

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—

宮川幸治^{*†}・渡邊篤志^{*}

Deployment of online broadband seismic stations in Chiba and Ibaraki Prefectures after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Koji MIYAKAWA^{*†} and Atsushi WATANABE^{*}

Abstract

After the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, we deployed fifteen online broadband seismic stations in Chiba and Ibaraki Prefectures. The area we deployed is located close to the main slip area of the earthquake and the area of Boso slow slip events which occur about every six years. The purpose of the deployment is to study post-seismic activity and slow slip events using broadband seismic waves. They are composed of ten existing stations in Chiba Prefecture, and five newly constructed stations in Ibaraki Prefecture. First we repaired four existing stations since they had troubles by power outage after the earthquake. Then we started site survey for new stations. We conducted temporal seismic observations at all the thirteen candidate sites for about one week to evaluate ground noise levels, and selected five sites. Construction started in July and four stations have been completed and went online by mid-September, but the last station (E. IBR) remained completion until mid-October caused by the delay of the electric power service.

Key words : Broadband seismometer, Seismic station, Site survey, Ground noise level

はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) は、東北から関東にかけての東日本一帯に甚大な被害をもたらした。震源域は岩手県沖から茨城県沖にかけて南北約 500 km, 東西約 200 km の広がりを持ち (図 1), 本震後も震源域やその周辺では余震活動が続いている。また内陸部においても誘発地震と考えられる活動が活発化しており, 4 月 11 日には福島県南部で Mj7.0 の内陸地震が発生した。

地震研究所技術部総合観測室は本震直後から、活発化した余震活動・誘発地震活動をより詳細に観測することを目的として、衛星テレメータ地震観測装置による臨時オンライン地震観測点の設置や、臨時オフライン地震観測点の設置 (芹澤ほか, 2011) を実施して来た。その後 4 月 21 日に

技術職員と教員が集まって開かれた総合観測室会議において、千葉県と茨城県に広帯域地震計による 15 点程度のオンライン広帯域地震観測網 (房総茨城広帯域アレイ) を整備することが決定し、筆者がその取り纏め役となった。観測期間は、余震活動が収まるまでの 5 年程度である。

千葉県と茨城県は震源域の南端付近に位置することから、震源域の拡大や今後の推移を把握するためにはこの地域での地震観測は重要である。また房総半島東部から東方沖にかけての地域では 1980 年以降約 6 年間隔で、フィリピン海プレートと陸側プレートの境界面でスロースリップが発生しており (防災科研, 2008), 2011 年 10 月下旬にも発生した (防災科研, 2011) (図 1)。これまでに中で最も短い約 4 年間隔で再来したことから、東北地方太平洋沖地震による影響も考えられる。

広帯域地震計による観測は、スロースリップなどの低い周波数のイベントを検知する能力を向上させると共に、レーン関数解析による地下速度構造の解明や、地震波形を用いた断層運動の解析などにも貢献すると期待される。けれどもこの地域における、既存の定常広帯域地震観測点

2011 年 11 月 4 日受付, 2011 年 11 月 14 日受理

[†] miyakawa@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所技術部総合観測室。

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

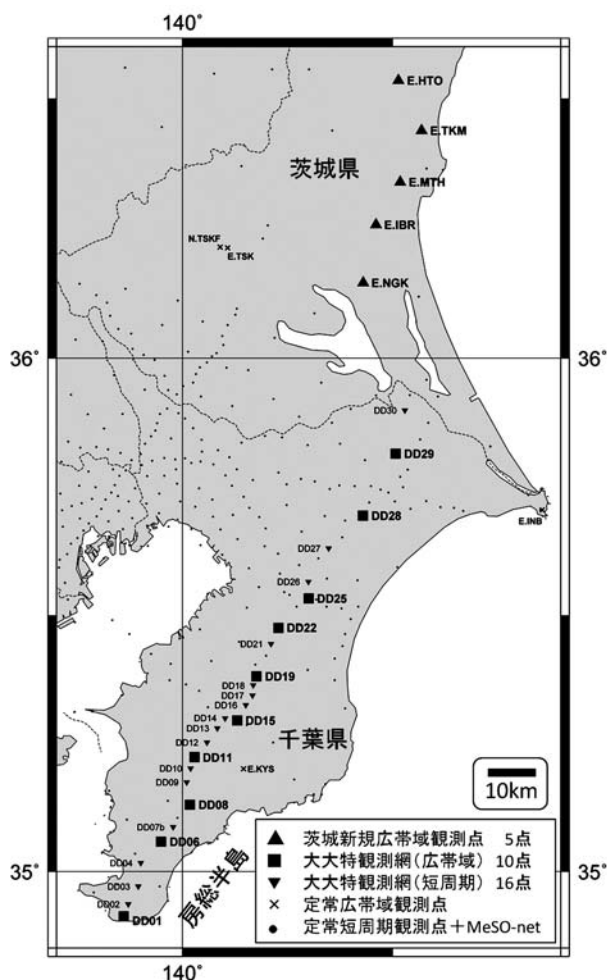


図 2. 房総茨城広帯域アレイ観測点配置図。▲：茨城県に構築した新規広帯域地震観測点（5 点）。■：大大特観測網の広帯域地震観測点（10 点）。▼：大大特観測網の短周期地震観測点（16 点）。×：広帯域地震計が設置されている既存の定常観測点。●：短周期地震計が設置されている既存の定常観測点、及び首都圏地震観測網（MeSO-net）。

表 1. 房総茨城広帯域アレイ（15 点）の観測点情報。上から 5 点が茨城県に構築した新規広帯域地震観測点，残り 10 点が大大特観測網の広帯域地震観測点。

観測点名	観測点コード	地震計	収録装置	サンプリング周波数	ノイズ調査時の地点名
常陸太田	E. HTO	CMG-40T	LF-1100R/LF-2100R	100Hz	IBB-G/IBB1
東海村	E. TKM	CMG-40T	LF-1100R/LF-2100R	100Hz	IBB-L/IBB2
水戸東	E. MTH	CMG-40T	LF-1100R/LF-2100R	100Hz	IBB-K/IBB3
茨城町	E. IBR	CMG-40T	LF-1100R/LF-2100R	100Hz	IBB-J/IBB4
行方北	E. NGK	CMG-40T	LF-1100R/LF-2100R	100Hz	IBB-I/IBB5
DD29	DD29	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD28	DD28	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD25	DD25	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD22	DD22	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD19	DD19	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD15	DD15	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD11	DD11	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD08	DD08	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD06	DD06	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	
DD01	DD01	CMG-40T	LS-7000XT	200Hz	

は図2に×で示すように、定常短周期地震観測点や MeSO-net 観測点（酒井・平田，2009，笠原ほか，2009）と比較して非常に少なく，また他の地域の定常広帯域点の密度と比較しても少ない．そこで今回の広帯域地震計による観測網強化では，これらの定常広帯域点の間を埋め，且つ地震波の広がり の把握を容易にするために南北に直線状に観測点を配置することとした．

千葉県には，大都市大震災軽減化特別プロジェクト（Hirata *et al.*, 2006，文科省・地震研，2006）の一環として，2003 年頃に 30 点からなるオンライン地震観測網（大大特観測網）が構築されており，そのうち 9 点が広帯域地震観測点として本震発生時点でも運用されていた．プロジェクトは 2007 年に終了しており，今年度末で観測を終了させることになっていたが，観測を継続して今回の観測網強化に組み込むこととし，更にもう 1 点増設することで千葉県に 10 点の広帯域地震観測点を配置することとした．また茨城県には，約 10 km 間隔で南北に並ぶ広帯域地震観測点を新たに 5 点構築することとした．したがって房総茨城広帯域アレイを，大大特観測網の広帯域点 10 点と，茨城県に新たに構築する 5 点からなる計 15 点の観測網で構成することとした（図 2，表 1）．

本報告では，房総茨城広帯域アレイが完成するまでの流れを概説するとともに，観測点候補地における地動ノイズ調査の結果，観測点の構成の詳細，完成後の観測点のノイズレベルについて報告する．

大大特観測網の整備

大大特観測網は 2011 年 4 月時点で 26 点が稼働しており，そのうち 17 点が短周期地震観測点，9 点が広帯域地震観測点であった．使用センサーは，短周期地震観測点が固有周期 1 秒の Sercel 製 L-4C-3D，広帯域地震観測点が帯域 30 秒～50 Hz の Guralp 製 CMG-40T である．広帯域地震観測点の主な構成を図 3 に，DD01 広帯域地震観測点の外観を図 4 に示す．

房総茨城広帯域アレイの整備においてまず着手したのは，大大特観測網の保守と 1 点の広帯域地震観測点の増設であった．大大特観測網は本震後の停電などの影響で，4 点が障害を抱えていた．そこでまず，それらの観測点に訪問して保守作業を実施し観測を復旧させた．障害の原因は，1 点が LS-7000XT データロガーの故障，1 点がアンペアブレーカーの遮断による電力喪失，残る 2 点が ISDN ルータの設定ミスによる再起動の失敗であった．1 点の広帯域地震観測点の増設については，迅速性を優先するために，既存の短周期地震観測点のセンサーを CMG-40T に交換することで対応することとし，既存の広帯域地震観測点の間隔などを鑑みて，DD06 短周期地震観測点を広帯域化した．その結果，大大特観測網は 16 点の短周期地震観測点と，10

