

地盤強震観測における成果と課題

高井伸雄

北海道大学大学院・工学研究院

1. はじめに

1996年6月に運用が開始された防災科学技術研究所の全国強震観測網 K-NET およびその後の基盤強震観測網 KiK-net により公開された強震記録は、国内の研究者に留まらず、世界中でデータが広く利用され、様々な解析に用いられてきている。これらネットワークをはじめ我が国では強震観測網が充実し、公開も国際的に進んでいる。本稿では1995年に開催された第1回から前回2008年に開催された第5回「強震データの活用に関するシンポジウム」までに取り上げられた、主に公的機関が実施している地盤強震観測の話題を概観し、さらに前回以降に実施された個別機関による強震観測の事例および、観測に関わる課題を報告する。

なお、タイトルにも用いた「地盤強震観測」とは、建物への地震動入力を知るための強震観測を意味し、建物応答を対象とした建物内強震観測以外の強震観測をそのように称することとし、岩盤観測点上での観測も、地表での観測を低層建物等の建物内で代替した強震観測もこれに含めることとする。

2. 地盤強震観測の意義

ある地点で観測される地震動は、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の合積で表現される。多くの公的な地盤強震観測は現在ではリアルタイム地震動把握、被害把握を目的として展開されているが（例えば、[1]）、建物の耐震設計を実施する上で最も重要な事は、建物を建設する地点での将来起こりうる地震動を正確に把握し、それに耐えうる設計を行う事に他ならない。当該地点での事前の強震観測記録の蓄積があれば、経験的グリーン関数法を用いた強震動予測[2]や、単一サイト予測式[3]を構築する等で、特にサイト特性や伝播経路特性を反映させた設計用入力地震動を得ることが可能となる。近年発達してきた連続記録を用いた手法（例えば、[4, 5]）による地下構造の検討等にも活用可能であり、より正確な強震動予測への重要な基礎資料の提供がなされるようになってきた。また、観測点密度の飛躍的向上に伴い、高震度で大加速度の強震記録が多く得られるようになり、その観測点の周辺で大きな被害が発生しないという事象が見られるようになり、建物の破壊力指標に関する再検討も実施されてきた（例えば、[6]）。今後の建築技術者の努力による耐震性能の向上を正確に評価するためにも、実地震時の建物被害発生状況を入力地震動から分析するためには、その地点での強震記録の有無が正確さを左右することは自明であろう。

このように、上記3特性を正確に知ること、常に建築物の地震動被害軽減を目的としたものであり、耐震設計・被害分析のためには、当該地点の地震動を正確に把握する事が重要で、地盤強震観測の意義として最も重要と考えられる。

3. 地盤強震観測に関わる報告概観および観測記録を用いた成果

1978年に科学技術庁資源調査会が強震時の地震動の特性を把握するための地盤強震観測網整備拡充を、科学技術庁長官あてに「地震危険度推定に必要な強震観測に関する勧告」として提出し[7]、地盤強震観測の重要性が説かれ始めた。この小林(2002)による歴史的概観[7]や工藤(1994)による現状と展望[8]の他、第1回シンポジウム(1995)において強震計の開発と初期の強震観測の概要が講演され[9]、(財)震災予防協会によるアレー観測記録のデータベース開発・活動に関して詳細な報告がなされている[10]。また、データを用いた研究に関して、1923年関東地震の強震動を1990年伊豆大島近海の地震を要素地震とした推定[11]、基盤によるP波がS波に変換されるPS変換波を用いた基盤構造推定[12]等の試みに関する報告がなされている。

第2回シンポジウム(2000)では、公的機関による観測が飛躍的に整備され、前述のK-NET、KiK-netを始めとするデータ供与に関して[13]や、共同観測による高密度強震アレー観測に関して[14]の詳細な報告がなされている。また、強震記録のユーザーサイドからの要望、記録の解釈の上で必要な情報等が整理されている[15]。強震記録を利用した研究としては、断層近傍で観測された強震動を用いることで、より詳細な断層の破壊過程が明らかになるとして、1995年兵庫県南部地震等の経験的グリーン関数法による強震動評価の報告がなされている[2]。

