観測点構成であったデータロガー (白山工業製 LT-7700) に CMG を増設し、隣に白山工業製のデータロガーである LS-9100 と TC120s の組み合わせを臨時的に設

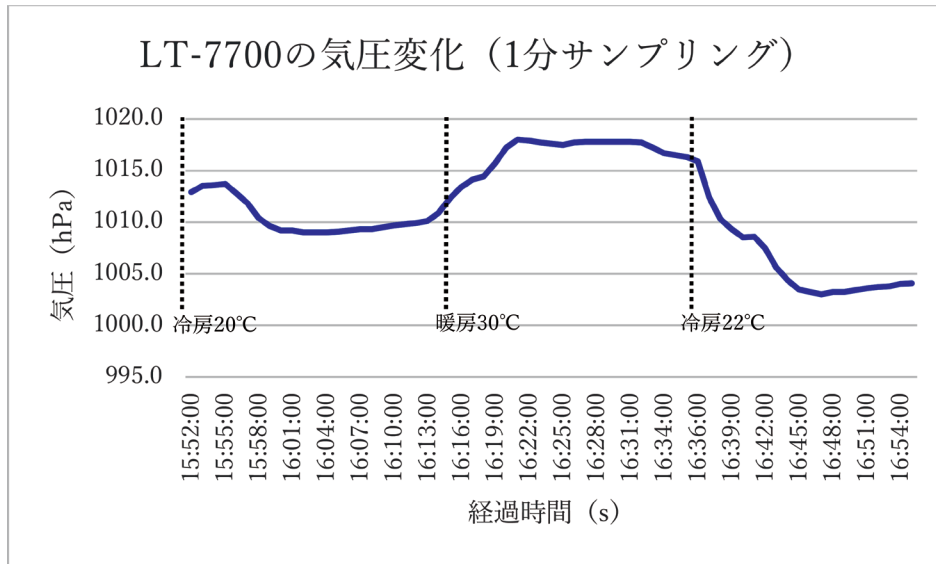


図 5. 陸上局舎の耐圧扉を閉めてエアコンの運転切り替えを手動で行いつつ LT-7700 の気圧計で気圧変動を計測した時のグラフ



図 6. 地下ピットの広帯域地震観測点設置風景  
寸胴の鍋を簡易耐圧容器としてセンサーを保護している

置した。

比較観測期間の中盤に LT-7700 に接続していた既存の TC120s を TC20s と交換し、簡易耐圧容器を同じように被せた (図 8)。LS-9100 は ENABLER 社製の時刻校正器 OSD-clock を用いて  $10^{-5}$  秒の精度まで時刻をフィッティングし、観測終了後同様に時刻校正を実施し、ドリフトに

よる時刻ずれが 0.13s 程度で大きくずれていないことを確認した。

気温変化・気圧変動について詳しく調べるために、携帯型気象計を簡易耐圧容器の内側と外側、コンピュータ室の 3 か所に設置した。簡易耐圧容器の外側に置いた携帯型気象計の気温変化・気圧変動を見ると (図 9)、前回の調査

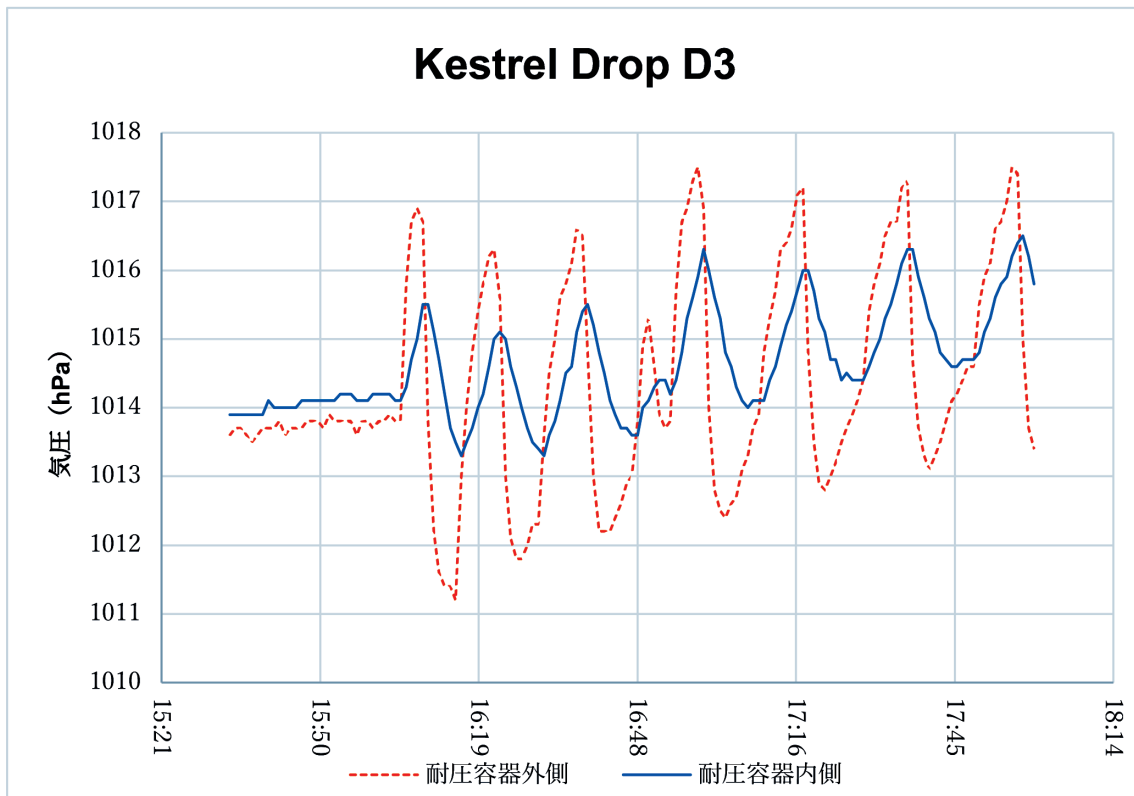
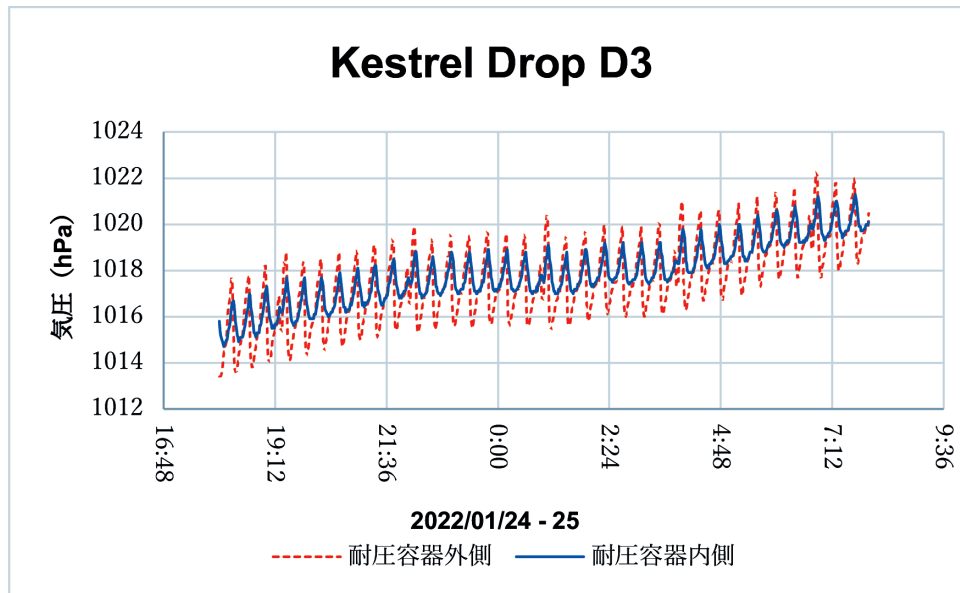