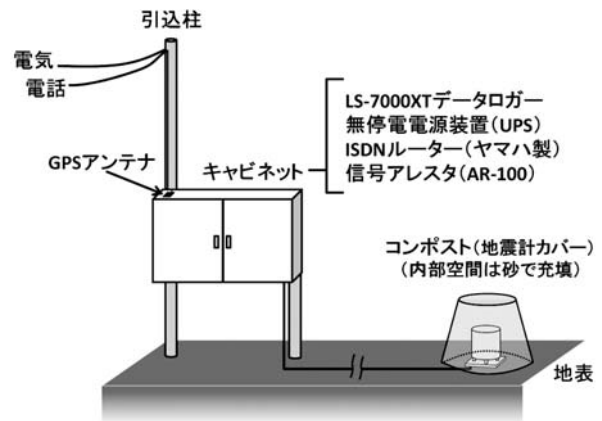


図 3. 大大特観測網の広帯域地震観測点の主な構成。

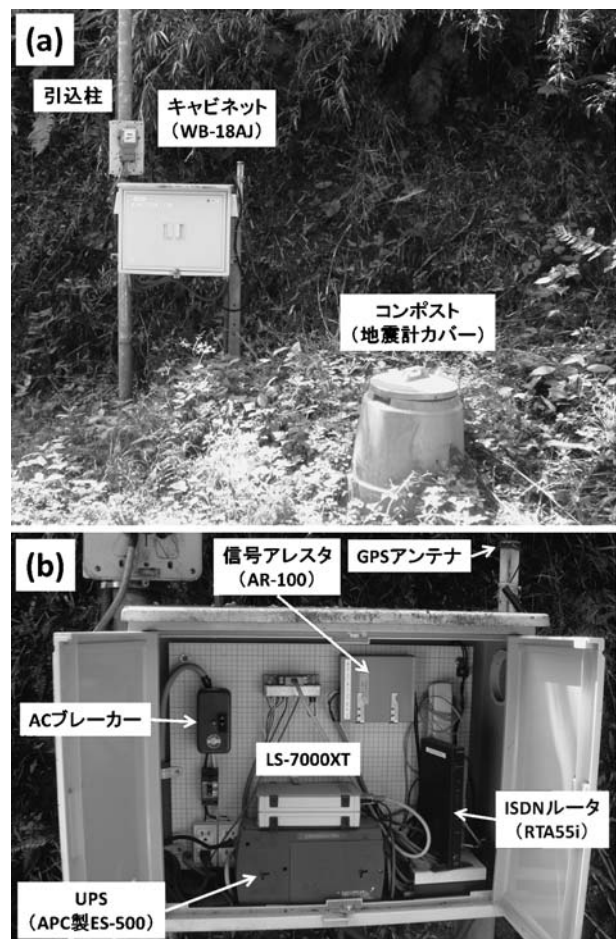


図 4. 大大特観測網の DD01 広帯域地震観測点。

点の広帯域地震観測点からなる観測網に変更となった。

茨城県での新たな 5 点の構築

1. 候補地の調査

大大特観測網の整備が終了した 5 月中旬から，茨城県で新たに構築する 5 点のオンライン広帯域地震観測点の候補

地調査作業に入った。候補地の探索は、予め指示されていたターゲット地点(図5の星印)周辺のエリア(IBB1~IBB5)で実施した。ターゲット地点のうちIBB1を除く4点は、地質図(吉岡ほか, 2001)上では第四紀更新世の段丘堆積物に覆われており、地震計設置に適するとされる硬い岩盤を期待することは出来なかった。また茨城県では、地下水をくみ上げて稲作を行う陸田が盛んであり、揚水ポンプが多くの田んぼに設置されていることが現地を訪問してみて判明した。よって候補地選定をする際には、人口密集地・ある程度の車通りがある舗装道路・揚水ポンプなどから離れた、人工的活動の少ない場所で、且つ雨水などが溜まり難い地形の場所を探すこととした。またオンライン化の必要があるため、有線回線・携帯電話・衛星通信(VSAT)の優先順位をつけて、これらの通信が可能で且つ商用電源も利用可能な場所を探した。これらの制約下での候補地探しを現地で効率的に行うために、事前に地質図・地形図・オンライン地図サービス(Google Earthなど)を利用して、ターゲット地点周辺の調査を行ってから現地入りした。

候補地探しは、基本的に車で移動しながら目視で適地か

どうかを判断して行った。適地を見つけた場合はまず土地の所有者を探し、観測の目的を伝えて土地利用の協力を求めた。被災地であるにもかかわらず、協力的な方が多かった。

2. 地動ノイズ調査

見た目は静かそうでも実際には地動ノイズが大きいということや、訪問した時間帯だけ静かだったということはあり得るので、全ての候補地で地動ノイズ調査を約1週間実施した。地動ノイズ調査は、Lennartz 製 LE-3Dlite 地震計(固有周期1秒)・白山工業製 LS-7000XT データロガー・64 Ah 鉛蓄電池バッテリーで構成される機動観測装置(図6)を使用して行った。地震計は深さ約0.5 mの地中に埋設し、100 Hz サンプリングで観測を行った。

収録された地動ノイズデータの評価は、地震波形の時間周波数解析ツール(宮川・酒井, 2008)を上下動成分に適用して、a) 観測期間中における1分間の振幅の二乗平均平方根(RMS グラフ)、b) 1日毎のスペクトログラム(スペ

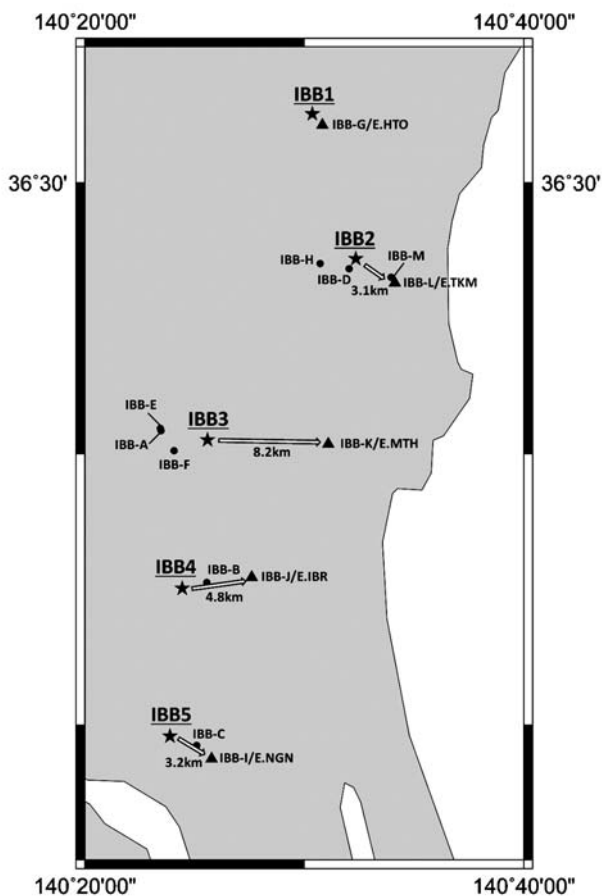


図 5. 茨城県に構築した新規広帯域地震観測点の候補地の配置図。★: ターゲット地点 (5 点; エリア名 IBB1~IBB5)。●及び▲: 候補地点 (計 13 点; IBB-A~IBB-M)。▲: 最終候補地点 (5 点)。

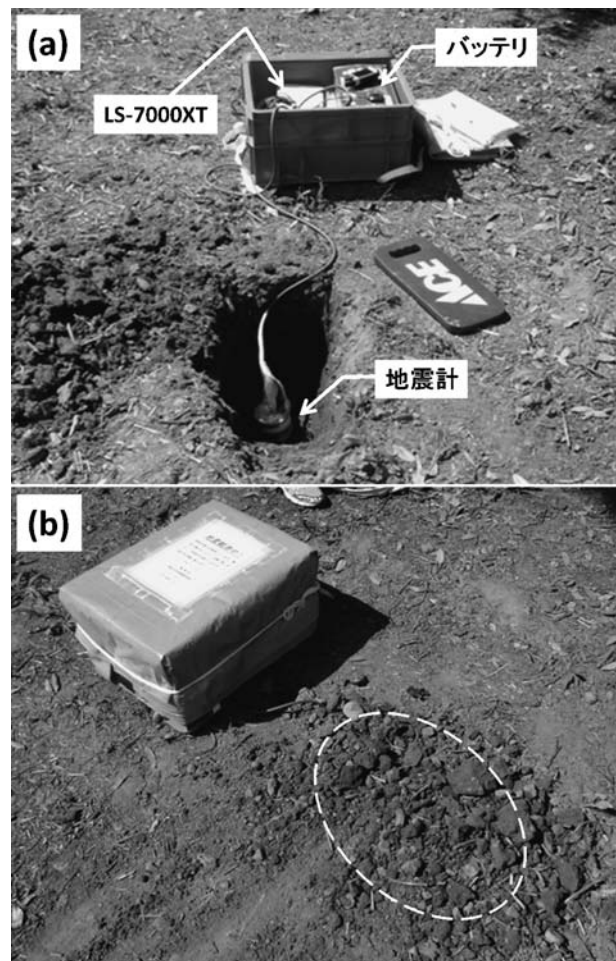


図 6. 機動観測装置を用いた地動ノイズ調査。(a) 観測準備の様子。地震計は約 0.5 m 埋設し、LS-7000XT データロガーとバッテリーはコンテナボックスに収納される。(b) 観測中の様子。破線枠内に地震計が埋設されている。

クトログラム), c) 1 時間毎の時系列波形 (時系列波形グラフ) の 3 種類のグラフに出力して行われた。図 7 に, IBB-G/IBB1 観測点候補地におけるグラフを示す。各グラフの評価は, 以下の基準で行った。

a) RMS グラフ

RMS の下限は日周変動しており, どの観測点も日中は高く, 夜間は低くなっている。今回の候補地選定では, この夜間の下限が $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m/s}$ 以下, 日中でも $1 \mu\text{m/s}$ を超えない範囲の場所とした。また RMS の上限については, 地震イベントや車ノイズなどの影響でスパイク的に $10 \mu\text{m/s}$ を超えることがあるが, RMS の大部分が $5 \mu\text{m/s}$ (水色線) 以下に収まっていることを判断基準とした。

b) スペクトログラム

不可解な周波数ピークが無いかをチェックした。また地震の解析では 10 Hz 以下の帯域が主に使われるので, その帯域のノイズレベルが低い点をより評価することとした。なお, 地震イベントはスペクトログラム上では 0 Hz 辺りから真直ぐ上に伸びる赤～黄色の線として現れ, 大きい地震ほど高周波数域まで赤くなり, 線幅も広くなる。それに対し, 数 Hz あたりから上に伸びる線は自動車が通り過ぎる時などのノイズであることが多い。

c) 時系列波形グラフ

観測期間中の 1 時間毎の時系列波形を丹念に見て, 地震イベントの波形が片揺れしたりして不自然でないかをチェックしたり, P 波初動の立ち上がりが常にはっきりせずになだらかになっていないかをチェックしたりした。また初動の読み取りが困難となるような人工的な地動ノイズが長期間入っていないかもチェックした。

上記の評価を行った結果, 候補地を見つけた時は良さそうだった場所でも, 地動ノイズ解析をしてみると不適と判明する場所が何箇所もあったので紹介する。

図 8 は, IBB-H/IBB2 観測点候補地のスペクトログラムである。8 時台と 17 時台の数十分間のみに, 特徴的なピークが $22.5 \text{ Hz} \cdot 30 \text{ Hz} \cdot 39 \text{ Hz}$ 周辺に現れていることが確認出来る。これは約 50 m 離れたところにあった揚水ポンプが作動したことによる地動ノイズであった。揚水ポンプの所有者に確認したところ, 陸田に給水するために春から秋にかけて, 毎日朝と夕方に 20 分程動かしているとのことだった。この候補地を見つけた時にはポンプは動いておらず, 民家の裏に隠れていたのが気付くことが出来なかった。

図 9 は, IBB-C/IBB5 観測点候補地の時系列波形グラフである。深夜の時間帯にのみ, 数秒間隔で規則的な揺れが記録されていた。地主に聞いたところ, 比較的電力需給に