第3回シンポジウム(2002)、第4回シンポジウム(2005)では、建物強震観測に特化したシンポジウム構成となっているが、その中でも2004年紀伊半島南東沖の地震($M7.4$)の大阪平野での長周期地震動[16]、2004年新潟県中越地震($M6.8$)による新潟県柏崎市・刈羽村の強震動[16]に関しての報告がなされている。また、2003年には強震観測網が整備されて初めてのM8クラスの地震である2003年十勝沖地震($M8.0$)が発生し、長周期地震動と深部地下構造の関係等が、これらのデータ等を用いて議論されている(例えば、[17, 18])。

2005年には日本の強震観測が開始されて50年として、防災科学技術研究所により記念シンポジウム「日本の強震観測50年—歴史と展望—」が開催され、その歴史と併せて多くの機関の強震観測に関する報告がなされている[19]。

第5回シンポジウム(2008)では、最近の被害地震の強震観測例として2008年岩手・宮城内陸地震($M7.2$)、2008年岩手県沿岸北部の地震($M6.8$)の強震動特性が建物応答と併せて報告され[20]、オンライン地震観測にニューラルネットワークを適用させた早期地震警報システムに関しての提案[21]もなされている。

2009年には強震計・強震観測の歴史からリアルタイム地震防災を踏まえた強震観測網の整備に関する報告が地震学会の論文誌上でなされており[22]、提供側の公的機関として、観測網の敷設が地震被害軽減に直接役立つ素地ができてきたと結ばれている。

公的機関の強震観測網では敷設当時から時刻校正にGPSを利用して行う場合が多く、特に高密度の観測点が設置してあれば、地震波の伝播を正確に把握することができ、その様子が最大震度5以上の揺れを観測された地震に関しては、動画として公開されている[23]。このように正確な時刻校正を持つ強震観測網の記録を用いて、振幅やスペクトルの分布のみならず、地震波の伝播の性質に関して詳細に議論されるようにはなっており(例えば[24])、三次元シミュレーション結果と併せて、地下構造の議論に用いられていくことも多くなると思われる。

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)は日本の強震観測史上最大規模の地震であり、余震を含めた多くの強震記録が広い研究分野で活用されているが、強震観測網を用いて把握

された強震動分布の特徴[25]、強震記録を用いた震源モデル[26]に関する数多くの成果が発表されている。また、いくつかの地点での高震度・大加速度の要因解明等が余震観測等により精力的になされた[27, 28]。その後の被害地震においても、公開された強震記録を基に、震源過程・伝播経路特性・地盤増幅特性に関して議論された論文は多数に上る。

その後、2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ、海底での地震計整備が進められ、陸域の高感度地震観測網 (Hi-net)、強震観測網 (K-NET、KiK-net)、広帯域地震観測網 (F-net)、基盤的火山観測網 (V-net) が海域の日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)、地震・津波観測監視システム (DONET) と統合され MOWLAS[29]として構成され (図1)、さらに早期に正確に海域で発生する地震が都市部に到達する前にその地震規模等を知ることが可能となっており[1]、第2回シンポジウム (2000) 報告[13]時からも大きな進展を見せていると言えよう。

また首都圏に関しては地中地震観測網が 2007 年より東京大学地震研究所により MeSO-net として構築され[30]、現在では防災科学技術研究所によりデータ公開されている。2011年東北地方太平洋沖地震に関しては、例えば首都圏およびその周辺の長周期地震動の特徴が地表の強震記録と併せて議論されている[31]。