図 7. 簡易耐圧容器の内側と外側に置いた携帯型気象計で計測した気圧値  
上は 1 晩分のデータで下は時間軸を拡大したグラフ

時と同様に地下ピットでは温度変化はなく一定であるのに対し、圧力値は大きく変動していることを確認した。一方コンピュータ室に設置した携帯型気象計は気圧・気温ともに変動しており（図 10）、23：02 直前のデータを見ると、気温が 20.4 度から 20.8 度まで上昇すると気圧が 1021.9 hPa から 1018.1 hPa まで低下しており、その後気温が再び 20.4

度まで低下すると気圧が 1021.9 hPa まで上昇していた。今考えている時間スケールでは外部との大気のやりとりが十分に小さいと考え、温度変化によって引き起こされる気圧変動は

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

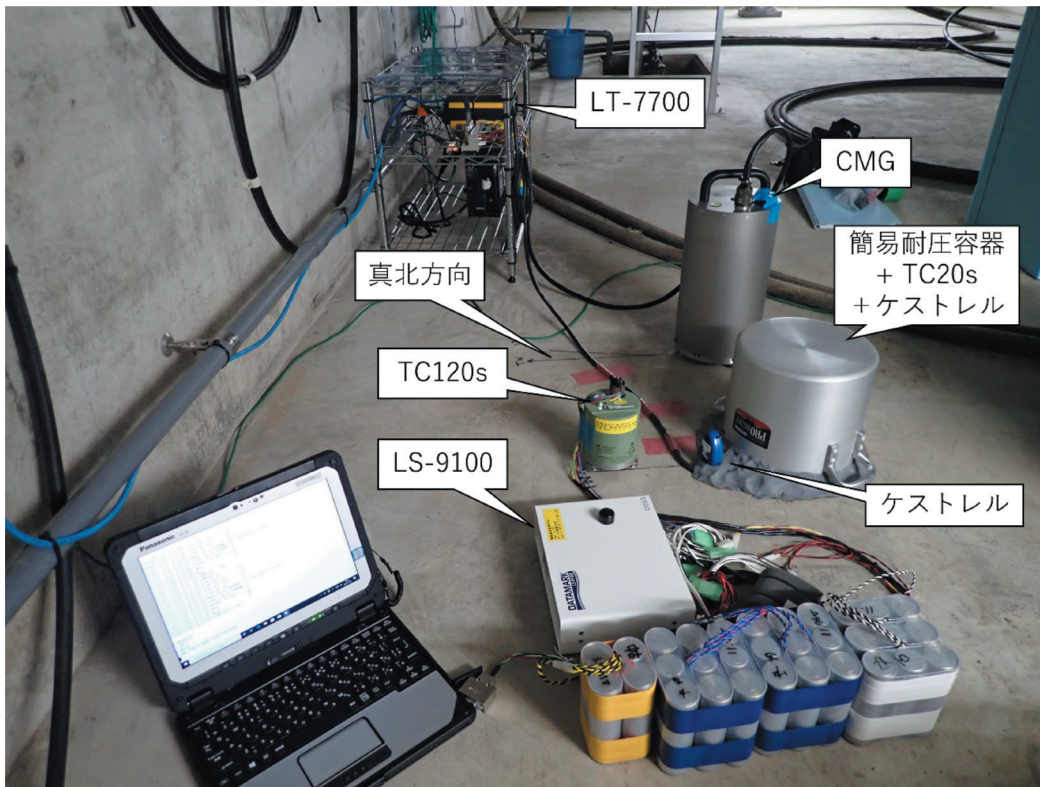


図 8. 広帯域地震計 3 種類を用いた比較観測風景

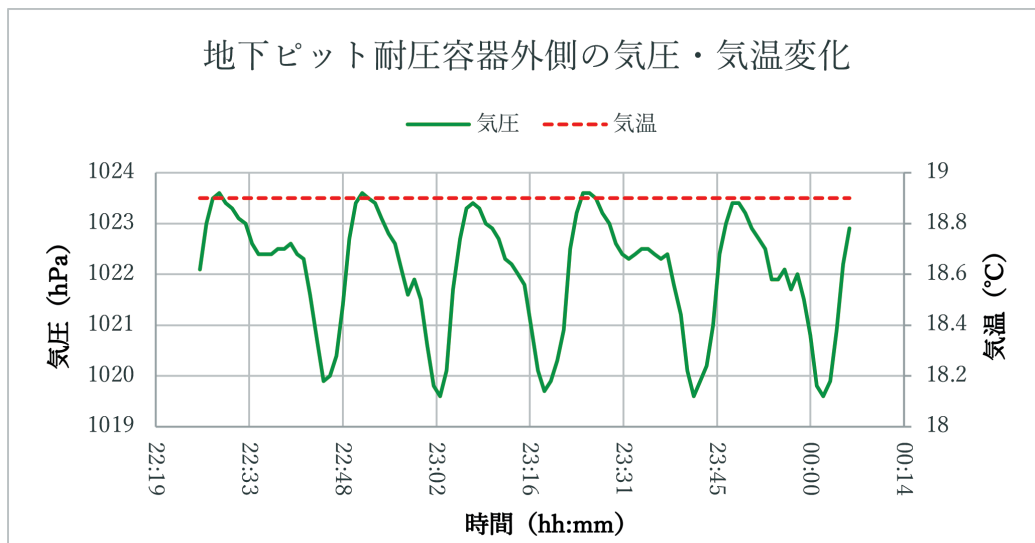


図 9. 地下ピットの簡易耐圧容器外側に置いた携帯型気象計の気圧と気温のグラフ

より,  $P_1$  を 1 気圧 (1013.15 hPa),  $T_1$  を 20°C (293.15 K) とし,  $T_2$  を 30°C (303.15 K) とすると

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} \approx 1047.71$$

となることから 1°C 変化するごとに気圧は 3.46 hPa 変化すると見積られる。一方で観測値は 9.5 hPa/°C となるが, これはコンピュータ室に設置されているサーバー等の発熱や輻射熱などが影響していると考ええる。

### 解析と議論

詳しく地震計波形を見比べたところ (図 11), 長周期ノイズの上下動成分の振幅は耐圧容器を被せていない TC120s が最も大きく, 耐圧容器を被せている TC20s で最も小さいことが分かった。一方で, それぞれの地震計の上下動成分の速度波形と携帯型気象計の気圧値を用いて 1 hPa あたりの速度振幅を求めると TC20s が  $0.47 \times 10^{-6}$  m/s, TC120s が  $0.3 \times 10^{-5}$  m/s, CMG が  $0.39 \times 10^{-6}$  m/s となり, 上下動成分に関しては, TC120s が最も気圧変化の影響を受けており, CMG と TC20s は TC120s と比べてその影響が一桁小さかった。