余裕のある深夜にのみプレス機械を動かしている工場が約 1.3 km 離れたところにあり, 恐らくその工場のプレスノイズが記録されているのだろうとのことだった。

5 月中旬から始めた候補地探しは結局, 13 ヶ所 (地点名 IBB-A～IBB-M) で地動ノイズ調査を行い, その中から 5 ヶ所が決定された。全観測点候補地における RMS グラフとスペクトログラムを図 10 (IBB-G/IBB1 は図 7 にあるので除く) に, 各候補地の地点情報及び地動ノイズ調査結果を表 2 に示す。図 5 に示すように, 最終的に決定された候補地の中にはターゲット地点から最大で 8 km 程ずれた場所もあるが, ずれはほぼ東西方向であり, 南北方向には約 10 km 間隔で並んでいるので, この配置で決定した。最終候補地には正式な観測点名と観測点コードが付与され, IBB-G/IBB1 は常陸太田観測点 (E. HTO), IBB-L/IBB2 は東海村観測点 (E. TKM), IBB-K/IBB3 は水戸東観測点 (E. MTH), IBB-J/IBB4 は茨城町観測点 (E. IBR), IBB-I/IBB5 は行方北観測点 (E. NGK) と命名された。

3. 観測点の構成

図 11 に, 新規 5 点の構築前に考案した観測点の構成を示す。このデザインは, 2011 年 2 月に霧島山新燃岳周辺に構築された 10 点からなる広帯域地震観測網 (辻ほか, 2011) を参考にした。以下に各要素について概説する。

1) 広帯域地震計・マンホール (図 12)

広帯域地震計は, 大大特観測網と同じ CMG-40T を使用した。広帯域地震計は気温変化や地震計周囲の空気の対流に対して敏感であり, その影響は自己ノイズに現れて観測データの品質を落とすことが知られている (Guralp ホームページ, 2006)。そこで地震計は深さ約 1 m の穴の底に設置することにした。地中に設置することで気温の変動を抑えられ, また地表付近の柔らかな表土に起因する雑微動を幾らか抑えることも期待出来る。穴には, 側壁の崩れを防ぐために $\phi 870 \text{ mm} \cdot$ 高さ 0.6 m のマンホール 2 個を積み重ねて設置し, 地上に 0.2 m 程マンホールが出る形とした。マンホールの上部には特製の鉄製カバーを作って蓋をした。穴の底には縦横 430 mm , 高さ 300 mm の地震計台が設置されているが, 地面とのカップリングを高めるために長さ 600 mm の鉄筋が地震計台と地面の中に 6 本刺さっている。地震計台に設置された広帯域地震計は, 地震計周囲の気温変化と空気対流を抑えるために, 厚さ 100 mm のスタイロフォーム板を組んだ BOX で覆い, 更にスタイロフォーム BOX と地震計との間に出来る隙間には 5 号珪砂を充填した。また観測期間中に, 強震動により地震計が動く可能性もあることから, 地震計の足の 1 つを石膏で固めて地震計台に固着させ, またスタイロフォーム BOX も地震計台にアンカーされた 8 本の $\phi 2.6 \text{ mm}$ 針金に刺すことで固定させた。

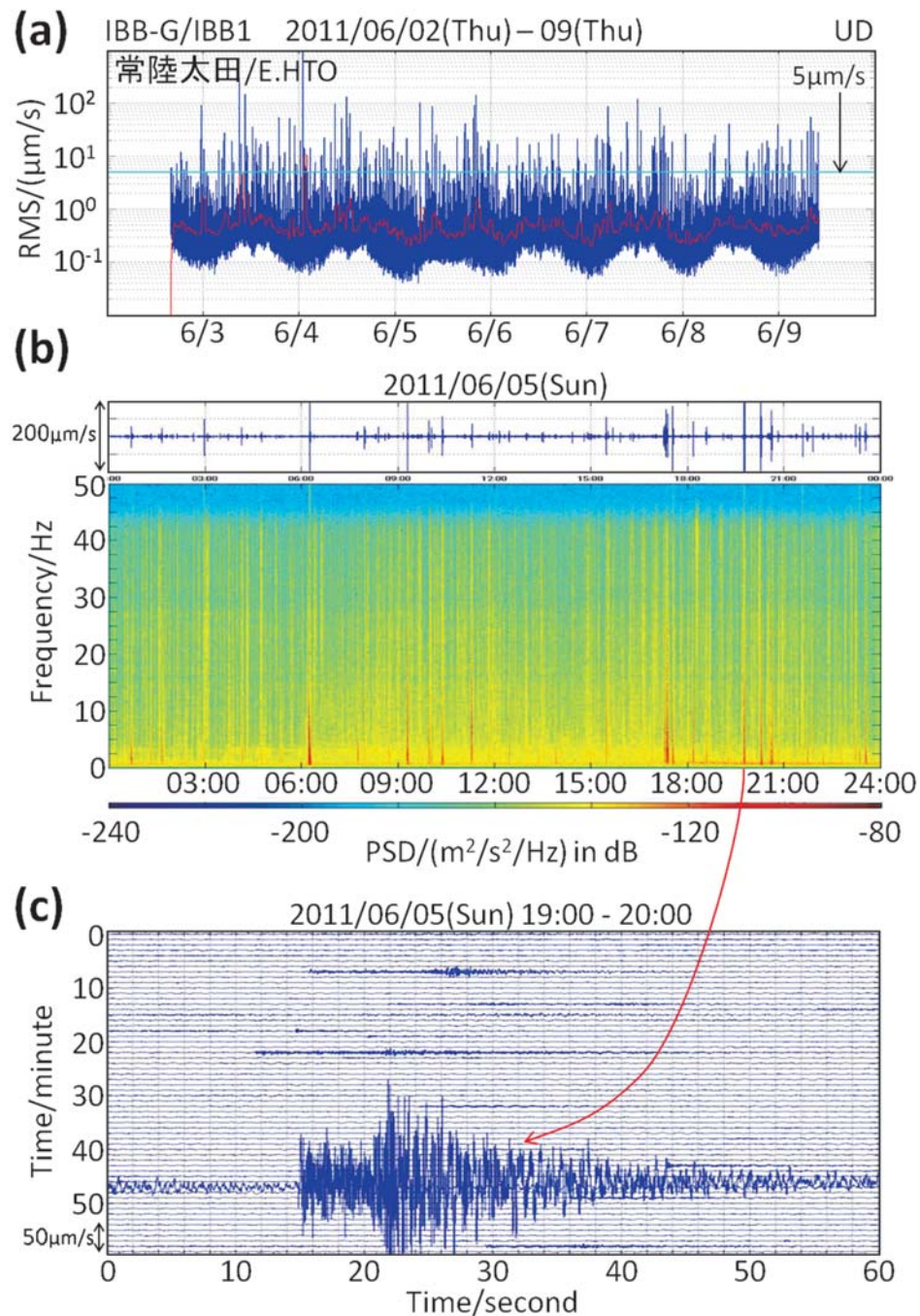


図 7. IBB-G/IBB1 観測点候補地における地動ノイズ調査結果（上下動成分）. (a) 観測期間中における 1 分間の振幅の二乗平均平方根（RMS）. 赤線は RMS の 1 時間移動平均を示す. (b) 1 日間の時系列波形（上段）とスペクトログラム（下段）. (c) 1 時間の時系列波形. スペクトログラムと 1 時間の時系列波形グラフには、福島県浜通りの深さ約 20 km で発生した Mj4.1 の地震が記録されている.

2) データ収録伝送装置

白山工業製 LF-1100R/LF-2100R（LF ロガー）を使用した。LF ロガーではデータ伝送方式として、WIN プロトコル（卜部, 1994）の他に ACT プロトコル（森田ほか, 2009）を使用することが可能である。ACT プロトコルは、通信が途絶えてサーバー側で欠測が発生しても、通信再開後に欠測期間中のデータを全て観測点

側から再送することで、サーバー側では無欠測の地震波形データを蓄積することが可能なシステムである。本観測においても ACT システムで LF ロガーを運用しており、システム SD カードに 8 GB モデルを使用していることから、データの圧縮率にも依存するが概ね半年間通信が途絶えても再送することが可能となっている。但し、サーバー側で余りにも古いデータを後

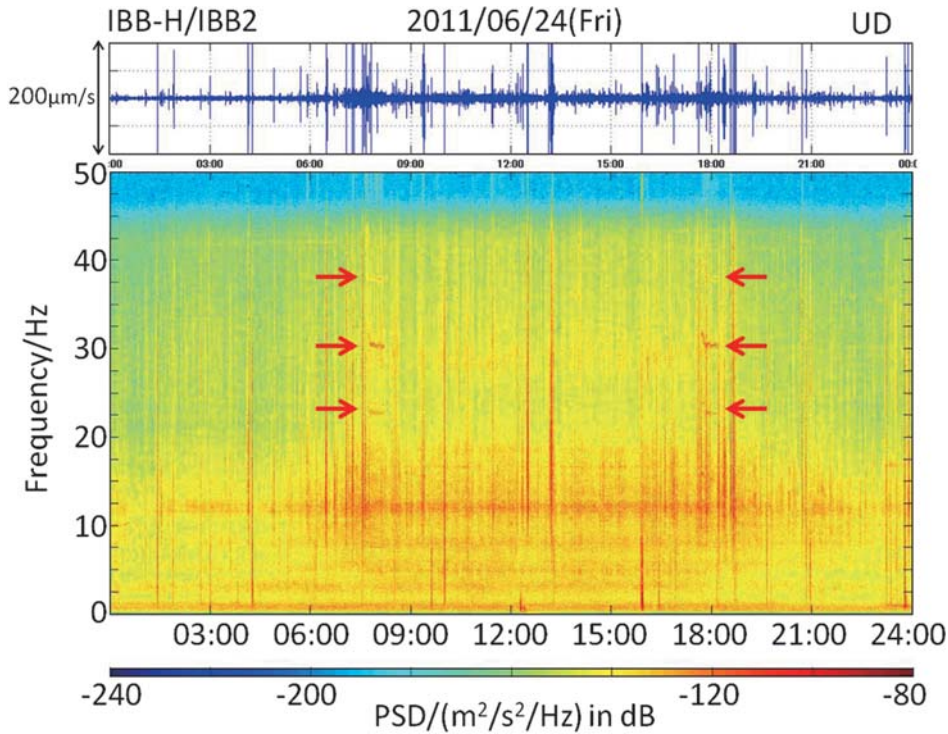


図 8. IBB-H/IBB2 観測点候補地の 1 日間のスペクトログラム (上下動成分). 8 時台と 17 時台の数十分間のみに、特徴的なピークが 22.5 Hz・30 Hz・39 Hz 周辺に現れており、陸田に給水する揚水ポンプからのノイズが原因であった。