このように、公的機関ではリアルタイム地震防災情報の提供による災害軽減を目的とし、設計用入力地震動を知ろうとする建築構造研究者にとっても有益な情報が多く公開されているが、極局所的な地下構造の変化等により高震度・大加速度が記録されることもあり、その解釈のために、当該地点での臨時強震観測・微動観測が個別の研究機関で実施されることも多い。次節では、そのような臨時観測等の事例と課題を紹介する。



図1 MOWLAS 観測点分布図[29]

4. 臨時観測等の個別機関の観測時の課題

K-NET のような公的機関による強震観測点の設営では、寒冷地での強震計基礎の仕様が異なるものの[32]、観測機器以外の観測建屋、機器の固定等も全国一律の仕様によって観測がなされている。また長周期側の特性に関して K-NET では DC 成分までフラットな特性になっており、広帯域な解析に耐えうる記録である。しかし、個別機関で観測を実施する際には、機関毎の仕様となる。観測点設置に関しての詳細な報告として、東京大学地震研究所の強震観測室の事例として、観測点の選定・建設・設置までの詳細な報告がなされている事例[33]もあるが、論文等で記載される事は非常に少ない。

そこで本小委員会では強震観測を実施する際のマニュアルを強震観測の手引きとして情報提供しており[34]、本手引きは随時更新されているので参照されたい。ここでは主に報告者が実施している観測事例を紹介する。

4.1 機器の選定

臨時観測点等では電源の問題が最も大きいため、電源を確保してのセンサー電源を必要とするサーボ型強震計よりも、電源が不要なミットヨ社製 JEP-6A3 (過減衰型動コイル型加速度計) [27, 35, 36] や動コイル型速度計である近計システム社製 KVS-300[37]等に低消費電源ロガー (白山工業社製 LS-8800、近計システム社製 EDR-X7000 等) を接続して、カーバッテリー等によりオフライン観測をする事例が多く見受けられる。カーバッテリーの容量・季節 (気温) にも依るが、小型バッテリーでも 2、3 ヶ月の連続観測に対応可能である。しかし、平坦な帯域が狭いために大地震時の記録では長周期側では特製補正の必要がある。より広帯域での観測を計画する場合には電源の確保が重要な課題となる。長周期地震動を計器の特性補正すること無く直接記録することを目指した場合、サーボ型地震計を選択する必要がある。設置および固定方法に関しては、報告者がネパール国カトマンズ盆地で実施している強震観測では、常設観測点でコンクリート床へのアンカーボルト設置による固定をしており[38]、臨時観測点では、センサー台座とコンクリート床・アスファルト道路への接着剤での固定をしている。一般に計器の地面への固定には、センサーは接着剤で固定し、センサー以外はバッテリーの重量で固定せずにプラスチック箱に入れて観測する事例が多いようである。写真 1 は 2018 年北海道胆振東部地震での臨時余震観測点の一例である。



写真 1 臨時強震観測点の一例：右側のセンサーはアスファルト舗装に多用途接着剤を用いて固定されており、左側の箱内にロガーと鉛蓄電池と乾電池を併用した電源が入っており、防水シートで保護した上で、ロガーの時刻校正に用いる GPS アンテナが外部に貼り付けられている。

4.2 トリガー観測・連続観測

トリガーレベルの設定は以前では電子記憶媒体の制約上の問題から慎重に検討されていた。トリガーレベルを小さくすれば、多くの記録が得られるが、メモリーを消費するために、古い記録から消去、容量の小さい記録から消去、等のアルゴリズムを選択して、記録容量の確保が必要であった。しかしメモリー容量の飛躍的な向上により、例えば白山工業社製 LS-8800 で 32GB の SD カードを利用すれば、3 成分で記録しても約 30 ヶ月のデータ蓄積が可能である。2011 年東北地方太平洋沖地震の余震観測では、ミットヨ社製 JEP-6A3 の 10V/g のセンサーを用いて、マグニチュードが小さい地震の欠測を防止するためと、微動記録の解析のために、連続観測を東茨城台地で実施した例[39]等がみられる。

