

シリーズ「新・強震観測の最新情報」

(第20回) 日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)

国立研究開発法人 防災科学技術研究所 植平賢司

1. はじめに

日本海溝海底地震津波観測網 (Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench, 通称 S-net) は東北日本太平洋側の海底に展開されており、海域で発生する地震や津波を観測することを目的に設置された世界で類を見ない大規模なインライン式の海底観測網である。北海道沖から千葉県房総半島沖までの海底に、地震計と、津波を観測するための水圧計から構成される観測装置 150 点が設置されており、そのデータは海底光ケーブルを通じて陸上局にリアルタイムで伝送され、陸上局からは地上回線を通じてデータが配信されている。東日本大震災をもたらした 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震 (M9.0) (以下、東北沖地震) を契機に、文部科学省からの補助金を受け 2011 年から 2017 年にかけて防災科学技術研究所 (以下、防災科研) が整備を行なった。2016 年より 125 観測点での運用を始め、2017 年より全 150 観測点での運用を開始した。本稿ではこの S-net について紹介する。

2. 目的

東北沖地震発生当時、東北日本太平洋側の海域全体においてリアルタイムで地震及び津波を観測可能な観測点は、それぞれ 20 観測点弱であり、陸上の地震観測網や GNSS 観測網と比べて圧倒的に少なかった。海域における観測体制が手薄だったことが、東北沖地震発生時に正確な地震及び津波の情報が出せなかった一つの要因であるとの認識のもと、また東北地方太平洋沖では引き続き規模の大きな海溝型地震が発生し、今後も強い揺れや高い津波に見舞われるおそれがあること¹⁾等から、災害軽減に資するための津波即時予測の高度化、緊急地震速報の高度化、地震像の解明を目的として S-net の整備は始まった。

3. 観測網概要

S-net は、北海道沖から千葉県沖の東北日本太平洋側の海底に地震計と水圧計を搭載した観測装置を合計 150 カ所に設置したものであり、全長約 5,500 km の海底光ケーブルでこれらを結び、リアルタイムで観測データを伝送する観測網である (図 1)。海溝型地震やアウトターライズ地震のように震源が浅く、逆断層型や正断層型のような縦ずれ

成分を含むマグニチュード 7.5 クラス以上の地震が海底下で発生した場合、沿岸部で被害を及ぼすような顕著な津波が発生することが予想される。S-net ではマグニチュード 7.5 クラス震源域の中に最低 1 観測点が配置されるように設計を行った。また、発生した津波が沿岸に到達するまでの間に、沿岸部での津波到達予想時刻や予想津波高を精度良く推定するためには、津波の波源となる可能性の高い海溝軸と沿岸との間に出来るだけ多くの実測データがあることが望ましい。強震動についても同様なことが言え、海溝軸から沿岸に至る方向に観測点が密なほうが良い。そのような考えのもと、S-net では観測装置を海溝軸に直交する方向にはおよそ 30 km 間隔、海溝軸に平行な方向にはおよそ 50~60 km 間隔で配置するよう設計した。

S-net は、ケーブル切断等の耐障害性を高めるため、また、観測装置の耐電圧や光波長多重通信における波長の制約などにより、6つの海域 (図 1 の①から⑥) に分かれたサブシステムから構成されている。ケーブルの陸揚げ部は青森県から千葉県にかけて 5 カ所あり、付近に陸上局が設置されている (図 1 の■)。観測網の耐障害性を高めるためいくつかの工夫を行った。ケーブル切断の耐障害性を高めるため、基本的に 1 サブシステムのケーブルの両側を陸揚げし、双方から給電及びデータの取得を出来るようにした。1 カ所のケーブル障害であればどちらかの陸上局からデータの取得が可能となっている。また、底引き網漁などの漁業活動との干渉を防ぐため、水深 1,500 m 以浅については、海底光ケーブル及び観測装置を海底下 1 m 程度に埋設している。また、ケーブルルートについても海底地滑りなどケーブル障害の原因となるような事象が発生しそうな海底地形を避けて設計・設置を行っている。