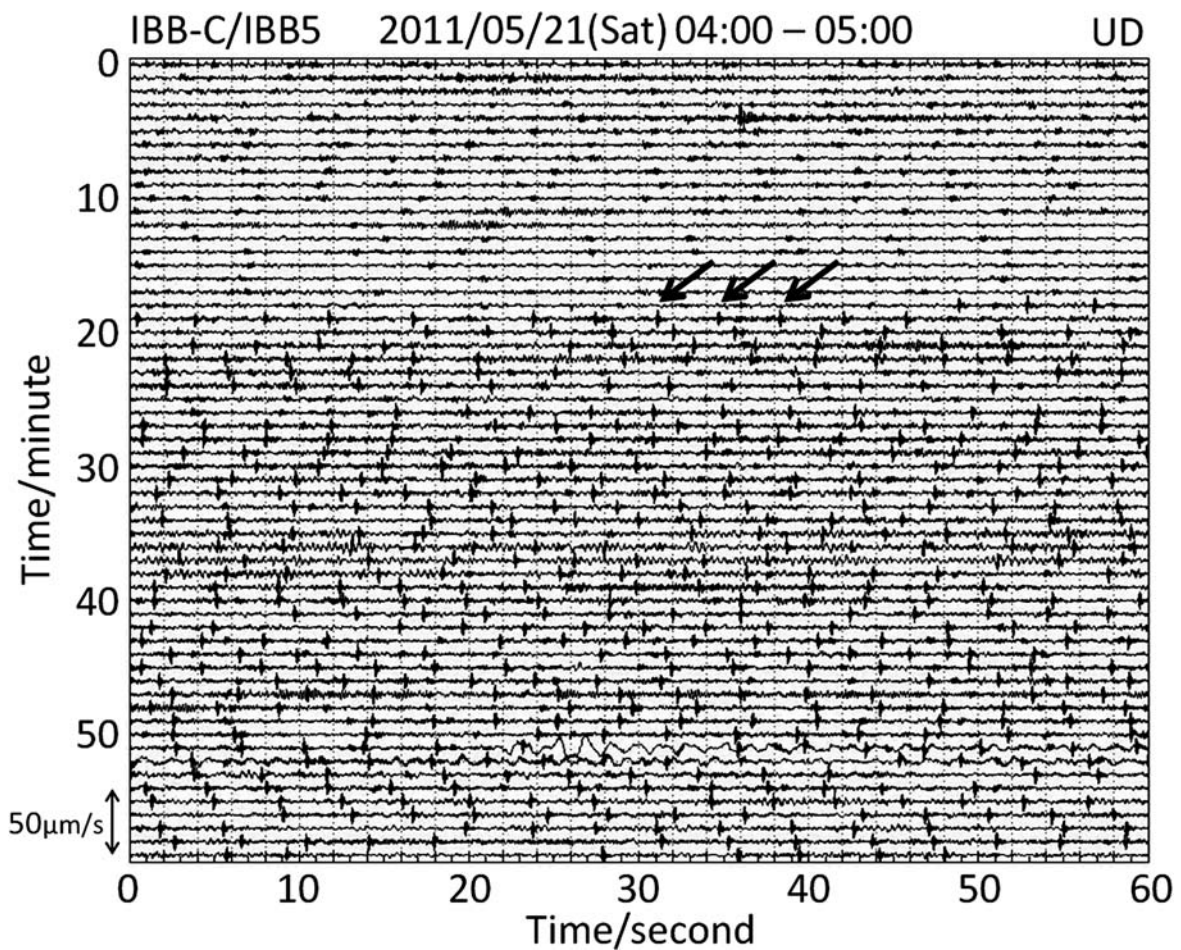


図 9. IBB-C/IBB5 観測点候補地の 1 時間の時系列波形グラフ (上下動成分). 数秒間隔で規則的な揺れ (矢印) が継続して記録されており、約 1.3 km 離れたところにあるプレス工場のノイズと考えられる。

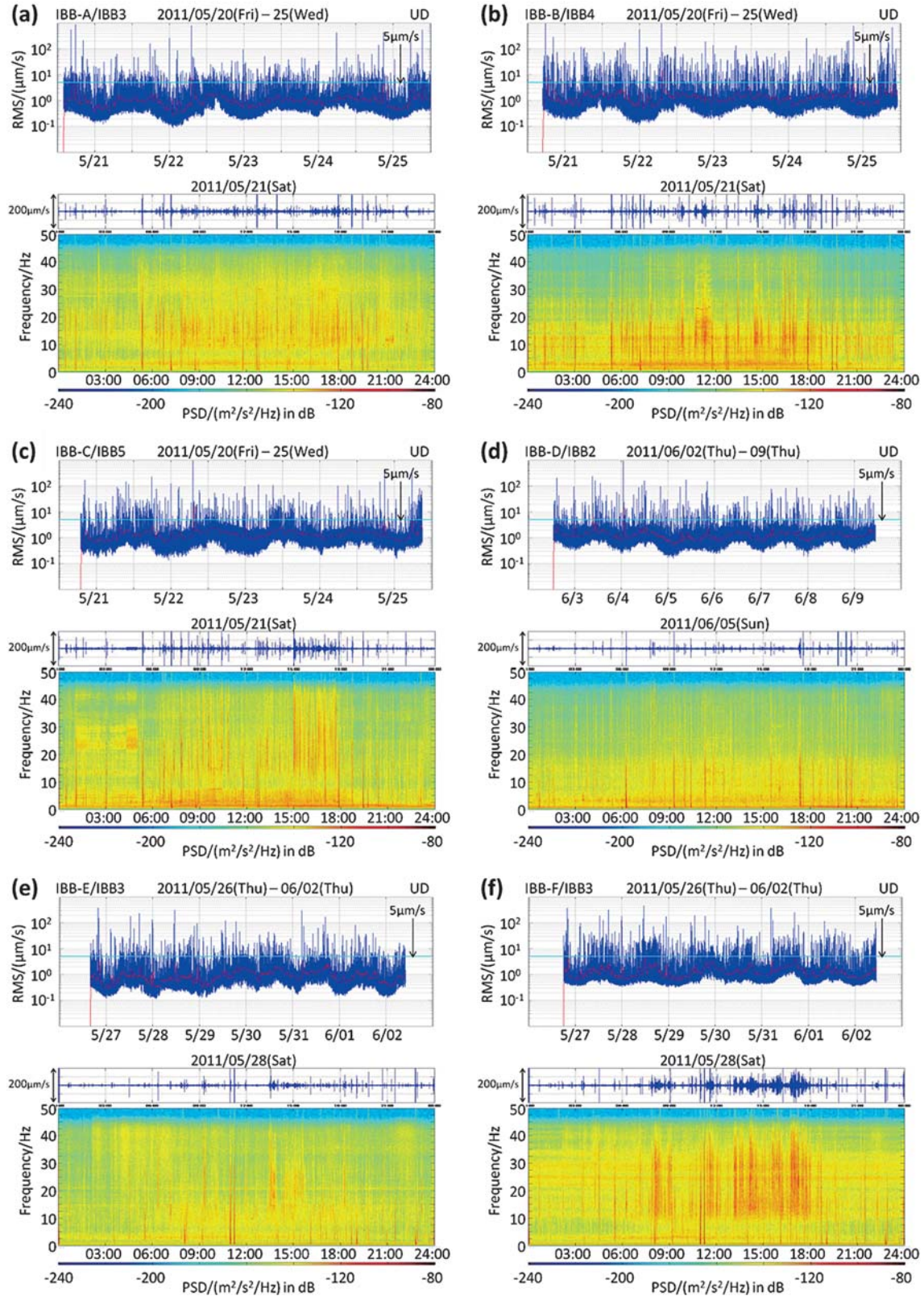


図 10. 全観測点候補地の地動ノイズ調査結果（上下動成分）. 上段が観測期間中における RMS グラフ，下段が 1 日間の時系列波形とスペクトログラムを示す. 候補地 IBB-A～IBB-M を (a)～(m) に示しているが，(g) IBB-G については図 7 があるので省略している.

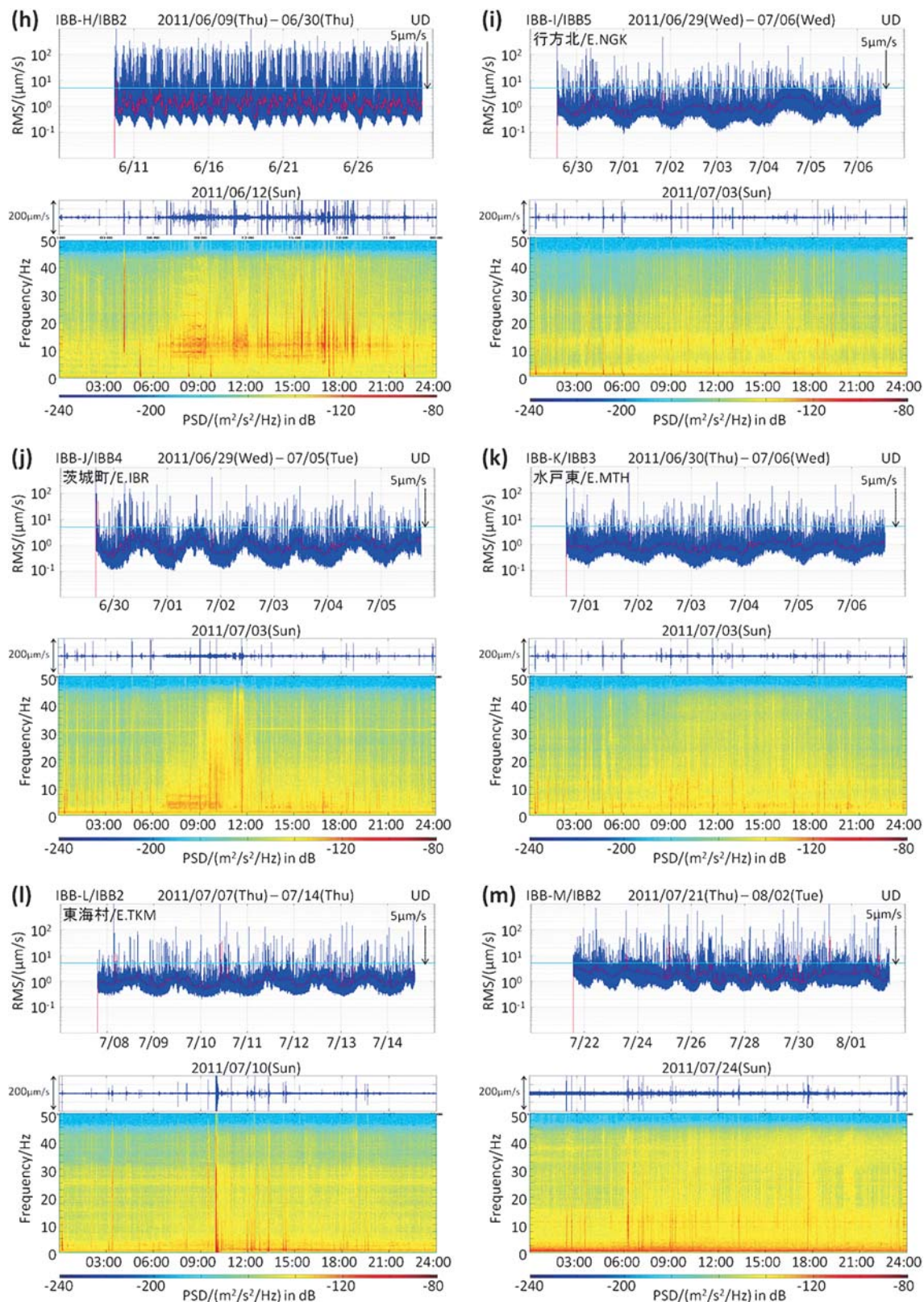


図 10 (つづき). 全観測点候補地の地動ノイズ調査結果 (上下動成分).