一方で図 11 上図や図 12 のバヌアツで発生した遠地震の例のように, 水平動成分に関しては CMG が最も気圧変化の影響を受けていることを確認した。

長周期ノイズの位相を比べるとそれぞれ少しずつ異なることが分かった。そこで LT-7700 と CMG の組み合わせ (cmgU), LT-7700 と簡易耐圧容器を被せた TC20s の組み合わせ (TC20sU), LS-9100 と TC120s の組み合わせ (TC120sU) の上下動成分を使用し, それぞれの波形を正規化して位相差を見やすくした波形を並べてみたところ (図 13), CMG と TC120s はほとんど逆位相を示し, TC20s

は TC120s から位相が 250s ほど遅れていた。

TC120s と CMG の位相の違いを検証するため, SAC プログラムで地震計の特性補正を行ったところ, どのセンサーも位相は変化せず TC20s と TC120s は気圧変化と同位相で CMG は逆位相を示すことを確認した (図 14)。念のため比較観測期間中に発生した地震イベントの初動極性や波形を調べてセンサー信号線の結線が誤っていないことを確かめた。

TC20s は TC120s よりも位相が遅れていたが, これは TC20s に簡易耐圧容器を被せていたため TC120s に比べて 250 秒ほど遅れて気圧変動が伝わったことが示唆された。そこで TC120s を 2 台使用して耐圧容器の有無による違いを比較したところ (図 15 上), 同じセンサーでも耐圧容器の有無で同様に位相が遅れることを確認した。

水平動成分は今回使用した 3 種類のセンサーのすべてがそれぞれの NS 成分と EW 成分で逆位相を示すことが分かった。水平動のノイズを詳しく確認するためパーティクルモーションを作成したところ (図 15 (下), 図 16 (③~⑧)), 耐圧容器のない TC120s には明確な規則性が認められなかったが, 耐圧容器を被せた TC20s や耐圧容器を被せた TC120s, そして CMG は系統的に同じ方向を示すことがわかった。また, CMG のパーティクルモーションに対して TC20s や TC120s のパーティクルモーションの方が東西方向に傾いているように見てとれた。図 17 に国土地理院基盤地図情報に図 8 のセンサーのおおよその配置位置と CMG の 2D パーティクルモーションを記載してみたところ, 水平動成分は局舎の北北西から南南東方向を示しており, CMG よりもさらに西側に置いた TC20s や TC120s の 2D パーティクルモーションの方が CMG よりも東西方向に傾いていることから水平動成分は気圧変化に