観測装置は直径 34 cm、長さ 226 cm の円筒型ベリリウム銅製で出来た耐圧容器の中に収容されている。この耐圧容器の中に主電源部、光アンプ部、電源制御部、伝送部、センサー部といった観測に必要な機能がすべて収まっている。電源部や光アンプ部など海底光通信技術を取り入れている部分については海底通信用の中継器に用いられている高信頼性部品を採用し、製造環境や技術も同様の工程を採用することにより高い信頼性を確保している。また、センサーは冗長化・広帯域化のため、地震計 4 セットと水圧計 2 式の計 6 セットが搭載されている。

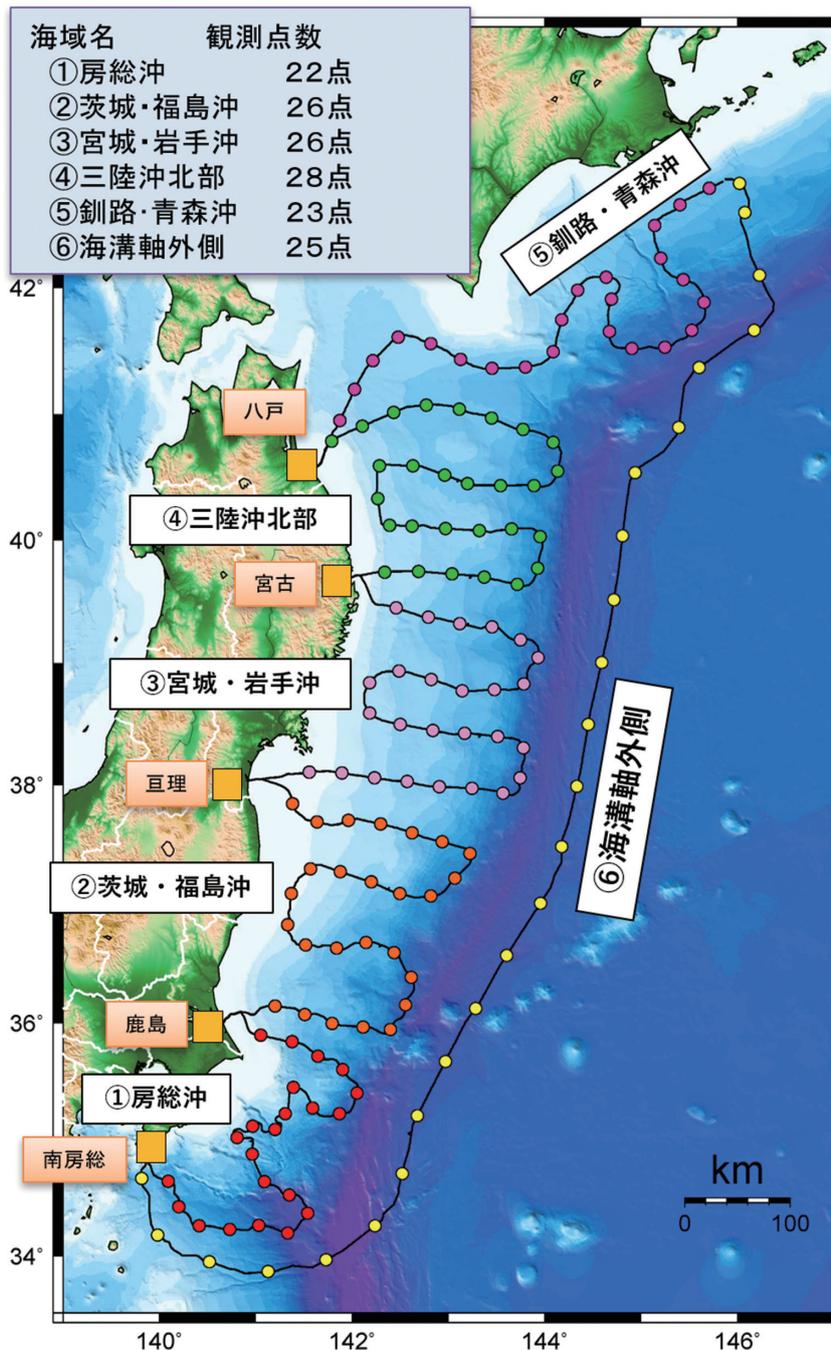


図 1 S-net の観測点分布図. 丸印が観測点を表し, 四角が陸上局を示す.