表 2. 茨城県に構築した新規広帯域地震観測点の候補地情報（13 点；IBB-A～IBB-M）と地動ノイズ調査結果

候補地名	エリア	地点情報	地動ノイズ調査結果
IBB-A	IBB3	雑木林の中	雑木林の影響により、荒天時にノイズレベルが上がる。近くの介護施設やその駐車場からのノイズが入る
IBB-B	IBB4	ゴルフ場の脇	IBB-Jの方が夜間のノイズレベルが低く、車通りも少ない
IBB-C	IBB5	雑木林脇の空き地	プレス工場ノイズが入る
IBB-D	IBB2	畑の脇	車道からのノイズが入る。ノイズ調査後に地主に断られる
IBB-E	IBB3	畑の中	夜間でもノイズレベルが高め。工事機械の搬入が困難
IBB-F	IBB3	地主宅敷地内	全体的にノイズレベルが高い
IBB-G	IBB1	地主宅敷地内の崖下	最終候補地(常陸太田;E.HTO)。新第三紀の泥岩層
IBB-H	IBB2	溜池の脇	陸田用ポンプノイズが入る
IBB-I	IBB5	ゴルフ場脇の盛土	最終候補地(行方北;E.NGK)。地主の農機具倉庫がある
IBB-J	IBB4	小学校敷地隅	最終候補地(茨城町;E.IBR)。運動場のバックネット裏
IBB-K	IBB3	段々畑の中	最終候補地(水戸東;E.MTH)。3段ある畑の2段目で休耕地
IBB-L	IBB2	田んぼ脇の盛土	最終候補地(東海村;E.TKM)。焼却場ノイズが若干見られる
IBB-M	IBB2	地主宅敷地内	全体的にノイズレベルが高い

から補完することは、現時点では負荷がかかり困難であるため、26 時間より古いデータに関しては、再送されて来ても連続波形データベースには補完されていない。

また本観測では、LF ロガーの簡易アナログ入力端子に広帯域地震計のマスポジション出力を繋げているので、マスポジションの遠隔監視も可能となっている。LF ロガーでは更に、SNMP (Simple Network Management Protocol) による機器の監視・制御も可能となっている。観測網を構築した時点ではまだこの機能を利用していないが、今後利用する予定である。

なお、大大特観測網で使用しているデータ収録伝送装置は白山工業製 LS-7000XT であり、データ伝送には WIN プロトコルが使われている。WIN プロトコルにもサーバー側で欠測したデータを再送するシステムが実装されているが、大大特での運用形態では、約 20 秒以上通信断が続くと通信断以前の WIN パケットは再送されない。20 秒以上通信断が発生してサーバー側で欠測が生じて、FTP で LS-7000XT にアクセスして CompactFlash に保存されているデータを回収すれば欠測を補完することが可能だが、手間のかかる作業となる。

3) 電源バックアップシステム

LF ロガーは無欠測のデータをサーバー側に伝送することが可能であるが、停電などで LF ロガーが停止した場合はその限りではない。よって LF ロガーを停止させないことが無欠測データを蓄積する上で重要となる。通常、停電対策には UPS (無停電電源装置) を使用するが、UPS 製品は一般的に、停電時は 12 V バッテリからの出力をインバーターで AC に変換後、機器に供給する仕組みとなっている。しかし LF ロガーの

電源は DC24 V 入力であるので、AC 出力される UPS を使う場合は AC アダプタなどを使用して再び DC24 V にコンバートする必要がある。UPS 内のバッテリー電力を効率的に使えない。また多くの UPS 製品はバッテリーを製品内に内蔵しており、経年変化に伴うバッテリー交換などでは特定のバッテリーを購入する必要があるために割高になる傾向がある。そこで今回は、バッテリーチャージャーとチャージコントローラを使用して、効率的に LF ロガーを電源バックアップする方式を採用した。チャージコントローラを使用しているのは、バッテリー電圧が 11.5V 以下になると負荷への供給を停止する LVD (Low Voltage Disconnect) 機能が内蔵されているからである。LVD 機能が無いと、長期間の停電時に LF ロガーはバッテリー電力を使い果たしてしまい、バッテリーの寿命を著しく縮める結果になるのでこの機能は必要である。バッテリーは 12 V 65 Ah 鉛蓄電池を使用した。今回採用したシステムの場合、12 V 鉛蓄電池ならほぼ全てのタイプが使用可能なので、バッテリー交換などの保守は容易となる。なお 65 Ah バッテリを使用した場合、この観測点の電力を少なくとも 3 日間バックアップすることが可能である。

4) キャビネット (図 13)

LF ロガー・電源バックアップシステム・雷ガードタップ・ルータなどは、引込柱に取り付けたキャビネットに全て収納した。キャビネットは遮光板とルーバーが付いているスチールタイプとなっており、高温対策・電磁シールド対策が期待出来る。なおキャビネットやキャビネット内の機器構成は、東北地方太平洋沖地震後に福島県南東部に構築された 3 点からなるオンライン短周期地震観測網 (藤田ほか, 2011) と共通化されており、予備機材の準備などの面で、今後の

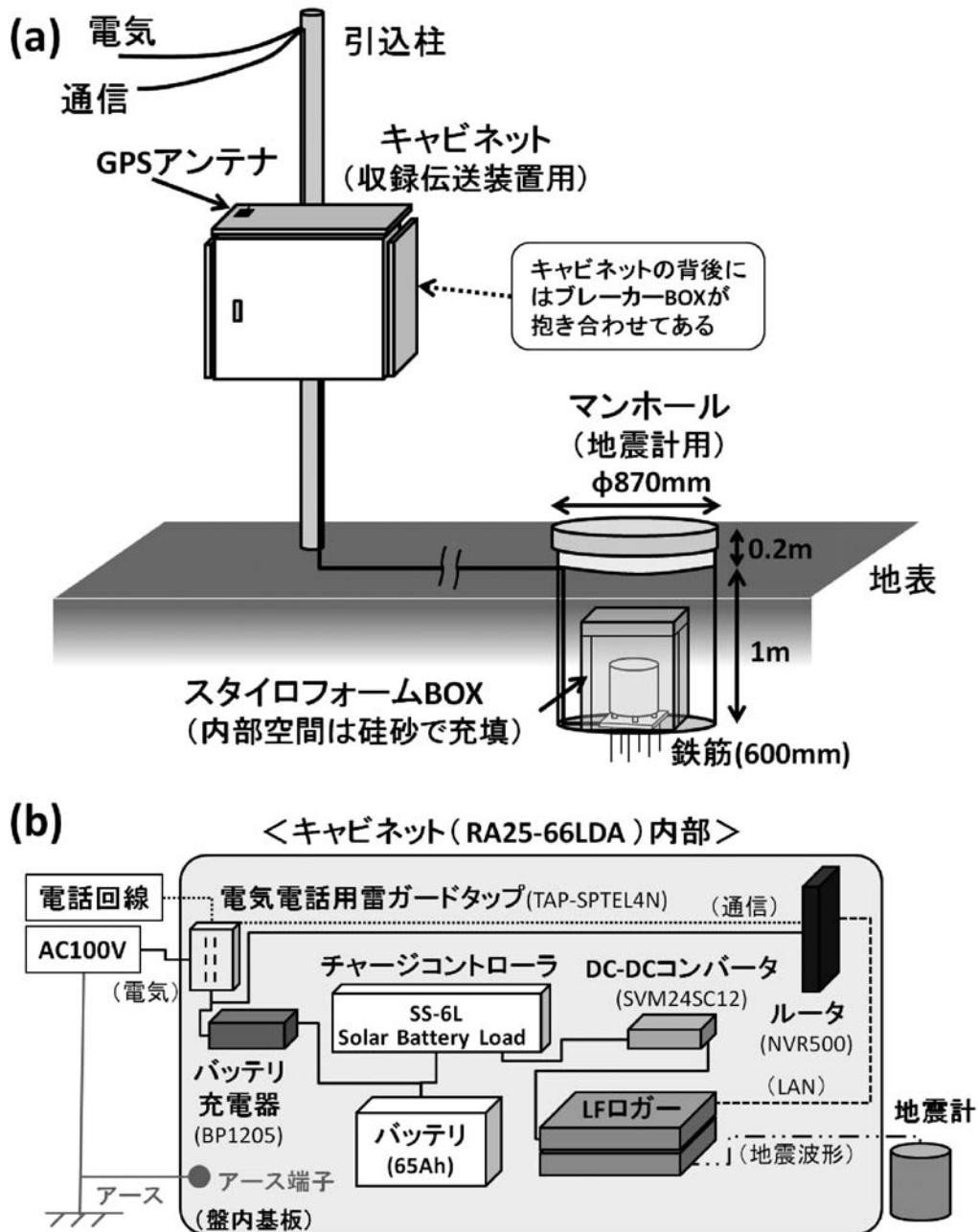


図 11. 茨城県に構築した新規広帯域地震観測点の構成. (a) 主な構成. 但し、深さ 1m の穴底に地震計が設置出来たのは水戸東 (E. MTH) と行方北 (E. NGK) の 2 点であり、残り 3 点は浸水のリスクを避けるために地表設置となっている. (b) キャビネット内の機器構成.

両観測網の保守が容易になると期待される.

5) 観測点と地震研の間の通信

通信は全観測点で NTT 東日本のフレッツ VPN ワイド (有線回線) を利用した. 昨今では ISDN 回線を引くよりも光回線を引いた方が利用料を安く出来ることから、光回線を第一希望として申請した. その結果、5 点中 4 点が光回線 (フレッツ光ネクスト)、1 点が ISDN 回線 (フレッツ ISDN) となった.