4.3 感度の設定

ミットヨ社製 JEP-6A3 と白山工業社製 LS-8800 を組み合わせて使用する場合、LS-8800 の最大入力がアンプを使用しない場合で±5V となっており、JEP-6A3 (2V/g) の場合、フルスケールが 2000 cm/s² となっており、余震活動の状況等から、アンプのゲインの設定に注意しなければ、振り切れてクリップした記録が得られ、その補正 (例えば、[40]) を施さなければならぬため、注意が必要となる。一方、微動の連続記録をメインに解析することを考えれば、アンプの増幅率を上げての観測となり、目的に応じて考慮する必要がある。

4.4 電源

ロガー等の電源に商用電源を用いる場合には、屋外観測は困難を要するため、建物内での観測となる。その際、なるべく建物応答の影響を排除するために低層建物を選択することになる。一方、野外観測で長期間の観測を実施する場合には、複数の蓄電池の利用や、太陽光パネルと蓄電池を併用したシステム (例えば、[41]) 等を利用する場合もある。

5. 臨時観測で得られる強震記録

公的機関の観測点密度では観測記録の解釈に十分では無い場合、観測点付近や観測点間の変化を把握するために臨時余震観測等を実施する場合がある。例えば、図 2 は 2018 年北海道胆振東部地震で震央付近の高震度エリアで、公的機関の強震観測点の存在しない地域に臨時観測点を展開した例である。使用した機器は前述のミットヨ社製 JEP-6A3 (2V/g) と白山工業社製 LS-8800 の組み合わせであり、観測点の一例は写真 1 に示した。周辺で特に建物被害が顕著であり、1~2 秒の応答値の大きい K-NET 鶴川観測点 (HKD126) の観測記録の解釈のため、堆積層厚が薄いと思われる台地上に設置した観測点 (HUE04) との余震記録の比較では、大きな振幅の違いに併せて、特徴的な周期帯域が臨時観測点では見られない等が明らかとなっている[42]。ここでは図 2 に示した観測点の 2018 年 9 月 14 日 6 時 54 分の地震 (M4.6、d=26 km) の加速度波形とフーリエスペクトルを図 3 に示す。臨時観測点の設置により、公的機関の強震観測により得られた強震記録の違いに加えて、波形・スペクトルの変化が狭い範囲内で見られるようになっている。これに地下構造の変化等をより詳細に議論する事が可能となる。

6. まとめ

本稿ではこれまでの本シンポジウムにて取り上げられた公的機関による地盤強震観測の報告の紹介と、それを補完する個別機関による臨時余震観測に関わる課題をいくつか報告

した。今後は、テレメトリー観測化、MEMS の性能向上によってはコスト問題から地盤強震観測においても利用を視野に入れての議論が展開されるものと思われる。

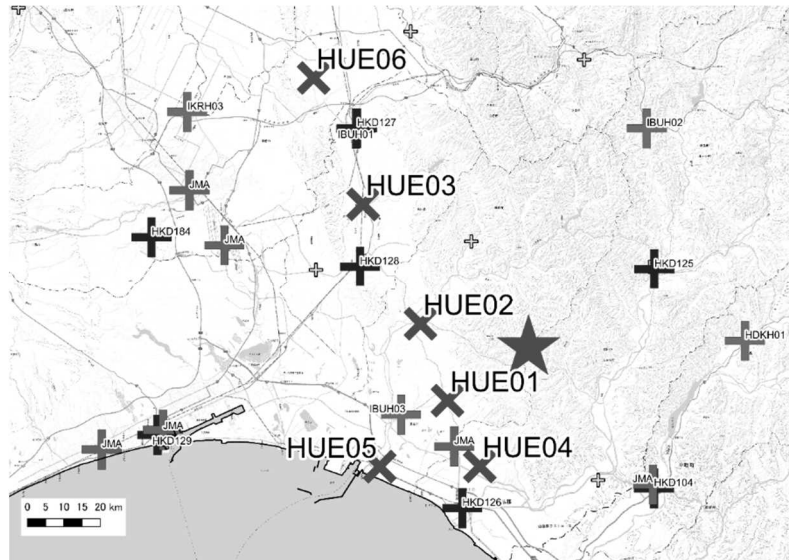


図2 2018年北海道胆振東部地震の震央付近における臨時余震観測点
×は臨時観測点 (HUE)、+は公的機関の定常観測点。★印は本震の気象庁による震央位置。(地理院地図を使用)