地震計については, サーボ型加速度計 (日本航空電子社製 JA-5TYPE III A) が 3 成分 2 式, 計測範囲が $\pm 2G$ の水晶振動式加速度計 (Quartz Seismic Sensors 社製周波数出力型) が 1 式, 固有周波数 15Hz の速度計 (GEOSPACE 社製 OMNI-2400) 3 成分 1 式が搭載されている. 2 式の JA-5TYPE III A の計測範囲はハードウェア的な設定でそれぞれ $\pm 2G$ と $\pm 5G$ に設定してある. $\pm 2G$ のものについてはプログラマブル・ゲイン・アンプにより更に $\pm 0.0625G$ の計測レンジのハイゲインデータも収録している.

水圧計については, 水晶振動式高精度水圧計 (Paroscientific 社製の 8B7000-2-005 もしくは 8B8000-2-005) を 2 式が搭載されている. 水深換算で数 mm の分解能を持つ.

陸上局から配信されるデータのサンプリング周波数は, 地震計は 100 Hz, 水圧計及び温度計 (水晶振動式加速度計の加速度及び水圧計の水圧値の温度補正用) は 10 Hz である.

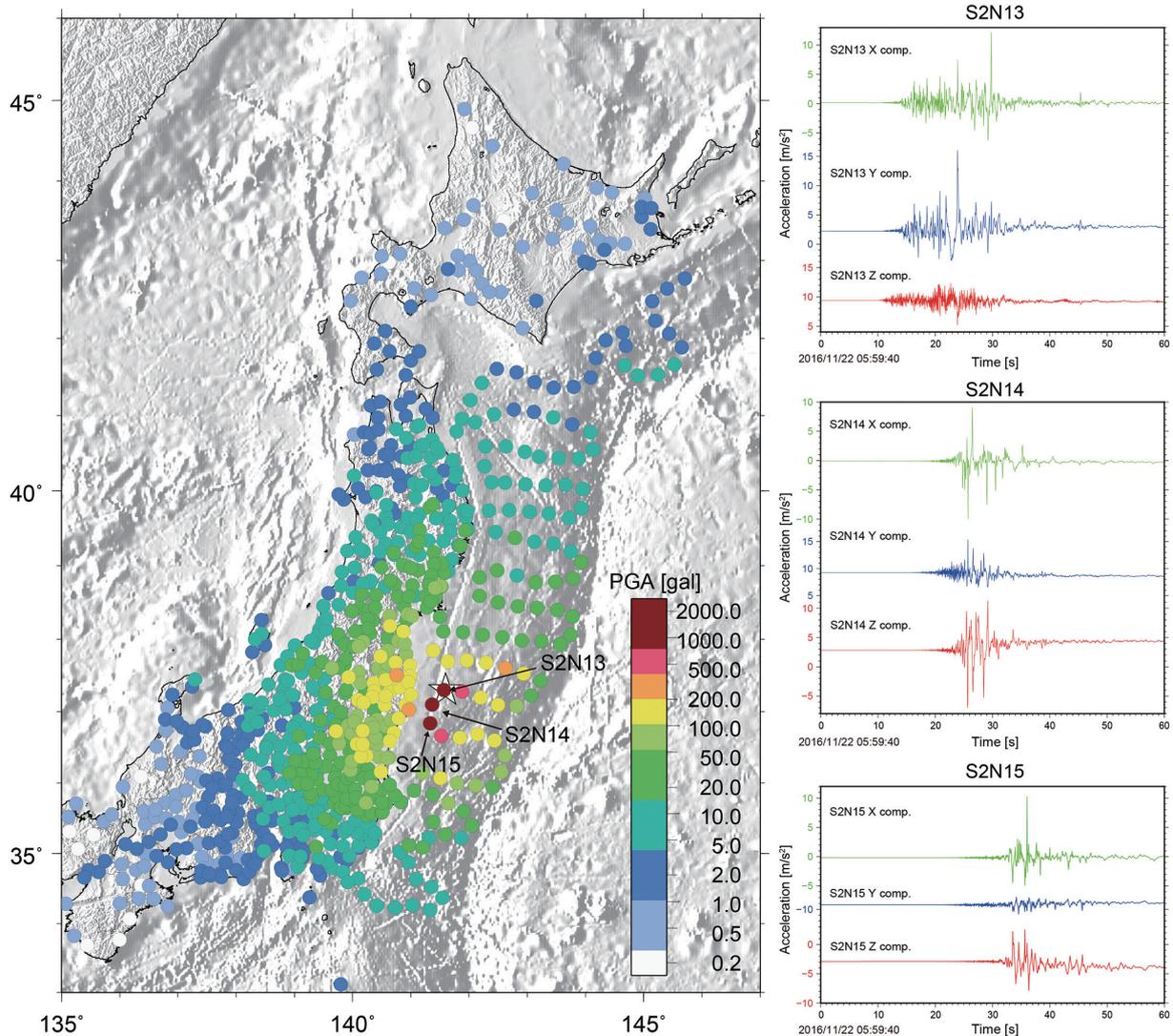


図 2 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震による S-net で記録された強震動波形例 (カラー図面は https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushimal61122/image/off-fukushima161122_snet_fig2.png を参照). (左) 海域 S-net 125 点と相模湾ケーブル式地震観測施設 (K-NET) 6 点, 陸域 K-NET 365 点, KiK-net 346 点で観測された最大加速度分布. 