4. 観測点工事

5 点の観測点工事は、観測網のほぼ中央に位置する水戸市内の電機会社に発注した. 筆者らには過去に水戸市周辺で観測点工事を発注した経験が無かったので、水戸市役所の契約係に行って電気通信分野の有資格請負業者名簿を見せて頂き、そこに記載された A 格付の業者に何社かあたって、その後 1 社を選定した.

資材の調達などに若干時間がかかったこともあり、最初の観測点工事は 7 月 20 日に常陸太田観測点 (E. HTO) で

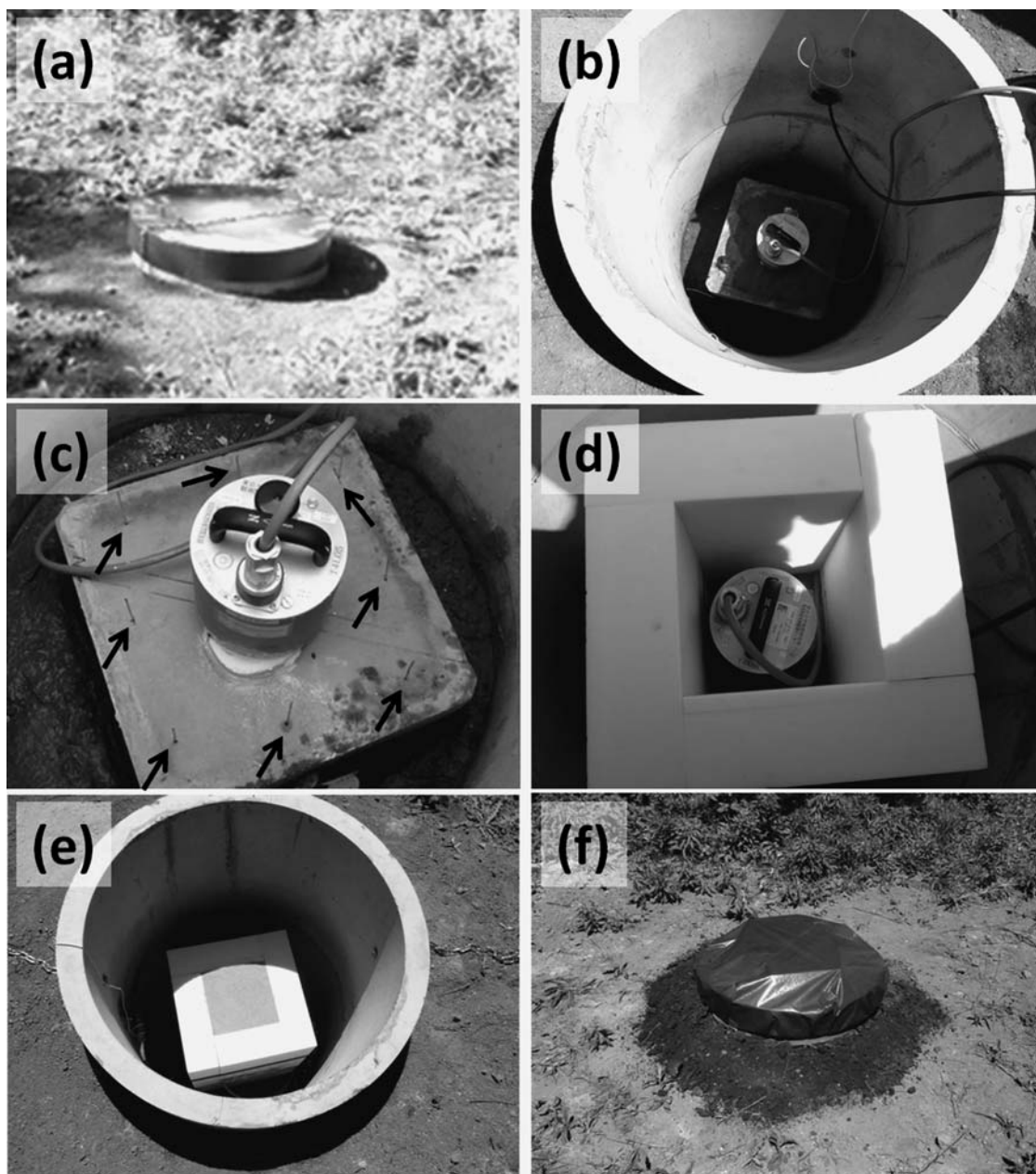


図 12. 茨城県に構築した新規広帯域地震観測点における、マンホール内への広帯域地震計設置の流れ。(a) 広帯域地震計を設置するマンホール（水戸東観測点；E. MTH）。地表部は鉄製カバーで蓋がされている。(b) マンホール底部の地震計台に設置された広帯域地震計。強震動により地震計がずれないようにするために地震計の足の1つが石膏により地震計台に固着されている。(c) 地震計はスタイロフォーム BOX で覆われるが、BOX が強震動によりずれないようにするために、地震計台には8本の針金がアンカーされている（矢印）。スタイロフォーム BOX は針金に刺し込むことによって地震計台に固定される。(d) 地震計をスタイロフォーム BOX で覆う。(e) スタイロフォーム BOX 内は5号珪砂で充填される。その後スタイロフォーム BOX の天板を乗せる。(f) 鉄製蓋を被せた後に、耐候性防水シートでマンホールを覆う。

行われた。その後東海村観測点（E. TKM）・行方北観測点（E. NGK）・水戸東観測点（E. MTH）・茨城北観測点（E. IBR）の順で工事が行われ、観測点工事が全て完了したのは8月20日だった。

当初は全観測点で深さ1mの穴を掘ってマンホールを設置する予定だったが、掘ってみたところ粘土層が出て来た観測点が4ヶ所あり、深く掘るとマンホール内に雨水が

溜まって地震計が水没する危険性があった。水戸東観測点（E. MTH）は穴底に排水孔を取り付けることが出来たので予定通り1m掘ったが、残りの3ヶ所に関しては、それぞれ0.3m（常陸太田観測点；E. HTO）、0.2m（東海村観測点；E. TKM）、0.25m（茨城町観測点；E. IBR）のみ地表を削って、その上に地震計台を設置した。地震計台の高さは0.3mあるので、地震計台の上面は地表レベル以上の高さ

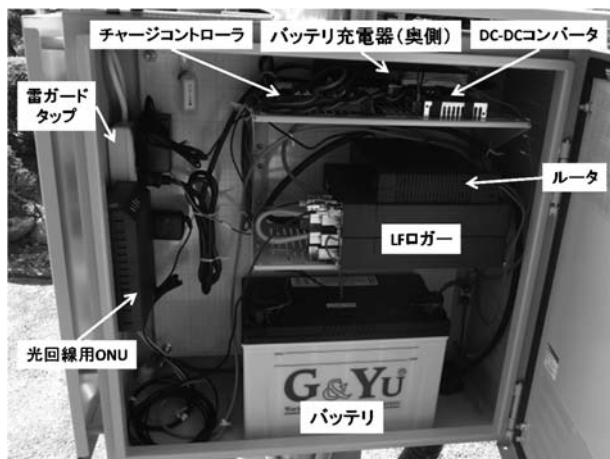


図 13. 常陸太田観測点 (E. HTO) のキャビネット内。

にキープされることとなり、地震計が水没する危険性は無くなったが、地震計を地表設置したのと同じ設置形態となっている。またこの3点は、穴を掘らなかったでマンホールを地表に置いたのみとなっている。これらの場所でも穴を掘り、マンホールの内部を防水加工して浸水を防ぐ方法も考えられたが、コストがかかること、穴底を防水加工すると将来どこからか浸水した時に水の逃げ場が無くなるリスクがあることから、今回は防水加工を見送り地表設置とした。マンホールのデザインを参考にした霧島新燃岳の広帯域地震観測網は、透水性の高い火砕物の積もる火山地帯に位置するために浸水の心配は無かったようだが、内陸の段丘堆積物で覆われた本観測網では、浸水対策を考慮に入れる必要があることを痛感した。

商用電気と通信回線の引込みについては、概して商用電気の方が申請後速やかに開通されることが多かった。けれども茨城北観測点のみ、観測点が学校敷地内に位置することから申請に時間がかかり、8月27日には機材設置も通信回線の引込みも済んでいたのだが、商用電気が開通したのは10月12日だった。この日をもって茨城県の新規5点の構築は完了した。表3に、オンライン化が完了するまでの各観測点における作業の流れを示す。また図14に、機器設置後の全観測点の写真を示す。

房総茨城広帯域アレイのノイズレベル

図15に、房総茨城広帯域アレイ15点の10月12日から18日に記録された波形のRMSグラフ(上下動成分)を示す。茨城新規5点は、地動ノイズ調査時のグラフ(図7及び図10)と比較すると、ほぼ同様の傾向を示しているが若干全体的にレベルが高まっている。その原因は、地動ノイズ調査時に使用した短周期地震計よりも広い観測帯域を持つ広帯域地震計を使用しているためだと思われる。大大特観測網の広帯域観測点10点に関しては、DD29のような夜

間もノイズレベルが高い観測点も見受けられるが、その他の点は夜間にはRMSの下限が $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m/s}$ 以下となっており、茨城新規5点の地動ノイズ調査時に課した下限の制約をクリアしている。特に、DD06, DD08, DD11は $0.1 \mu\text{m/s}$ を下回るほど静かな時がある。房総半島は地質図(三梨ほか, 1980, 三梨・須田, 1980)によると、北部・中部は第四紀の下総層群・上総層群で構成されるが、南部はより古い第三紀の上総層群・三浦層群・保田層群などで構成される。静かな3点はこれら第三紀の層群上に位置していることから、地盤の良さが夜間のノイズレベルの低さに寄与していると思われる。

図16は、房総茨城広帯域アレイ15点の10月12日から18日に記録された波形の1分間の平均値グラフ(上下動成分)である。1分間の平均値をとることで、周期60秒程度より長周期の地震波形に相当するグラフとなる。ほとんどの観測点で、日中に平均値が上がり夜間に下がる日周変動が確認出来るが、水戸東(E. MTH)、行方北(E. NGK)、DD19観測点では日周変動が無い。前者2点は深さ1mの穴底に、後者1点は奥行き3m程の横穴の再奥部に地震計が設置されていることから、地震計が受ける気温変動の影響が小さいために日周変動が出ないと考えられる。このことから、深さ1mの穴底に広帯域地震計を設置するマンホール方式は、広帯域地震計の長周期成分の安定性に効果を発揮することが分かった。