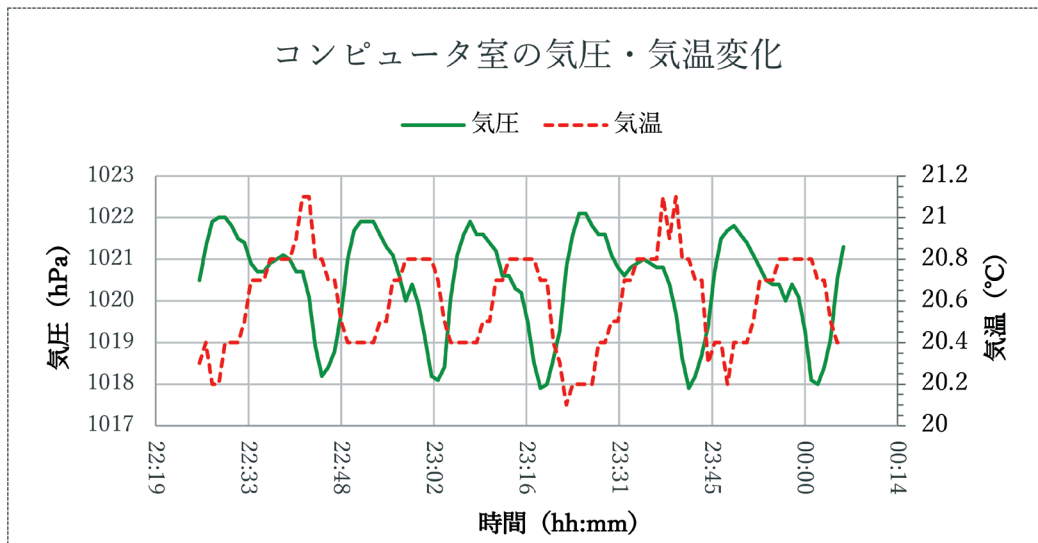


図 10. コンピュータ室に置いた携帯型気象計の気圧と気温のグラフ

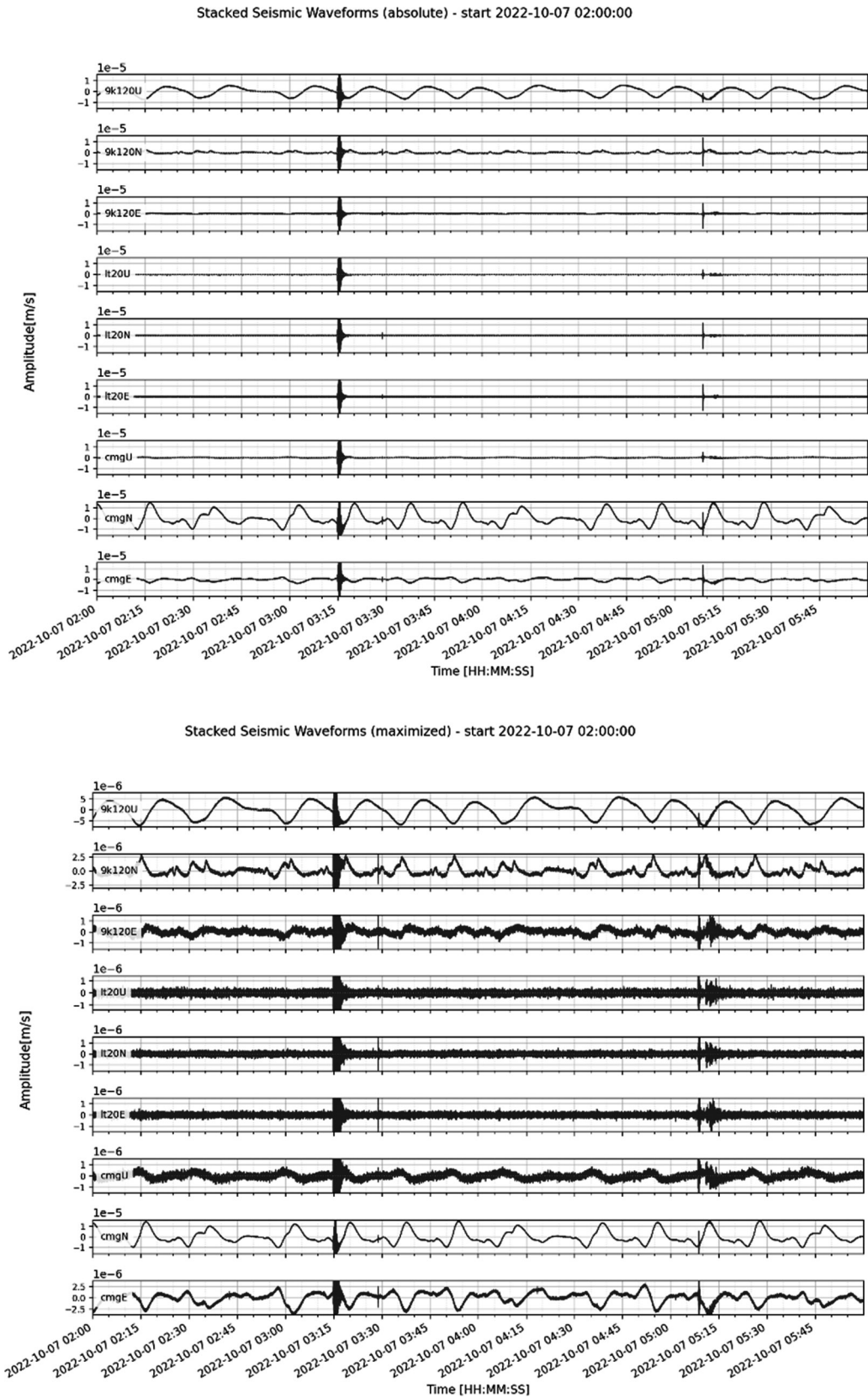


図 11. 図 8 の機器構成で夜間に収録した波形  
 上図が横軸を統一したグラフ、下図が各波形を最大化したグラフ  
 上から LS-9100 に接続した TC120s の UD, NS, EW  
 LT-7700 に接続した TC20s の UD, NS, EW  
 LT-7700 に接続した CMG の UD, NS, EW