星は震央位置を示す. (右) 上から S2N13, S2N14, S2N15 観測点の直交 3 成分の加速度波形. X 成分は円筒形観測装置の長軸方向, Y, Z 成分はそれを法線とする面内の直交する 2 方向である.

4. データ

2016 年に図 1 に示す⑥海溝軸外側海域以外の, ①房総沖海域から⑤釧路・青森沖海域の 125 観測点の構築が終わり, 2017 年 4 月に残る⑥海溝軸外側海域の 25 観測点の構築が行われ, S-net の整備が終了した. S-net データは陸上局から地上の IP-VPN 回線網を通じて防災科研のデータセンターや東京大学地震研究所のバックアップセンター, 気象庁などにリアルタイム伝送されている. 防災科研のデータセンターにおいて S-net データはアーカイブされており, サーボ型加速度計・速度計・水圧計のデータを地震津波火山ネットワークセンターのホームページで一般にも広く公開している.

⑥海溝軸外側海域以外の構築が終わってまもなく 2016 年 11 月 22 日に気象庁マグニチュード 7.4 の地震が福島県沖で発生し, 仙台港で最大 1.4m の津波を観測した. この地震の S-net 125 観測点, 相模湾ケーブル式地震観測施設, 陸上の K-NET・KiK-net で観測された最大加速度の分布を図 2 左図に示す. S-net の S2N13 観測点は震源のほぼ直上に位置しており, 非常に大きな加速度を記録したことが分かる. 図 2 右図に, S2N13 観測点とその南南西に位置する S2N14 及び S2N15 観測点の加速度計 (JA-5TYPE III A) の記録を示す. いずれの観測点でも 1,000 gal 以上の最大加速度を記録し, その加速度波形にはスパイク状のフェーズが見られた.