ま と め

3月11日の東北地方太平洋沖地震の余震活動・誘発地震活動や、スロースリップなどの低周波の活動の観測を目的として、千葉県と茨城県に15点からなるオンライン広帯域地震観測網(房総茨城広帯域アレイ)を整備した。千葉県に配置した10点は既存の大大特観測網を整備・増強することで代用し、茨城県に位置する5点は新たに観測点を構築した。

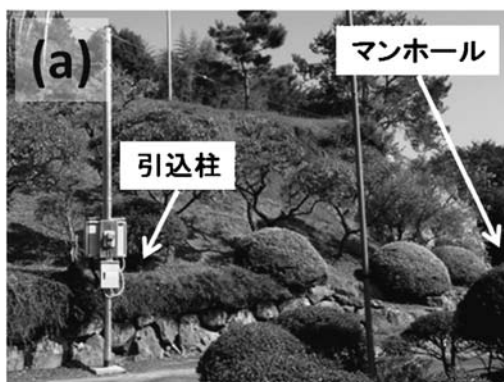
茨城県の新規5点については、候補地の選定に当たってまず13ヶ所で地動ノイズ調査を実施し、地震波形の時間周波数解析ツールを使用して地動ノイズレベルの評価を行った。RMS値の下限が夜間に $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m/s}$ 以下で日中でも $1 \mu\text{m/s}$ を超えず、RMSの上限の大部分が $5 \mu\text{m/s}$ を超えない範囲に収まるという条件を課して比較を行い、最終的に5点を選定した。観測点の構成については、マンホール内への地震計の設置や、ACTプロトコルを使用したLFロガーの採用、DCでの電源バックアップシステムの採用など、地震波形の品質向上や障害に強い観測システムを目指したデザインとなっている。

今回の整備で最も苦勞したのは、茨城県での候補地選定であった。地盤も第四紀の堆積層と柔らかく、人口密度や人工的活動も比較的高い地域において、商用電源・通信回

表 3. 茨城県に構築した新規広帯域地震観測点の、オンライン化が完了するまでの作業の流れ。

観測点	ノイズ調査 時の地点名	5月		6月		7月		8月		9月		10月		
		中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬
常陸太田(E.HTO)	IBB-G/IBB1		↔					●●電通設						→
東海村(E.TKM)	IBB-L/IBB2		↔						●●設		電通			→
水戸東(E.MTH)	IBB-K/IBB3	←						●●通設電						→
茨城町(E.IBR)	IBB-J/IBB4	←							●●通設					電→
行方北(E.NGK)	IBB-I/IBB5	←						●●設電通						→

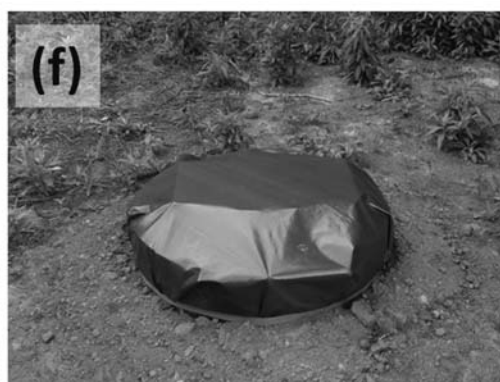
↔: 地動ノイズ調査、●●: 観測点建設工事、電: 電気工事、通: 通信工事、設: 地震観測機材の設置、→: オンライン化済み



(a, b) 常陸太田観測点 (E.HTO)



(c, d) 東海村観測点 (E.TKM)



(e, f) 水戸東観測点 (E.MTH)

図 14. 茨城県に構築した新規広帯域地震観測点. (a, b) 常陸太田観測点 (E.HTO). 高さ 600 mm のマンホールを、0.3 m 削った地表に 2 個積み重ねているので、約 0.9 m 地表にマンホールが出ている. (c, d) 東海村観測点 (E.TKM). 0.2 m 削った地表にマンホールを 1 個置いているので、約 0.4 m 地表にマンホールが出ている. (e, f) 水戸東観測点 (E.MTH).

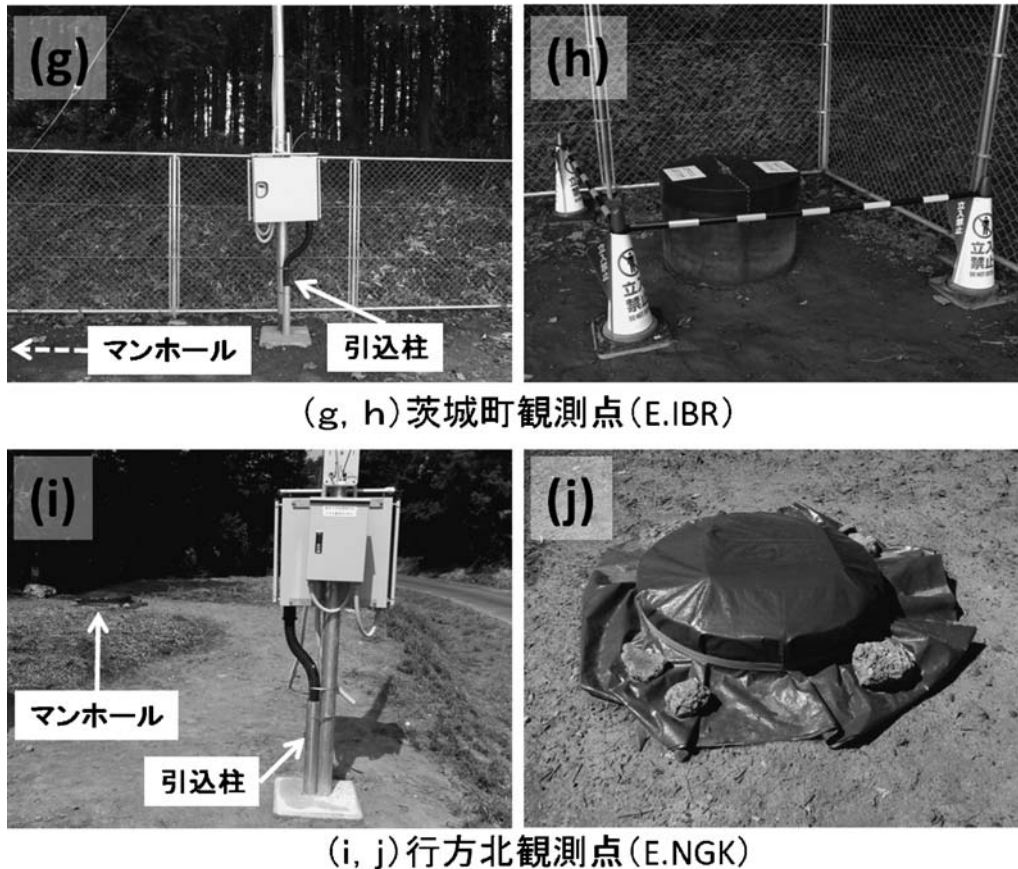


図 14 (つづき). 茨城県に構築した新規広帯域地震観測点. (g, h) 茨城町観測点 (E. IBR). 0.25 m 削った地表にマンホールを 1 個置いているので, 約 0.35 m 地表にマンホールが出ている. (i, j) 行方北観測点 (E. NGK).

線がある静かな場所を探すのは大変困難だった. そこで例えば, ソーラーシステムによる電力供給や, 携帯電話・衛星通信での通信回線を採用すれば, 候補地選定をより容易に行え, またより低地動ノイズの場所を探すことが可能だったと思われる. 今回は安定性・経済性・実績を重視して全点商用電源と有線回線の組合せにしたが, ソーラーシステム・携帯電話・衛星通信などでの実績を積んで信頼性のあるシステムを確立しておくことは, 観測点候補地選定の際に選択の幅が広がることに繋がるので大切だと感じた.

最後に, 本観測網で観測された茨城県北部地震 (Mj5.3) の上下動波形を示す (図 17). 今後本観測網のデータから多くの研究成果が出ることを期待する.

謝 辞: 本研究は, 地震火山噴火予知研究「東北地方太

平洋沖地震緊急研究」及び観測開発基盤センター業務として行われました. 観測点の個人地主の方々には, 土地借用にご理解を頂きました. 観測点を管理する行政機関の方々には, 用地の借用にご協力頂きました. 本観測網の整備にあたって, 地震研究所技術部総合観測室技術職員である橋本信一氏, 芹澤正人氏, 阿部英二氏, 藤田親亮氏, 並びに学術支援職員の川北優子氏から多大なるご協力を頂きました. 地震研究所テレメータ室の出川昭子氏には LF ロガーやルータの設定, 並びに地震研究所側の受信サーバーの準備にご尽力頂きました. 一部の図の作成には, 気象庁一元化震源カタログと GMT (Wessel and Smith, 1998) を用いました. 本稿をまとめるにあたり, 査読者の酒井准教授・森田教授からは有益なアドバイスを頂きました. 記して深く感謝いたします.