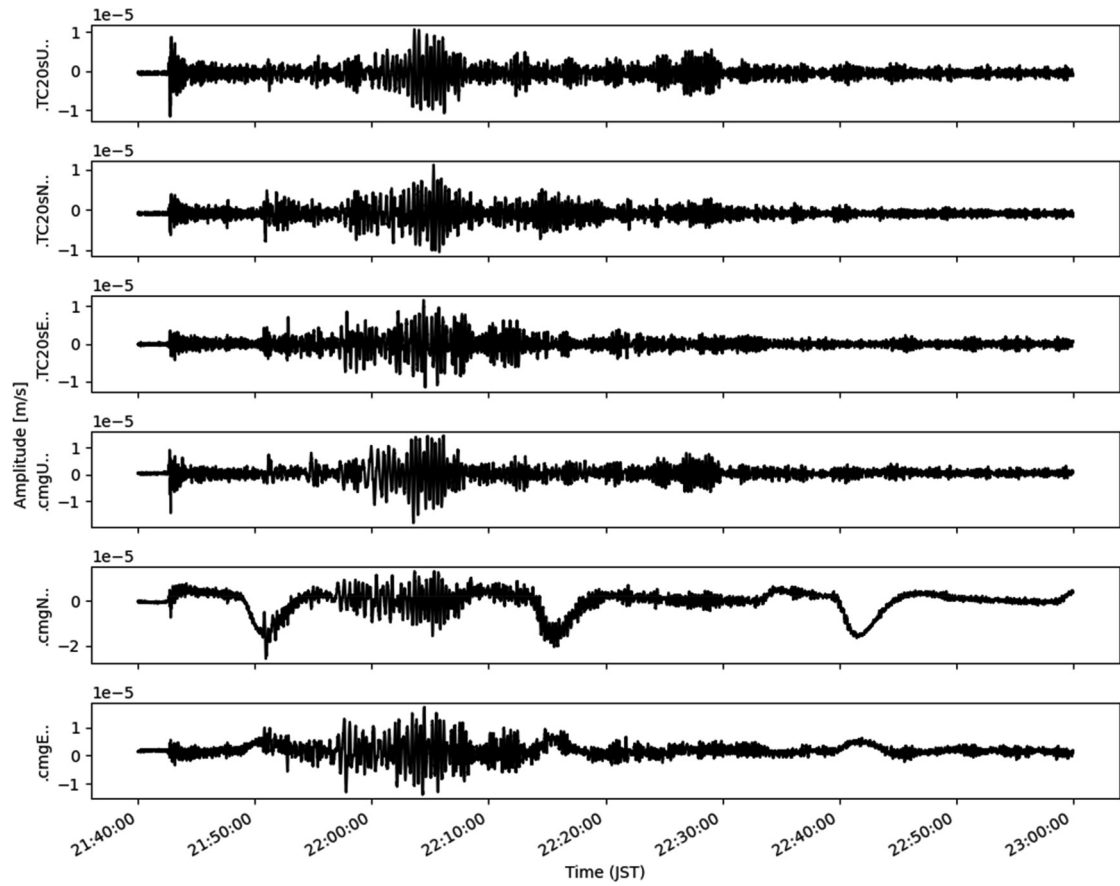


図 12. 2023/01/08 にバヌアツで発生した M7.0 の地震  
上から TC20s UD, NS, EW, CMG UD, NS, EW

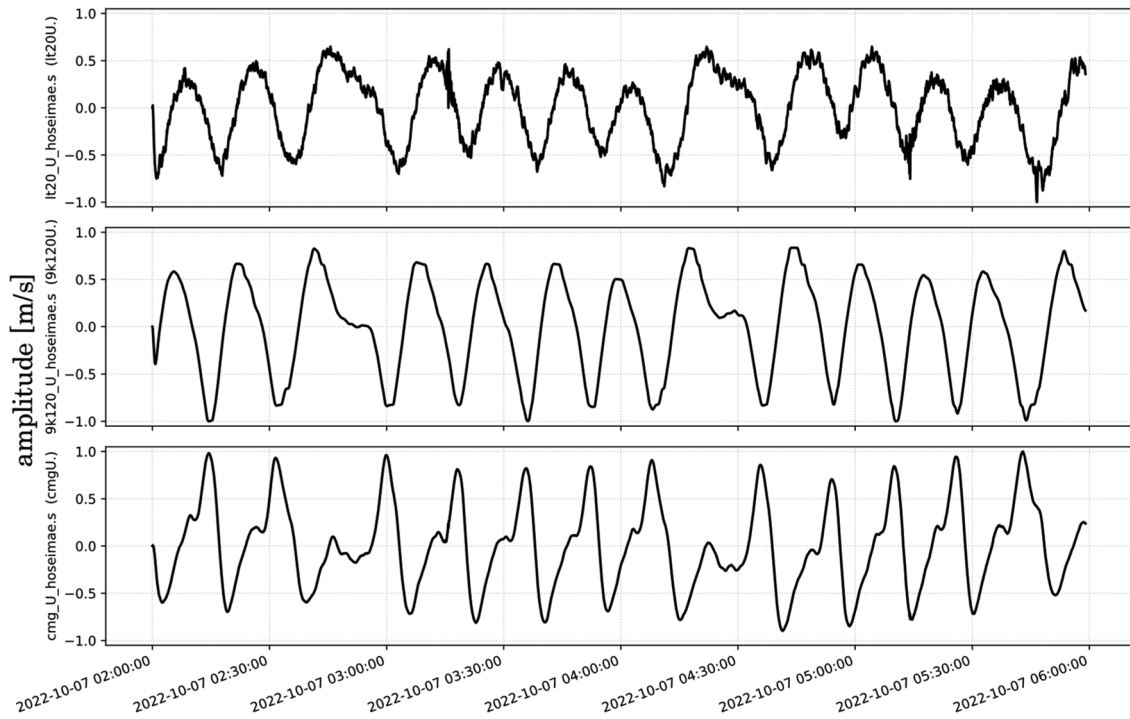


図 13. 3 種類のセンサーの上下動成分を正規化した波形  
上から TC20s (簡易耐圧容器の中), TC120s, CMG

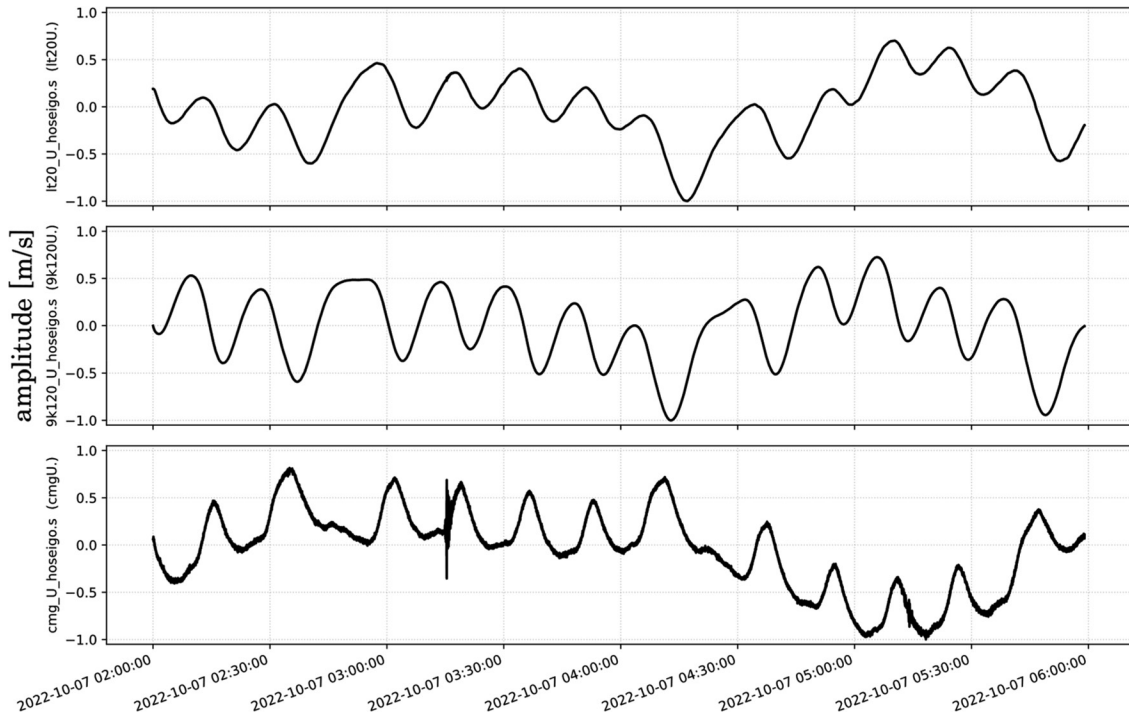


図 14. 3 種類のセンサーの上下動成分のデータについて、地震計の特性補正を行った後正規化した波形上から TC20s (簡易耐圧容器の中), TC120s, CMG

よる何らかの変動方向を示している可能性がある。また、図 16 の①, ②, ④, ⑦から CMG と TC20s の東西方向に約周期 2 時間半の超長周期の変動が見られ、図 16 の①の CMG の上下動成分には東西動成分と逆位相の超長周期の変動があるように見てとれたが原因は不明である。

図 15 下図の左下図や図 16 の⑥図から TC20s と TC120s の上下動成分は水平動の方向に調和するように上下動も変動している一方で、CMG は東西方向に変動している。また、TC20s と TC120s は気圧が大きくなるに伴って UP 方向に変動するが、CMG は DOWN 方向に変動する。これは CMG のセンサーが直交配置であるのに対して、TC20s と TC120s はセンサーの配置構造が対称 3 軸配置の UVW センサーを使用しているため気圧変化に対する影響の違いとして表れている可能性があるが、具体的なメカニズムは不明である。