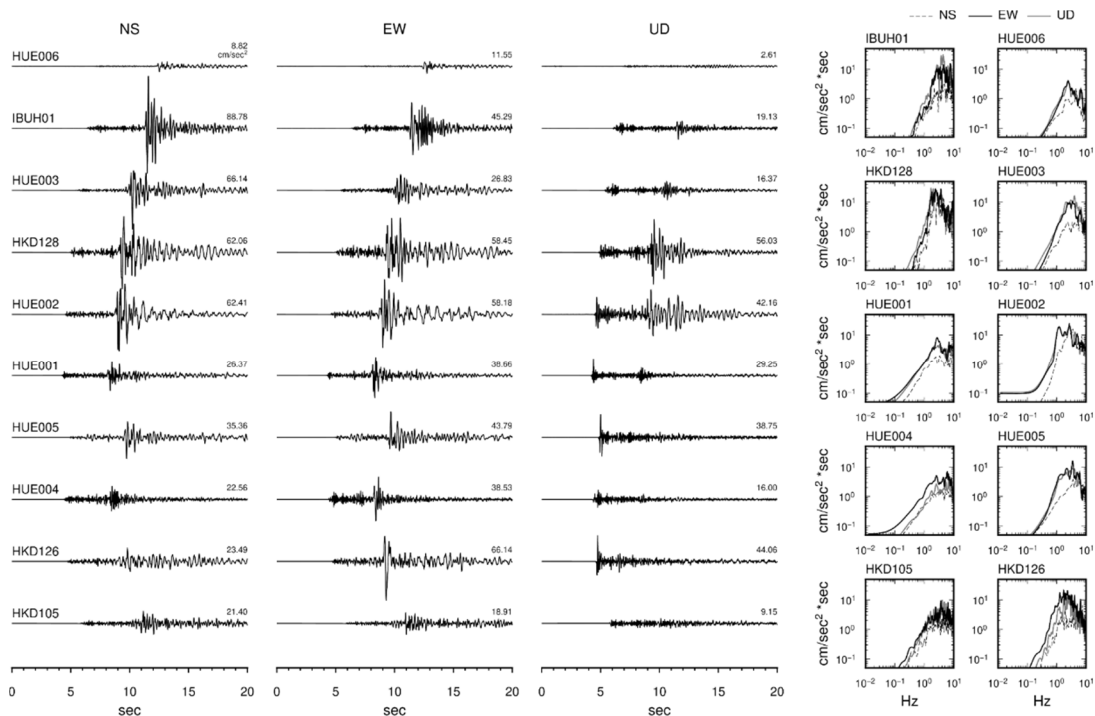


図3 2018年9月14日6時54分の地震 (M4.6、d=26 km) の
加速度波形とフーリエスペクトル：コード名 HUE が地震後に設置した臨時観測点

謝辞

防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net のデータを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