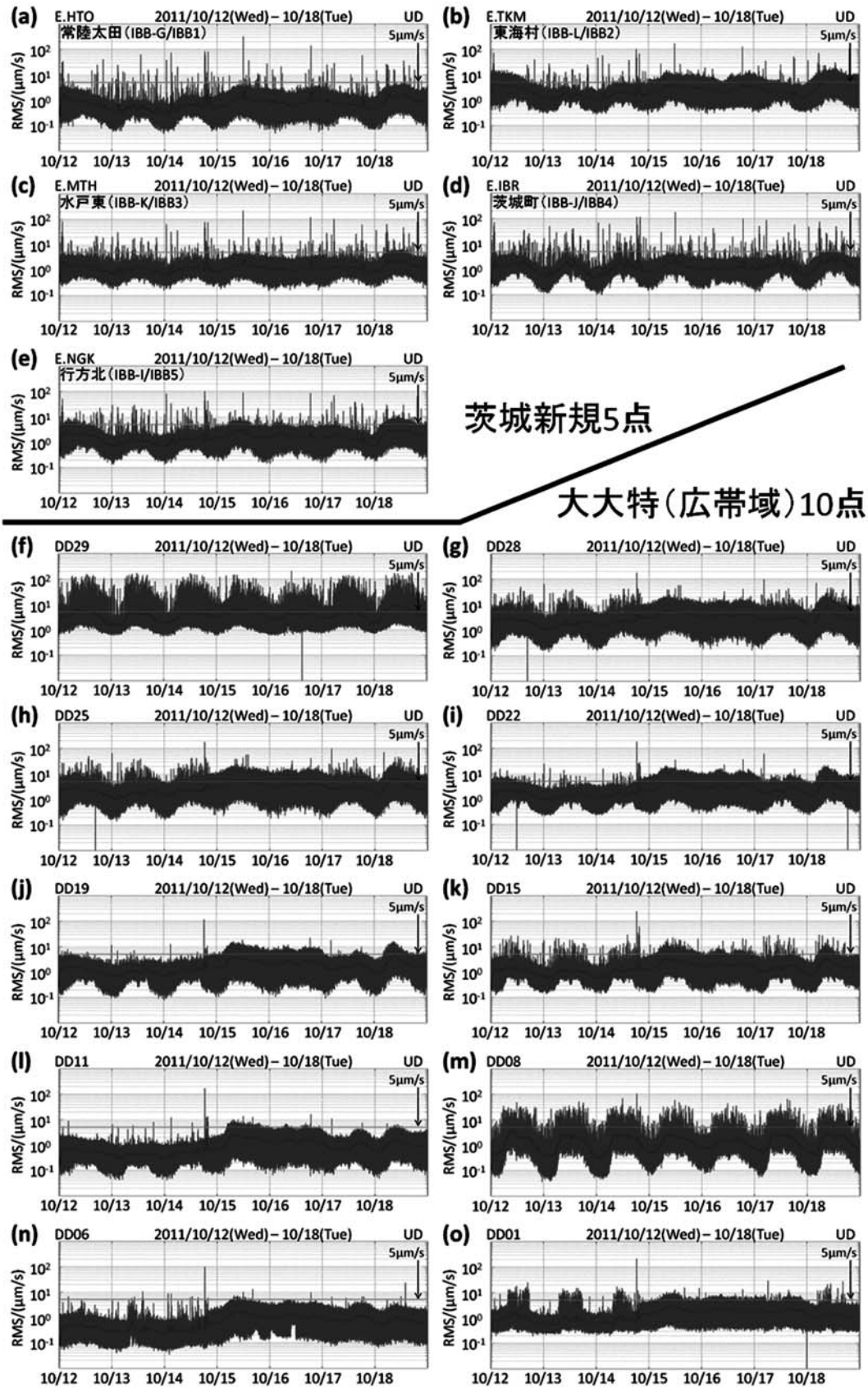


図 15. 房総茨城広帯域アレイ 15 点の 10 月 12 日から 18 日に記録された波形の RMS グラフ (上下動成分). 北から順に観測点を並べている.

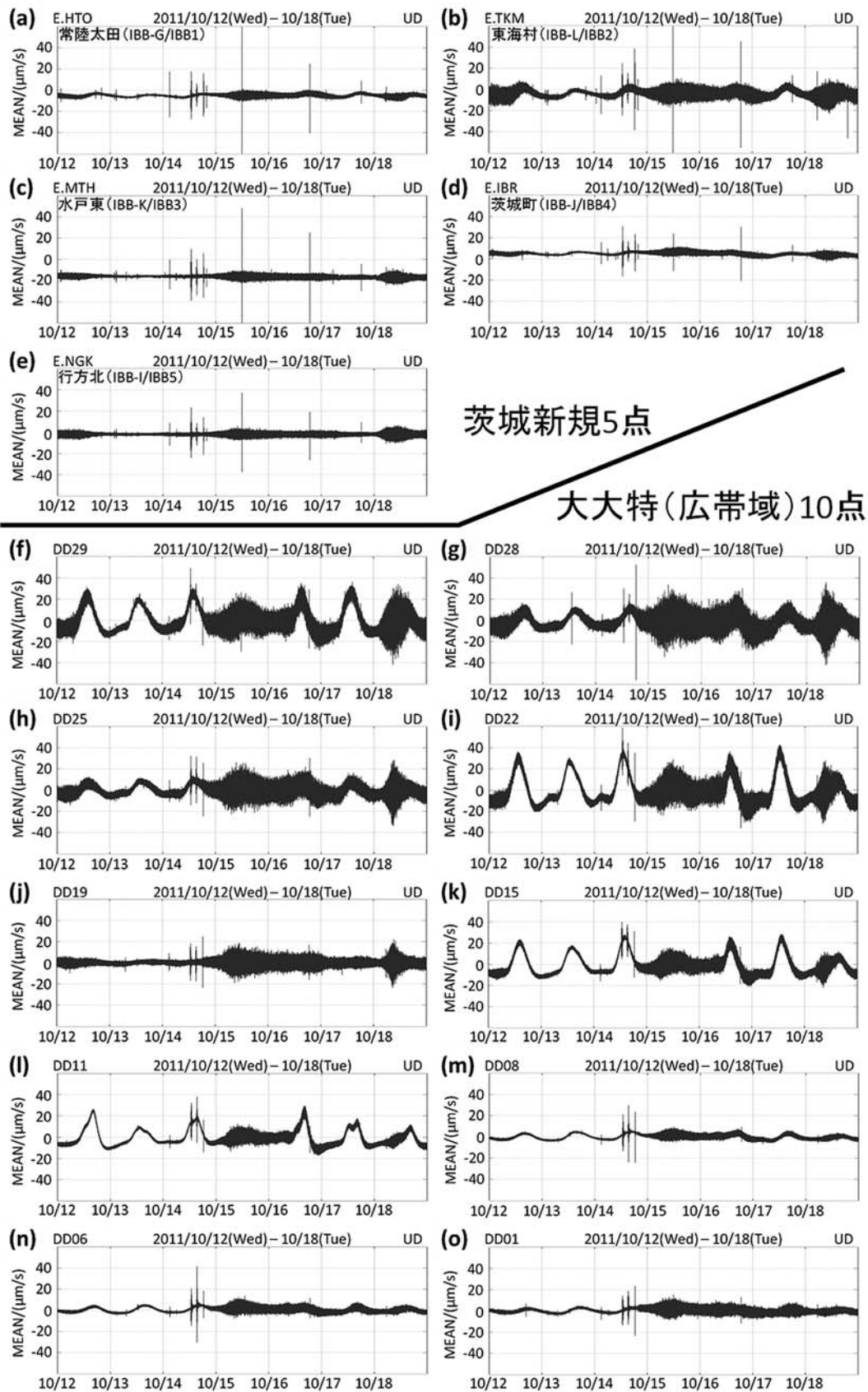


図 16. 房総茨城広帯域アレイ 15 点の 10 月 12 日から 18 日に記録された波形の 1 分間の平均値グラフ (上下動成分)。北から順に観測点を並べている。

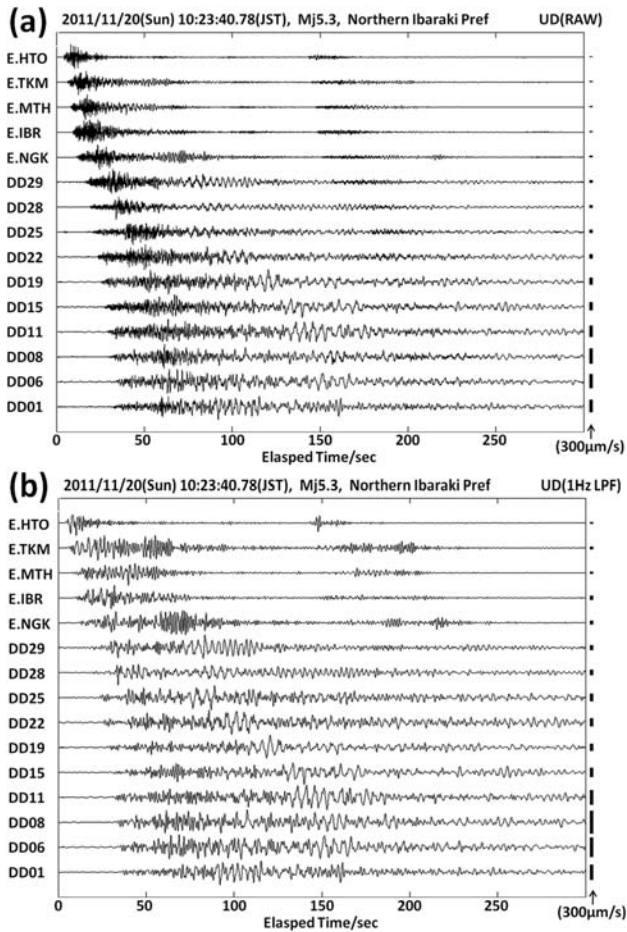


図 17. 房総茨城広帯域アレイ観測網で観測された、茨城県北部地震 (Mj5.3) の上下動波形。北から順に観測点を並べている。(a) フィルターを適用していない波形。(b) 1 Hz のローパスフィルターを適用した波形。

文 献

- 防災科学技術研究所, 2008, 地震活動変化による房総沖スロースリップ域の特定, 地震予知連絡会会報, 79, 107-109.
- 防災科学技術研究所, 2011, 房総半島沖で「スロー地震」再来, プレス発表資料, 平成 23 年 10 月 31 日.
- 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.
- Guralp ホームページ, 2006, Creating low noise environments for surface seismometers, <http://www.guralp.com/creating-low-noise-environments-for-surface-seismometers/>.
- Hirata, N., H. Sato, K. Koketsu, H. Hagiwara, F. Wu, D. Okaya, T. Iwasaki, K. Kasahara, 2006, Mega-thrust and Intra-slab Earthquakes Beneath Tokyo Metropolitan Area, *Eos Trans. AGU*, 87 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract S31C-03.
- 笠原敬司・酒井 慎一・森田 裕一・平田 直・鶴岡 弘・中川 茂樹・楠城一嘉・小原一成, 2009, 首都圏地震観測網 (MeSO-net) の展開, 地震研究所彙報, 84, 71-88.
- 三梨 昂・小野見司・須田芳郎, 1980, 20 万分の 1 地質図「横須賀」, 地質調査所.
- 三梨 昂・須田芳郎, 1980, 20 万分の 1 地質図「大多喜」, 地質調査所.
- 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.
- 文部科学省・地震研究所, 2006, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト平成 18 年度成果報告書 (I) 地震動 (強い揺れ) の予測「大都市圏地殻構造調査研究」, 247-270.
- 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, 2009, 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—, 地震研究所彙報, 84, 89-105.
- 酒井慎一・平田 直, 2009, 首都圏地震観測網の設置計画, 地震研究所彙報, 84, 57-69.
- 芹澤正人・坂 守・小原一成・加藤愛太郎, 2011, 東北地方太平洋沖地震におけるオフライン地震観測報告および臨時観測についての考察, 震研技報, 17, 48-53.
- 辻 浩・森 健彦・渡邊篤志・阿部英二, 2011, 霧島新燃岳噴火に伴う臨時地震・空振観測点の設置, 震研技報, 17, 12-18.
- ト部 卓, 1994, 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, 地震学会講演予稿集, 2, 384.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1998, New improved version of the Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU*, 79, 579.
- 吉岡敏和・滝沢文教・高橋雅紀・宮崎一博・坂野靖行・柳沢幸夫・高橋 浩・久保和也・関 陽児・駒澤正夫・広島俊男, 2001, 20 万分の 1 地質図幅「水戸」(第 2 版), 地質調査所.