気圧変動や長周期ノイズのピークの間隔はおおよそ 20 分から 25 分すなわち 1200 秒から 1500 秒ほどの間隔であり、センサーの固有周期はそれぞれ TC20s が 20 秒、TC120s が 120 秒、CMG が 360 秒とどれも本来は観測帯域外である。よって地動の変化として長周期ノイズを正確に捉えているとは言い難い。一方で TC20s は長周期ノイズの影響が十分に小さいことがわかったため、現在では TC20s を用いて定期的に観測を行っている。

## おわりに

本報告では、岩手県釜石市の三陸沖 OBCS 陸上局舎に設置された釜石八木浜観測点において、広帯域地震計の記録に混入する長周期ノイズの原因調査および対策について述べた。

局舎内の気圧・気温および地震計波形の比較観測の結果、長周期ノイズは局舎内に設置されたエアコン（空調設備）の稼働に伴う気圧変動に起因することが明らかとなった。局舎は高い気密性を有しており、コンピュータ室の温度変化が局舎全体の気圧を周期的（約 20 分周期）に変動させていることが確認された。

センサーを覆う簡易耐圧容器（寸胴鍋とパテによる密閉）を導入して TC120s に被せたところ、容器内部の気圧変動を外側の約半分抑制し、上下動成分のノイズ振幅を約 80% 低減させることに成功した。これは特別な設備改修なしに実施可能な有効なノイズ対策であると言える。現在は TC20s に簡易耐圧容器を被せた状態で定期的な観測を行っている。

パーティクルモーションの解析により、北北西から南南東方向の系統的な水平動が確認された。局舎全体は水密構造であるため、内部で繋がっている地下ピット内の気圧変化を引き起こしており、長周期ノイズがその気圧変化に起因することがわかった。