原稿の校正には小委員会での議論が基となっております。

参考文献

- [1] 青井真: 全国を網羅する陸海統合地震津波火山観測網 MOWLAS, 地震本部ニュース, 10, pp.8-9, 2018.
- [2] 釜江克宏: 強震データの予測への利用法, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.51-56, 2000.
- [3] 高井伸雄, 前田宜浩, 重藤迪子, 笹谷努: 応答スペクトルの単一サイト予測式 (SS-GMPE) —三陸沖アウターライズ地震における検討—, 日本地震工学会論文集, 15, pp.18-37, 2015.
- [4] 中原恒: 地震波干渉法 その2 応用, 地震 第2輯, 68, pp.125-133, 2016.
- [5] 地元孝輔, 山中浩明: 短周期帯域における地震波干渉法によるレイリー波群速度推定の適用性, 物理探査, 66, pp.179-188, 2013.
- [6] 境有紀: 2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性—建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標—, 日本建築学会構造系論文集, 78, pp.35-40, 2013.
- [7] 小林啓美: 日本の強震観測の歩み, 日本地震学会ニュースレター, 13, pp.17-20, 2002.
- [8] 工藤一嘉: 強震観測 - 現状と展望, 地震. 2 輯, 47, pp.225-237, 1994.
- [9] 田中貞二: 日本における強震計の開発と初期の強震観測, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.39-48, 1995.
- [10] 杉戸真太: 強震動アレー観測記録データベースについて-(財)震災予防協会のアレー観測記録データベース開発・活動の紹介-, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.7-12, 1995.
- [11] 佐間野隆憲, 瀬尾和大: 関東地方広域における関東地震のスペクトル強度の推定, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.115-122, 1995.
- [12] 片岡俊一, 趙文方: SP,PS 変換波を利用した基盤構造推定の試み, 強震データの活用に関するシンポジウム-強震データベースの現状と共同利用の試み-, pp.61-66, 1995.
- [13] 佐藤吉之: 公的機関を中心とした強震観測の現状, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.3-10, 2000.
- [14] 植竹富一: 共同観測による高密度強震計アレイ, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.11-14, 2000.
- [15] 渡壁守正, 佐間野隆憲, 高橋克也: 強震動データベースに望まれる姿, 第2回強震データの活用に関するシンポジウム-建物の耐震性能設計を目指した強震観測-, pp.27-34, 2000.
- [16] 植竹富一: 平成16年新潟県中越地震の地震動と原子力発電所の建屋応答, 第4回強震データの活用に関するシンポジウム-最近の地震に建築物はどう応答したか-, pp.39-44, 2005.
- [17] Hatayama Ken, Kanno Tatsuo, Kudo Kazuyoshi: Control Factors of Spatial Variation of Long-Period Strong Ground Motions in the Yufutsu Sedimentary Basin, Hokkaido, during the Mw

- 8.0 2003 Tokachi-oki, Japan, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 97, pp.1308-1323, 2007.
- [18] 笹谷努, 前田宜浩, 高井伸雄: 北海道の長周期地震動と深部地盤構造, 物理探査, 59, pp.315-326, 2006.
- [19] 防災科学技術研究所: 記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」--歴史と展望--: 講演集, 防災科学技術研究所 2005.
- [20] 大野晋: 最近の被害地震の強震観測例, 第 5 回 強震データの活用に関するシンポジウム-社会に役立つ強震観測-, pp.9-21, 2008.
- [21] 源栄正人: オンライン地震観測と早期地震警報システム, 第 5 回 強震データの活用に関するシンポジウム-社会に役立つ強震観測-, pp.39-56, 2008.
- [22] 功刀卓, 青井真, 藤原広行: 強震観測―歴史と展望―, 地震 第 2 輯, 61, pp.19-34, 2009.
- [23] 防災科学技術研究所: K-NET または KiK-net で震度 5 弱相当以上が観測された地震のリスト, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/cgi-bin/kyoshin/bigeqs/index.cgi>, (2018/11/13accessed)
- [24] Suzuki Wataru, Aoi Shin, Kunugi Takashi, Kubo Hisahiko, Morikawa Nobuyuki, Nakamura Hiromitsu, Kimura Takeshi, Fujiwara Hiroyuki: Strong motions observed by K-NET and KiK-net during the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Earth, Planets and Space, 69, pp.19, 2017.
- [25] 青井真, 功刀卓, 鈴木亘, 森川信之, 中村洋光, 先名重樹, 藤原広行: 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動, 地震 第 2 輯, 64, pp.169-182, 2012.
- [26] 三宅弘恵, 浅野公之, 瀨瀬一起, 岩田知孝: 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いた震源モデルの概要, 日本地震工学会論文集, 16, pp.12-21, 2016.
- [27] 山中浩明, 津野靖士, 地元孝輔, 新色隆二: 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震観測と微動アレイ観測による KiK-net 芳賀観測点周辺での地盤震動特性の評価, 日本地震工学会論文集, 12, pp.143-159, 2012.
- [28] 山中浩明, 津野靖士, 地元孝輔, 山田伸之, 福元俊一, 江藤公信: 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震観測と微動探査による K-NET 築館観測点周辺での地盤増幅特性の評価, 物理探査, 64, pp.389-399, 2011.
- [29] 防災科学技術研究所: 陸海統合地震津波火山観測網 (MOWLAS) とは, <http://www.mowlas.bosai.go.jp/mowlas/>, (2017/11/13accessed)
- [30] 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: 首都圏地震観測網(MeSO-net)の展開, 東京大学地震研究所彙報, 84, pp.71-88, 2010.
- [31] 津野靖士, 山中浩明, 翠川三郎, 山本俊六, 三浦弘之, 酒井慎一, 平田直, 笠原敬司, 木村尚紀, 明田川保: 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の本震記録と余震記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける長周期地震動の特性, 日本地震工学会論文集, 12, pp.102-116, 2012.
- [32] 防災科学技術研究所: 概要―観測施設, http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin_index.html, (2017/11/13accessed)
- [33] 坂上実, 高橋正義: 強震観測室の変遷と現状: 観測点選定・観測点建設・強震計設置について, 技術研究報告, 2, pp.102-119, 1997.
- [34] 建築学会強震観測小委員会: 強震観測の手引き, <http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/KyoshinTebiki/index.php>, (2017/11/13accessed)

- [35] Kudo Kazuyoshi, Kanno Tatsuo, Okada Hiroshi, Özel Oguz, Erdik Mustafa, Sasatani Tsutomu, Higashi Sadanori, Takahashi Masayoshi, Yoshida Kunikazu: Site-specific issues for strong ground motions during the Kocaeli, Turkey, earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, pp.448-465, 2002.
- [36] 福島康宏, 山田真澄, 後藤浩之: 臨時余震観測記録を用いた東北地方太平洋沖地震における登米市迫町佐沼の地震動推定, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 68, pp.119-125, 2012.
- [37] 後藤浩之, 羽田浩二, 澤田純男, 吉田望, 大内徹: 常時微動観測と臨時余震観測による福島県浪江町市街地の地盤震動特性評価, *日本地震工学会論文集*, 16, pp.309-321, 2016.
- [38] Takai Nobuo, Shigefuji Michiko, Rajaure Sudhir, Bijukchhen Subeg, Ichiyanagi Masayoshi, Dhital Megh, Sasatani Tsutomu: Strong ground motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68, pp.10, 2016.
- [39] 津野靖士, 地元孝輔, 山中浩明: 東北地方太平洋沖地震の余震観測記録と微動観測記録の解析から推定された茨城県中部に於ける S 波速度構造—東茨城台地に注目して—, *物理探査*, 64, pp.401-412, 2011.
- [40] 上林宏敏, 浅野公之, 関口春子: 平成 30 年 6 月 18 日大阪府北部の地震の震源像と大阪平野における強震動の概況, 第 46 回地盤震動シンポジウム, pp.105-114, 2018.
- [41] 地震調査推進本部: 平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査平成 28 年度成果報告書, https://www.jishin.go.jp/database/project_report/kumamoto_sogochousa-h28/, (2017/11/13accessed)
- [42] 高井伸雄, 重藤迪子, 一柳昌義, 高橋浩晃, 前田宜浩: 2018 年北海道胆振東部地震における強震動, 第 46 回地盤震動シンポジウム, pp.115-120, 2018.