本観測で確認されたノイズの卓越周期（約 20～25 分）

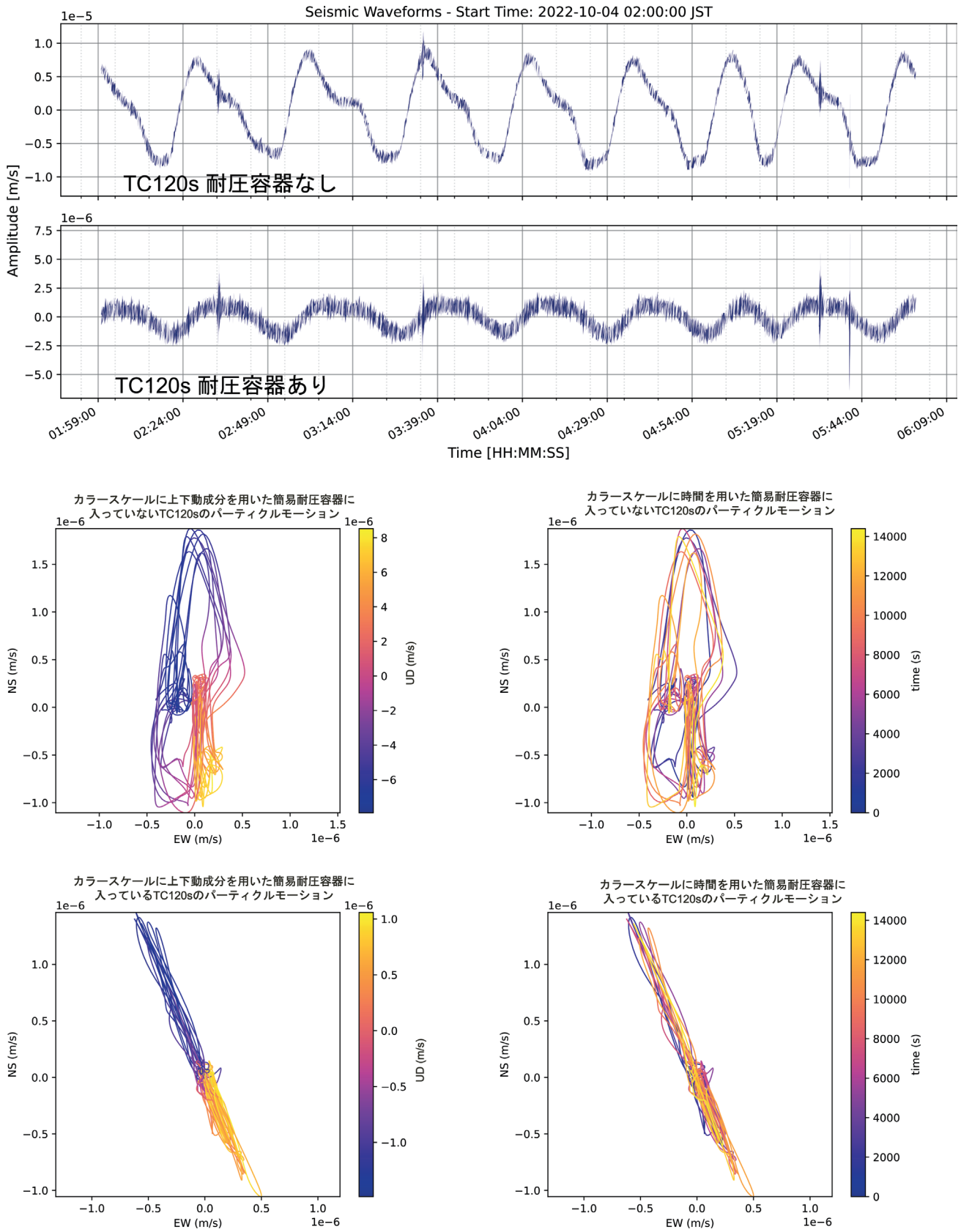


図 15. 耐圧容器を被せてない TC120s と被せてある TC120s の上下動成分波形比較図 (上) と 2D パーティクルモーション (下) パーティクルモーションは簡易耐圧容器の有無でそれぞれカラスケールに上下動成分を使用したものと時間を使用したものの計 4 枚作成図

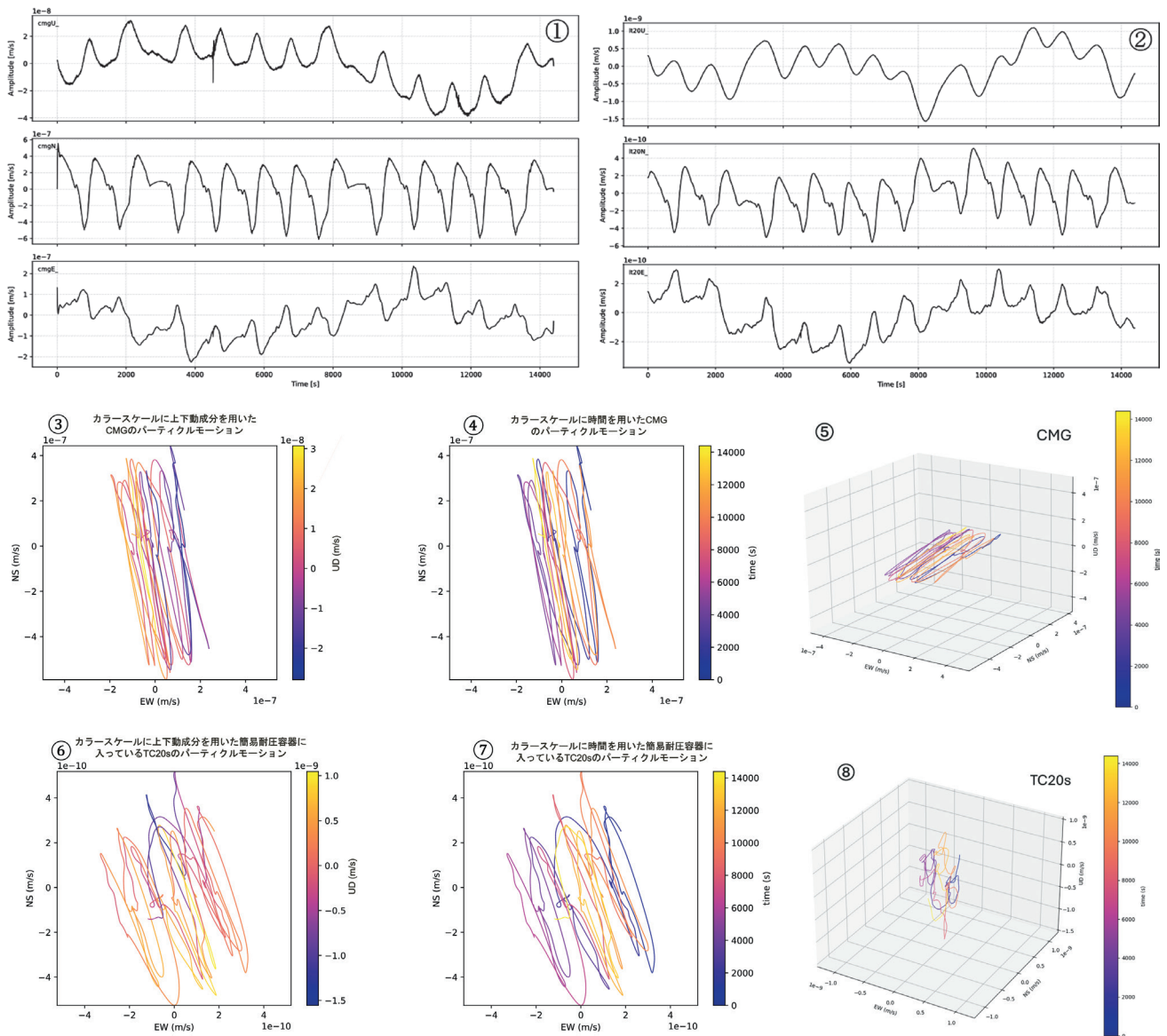


図 16. ① CMG の 3 成分の波形, ② 簡易耐圧容器に入った TC20s の 3 成分の波形, ③ カラースケールに上下動成分を使用した CMG のパーティクルモーション, ④ カラースケールに時間を使用した CMG の水平動のパーティクルモーション, ⑤ CMG の 3 成分波形の 3D パーティクルモーション, ⑥ カラースケールに上下動成分を使用した TC20s の水平動のパーティクルモーション, ⑦ カラースケールに時間を使用した TC20s の水平動のパーティクルモーション, ⑧ TC20s の 3 成分波形の 3D パーティクルモーション

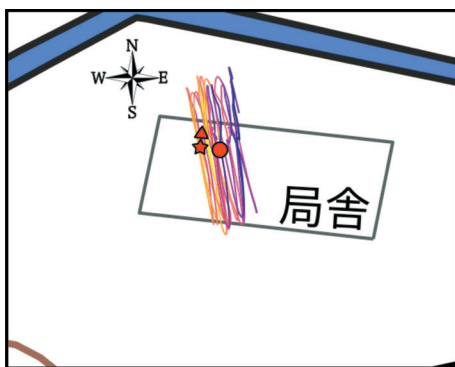


図 17. 国土地理院基盤地図情報に図 16 の CMG の 2D パーティクルモーションと図 8 のセンサーのおおよその位置 (赤○: CMG, 赤△: TC20, 赤☆: TC120) を記載して作成

は使用した各センサーの固有周期を大きく超える帯域であるものの、TC20s のパーティクルモーションでは水平成分にて  $5 \times 10^{-10}$  m/s 程度と非常に小さい変動であった。そこで現在は TC20s に耐圧容器を被せ、長周期ノイズの影響が非常に小さい状態で地震観測を継続している。今後、より広帯域な地震観測が必要になった場合は、さらに高度な耐圧容器やデジタル処理によるノイズ除去手法を検討するなどに対応したい。

謝 辞

本稿の改訂にあたり、査読者 2 名および技術研究報告編集委員会の方々には、大変丁寧かつ有益なご助言を何度も

いただきました。ここに深く心より感謝申し上げます。

## 文 献

- Shinohara, M., T. Yamada, T. Akuhara, K. Mochizuki, and S. Sakai, 2022, Performance of seismic observation by distributed acoustic sensing technology using a seafloor cable off Sanriku, Japan, *Front. Mar. Sci.*, 9 : 844506, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.844506>.
- Fukushima, S., M. Shinohara, T. Yamada, R. Hino, R. Azuma, Y. Ito, Y. Yamashita, H. Takano, 2025, Enhanced P-wave velocity imaging by marine airgun-source seismic surveys with distributed acousticsensing, *Scientific Reports* volume 15, Article number : 18111 (2025), <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01190-0>
- 90-0  
田中伸一・宮川幸治・八木健夫・荻野 泉・山田知朗・酒井慎一・ト部 卓・篠原雅尚, 2014, 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム釜石陸上局舎の再建, 東京大学地震研究所技術研究報告, No. 20, 25-33 頁, <https://doi.org/10.15083/00032144>.
- 森田裕一・酒井慎一・中川茂樹・笠原敬司・平田 直・鏡 弘道・加藤拓弥・佐藤峰司, 2010, 首都圏地震観測網 (MeSO-net) のデータ伝送方式について—自律協調型データ送信手順 (ACT protocol) の開発—, 東京大学地震研究所彙報, 84, 89-105, <https://doi.org/10.15083/0000032435>.
- 国土地理院ウェブサイト, <https://service.gsi.go.jp/kiban/> (参照: 2025-11-19)