5. 終わりに

S-net のデータは気象庁へも陸上局から直接リアルタイムで伝送されており、緊急地震速報や津波警報・注意報の発表にも使用されている。加えて、JR 東日本²⁾ と JR 東海³⁾ にも S-net の強震記録の情報をリアルタイムで伝送しており、強震発生時の新幹線や一部在来線の制御にも使われている。また、千葉県やインフラ事業者にも伝送されており、各機関に応じたデータの即時利用が行われている。今後もデータ活用を進めていきたい。

S-net のデータは防災科研のデータセンターでアーカイブされている。2016 年 8 月 15 日以降（⑥海溝軸外側海域については構築の終わった 2017 年 4 月 13 日以降）のサーボ型加速度計・速度計・水圧計のデータを防災科研の地震津波火山ネットワークセンターのホームページ（[https://](https://www.mowlas.bosai.go.jp/)

www.mowlas.bosai.go.jp/）で公開しており、こちらからデータを取得できる。研究その他の目的に S-net の観測データを役立てていただければ幸いである。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部, 2011, 東北地方太平洋沖地震関連情報, <http://www.jishin.go.jp/main/tohoku/kaisetsu.pdf>.
- 2) 東日本旅客鉄道株式会社, 2017, 海底地震計情報の活用等による早期地震検知体制の強化について, <https://www.jreast.co.jp/press/2017/20171019.pdf>.
- 3) 東海旅客鉄道株式会社, 2017, 東海道新幹線における地震検知の早期化について, https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000035513.pdf.

(第 21 回) 地域と連携した強震観測の展開

名古屋大学減災連携研究センター 飛田 潤・福和伸夫・平井 敬

はじめに

地域における地盤・建物の強震観測は、研究目的のみならず、地震防災や設計用入力地震動などへの貢献が期待される。一方で、観測機器や運用体制、情報を活かす技術や研究などは、各地域の状況に合わせた取り組みが重要である。1995 年兵庫県南部地震以降の震度観測の拡充に合わせて、強震観測に関わる機関の連携協力により観測体制を強化するとともに、地域の防災力向上や耐震化につながる活動を展開した例について述べる。

大都市圏強震動総合観測ネットワーク（東海）

阪神・淡路大震災の被災と、帯状の被害域（震災の帯）の発生を契機に、90 年代後半には K-NET など全国を覆う強震観測網が整備され、東海地域でも各自治体の震度情報ネットワーク、ライフライン機関の地震観測などが実現しつつあった。これらは広域の面的な地震動を把握しうするため、防災対応や地震動予測などに有効と考えられた。一方で観測を担う行政や企業等の担当者は専門家ではなく、大学の研究者も十分な情報を持たない場合が多かった。そこで、愛知県、名古屋市、中部電力、東邦ガス、愛知工業大学、名古屋大学などの機関の観測担当者で「名古屋地域強震観測研究会（名震研）」を 1998 年より運営し、観測網の確認やデータの整理・活用などを行った¹⁾。

1999 年に大都市圏強震動総合観測ネットワークが 6 大都市圏に構築され、中京圏では名震研の各機関の地震波形観測情報をオンライン一元化するシステムとして構築され

た^{2),3)}。愛知県、三重県、名古屋市、岐阜県（震度のみ）の震度計を中心に、ライフライン企業、建設企業、大学等の波形データをオンライン収集・データベース化した。

観測システムの接続には個別にかなりの工夫を要したが、震度情報だけでなく波形データを集約することで相互比較による記録の信頼性検討を行い、さらに観測担当者の情報交換の役割を果たしたといえる。観測結果として地図上の震度分布と波形・スペクトルの図をウェブで公開したが、デジタルデータの提供は原則として各機関に依頼する形式としている。

現状の運用と機器等

2009 年ころから自治体震度観測の機器更新が順次行われ、震度計が最低限満たすべき仕様による共通化が図られた。機関内でのデータ収集はオンライン化されているが、独自のシステムが多い。大学側と観測システムをオンライン接続してデータ回収する方法は、セキュリティや開発経費負担の課題があり、現在では愛知県など一部を残すのみである。大学等の実験的な観測システムには終了したものもあるが、新たに加わった機関もある。地域での協働体制は継続しており、多くの機関では定期的（あるいは大きな記録が得られた際）にオフラインでデータを提供いただき、集約する方式となっている。自治体計測震度情報が一元化される現状でも、情報共有の連携体制は重要と考えられる。記録の活用として、多様な防災情報との統合利用を試みている⁴⁾。また地下構造の推定や設計用入力地震動策定への

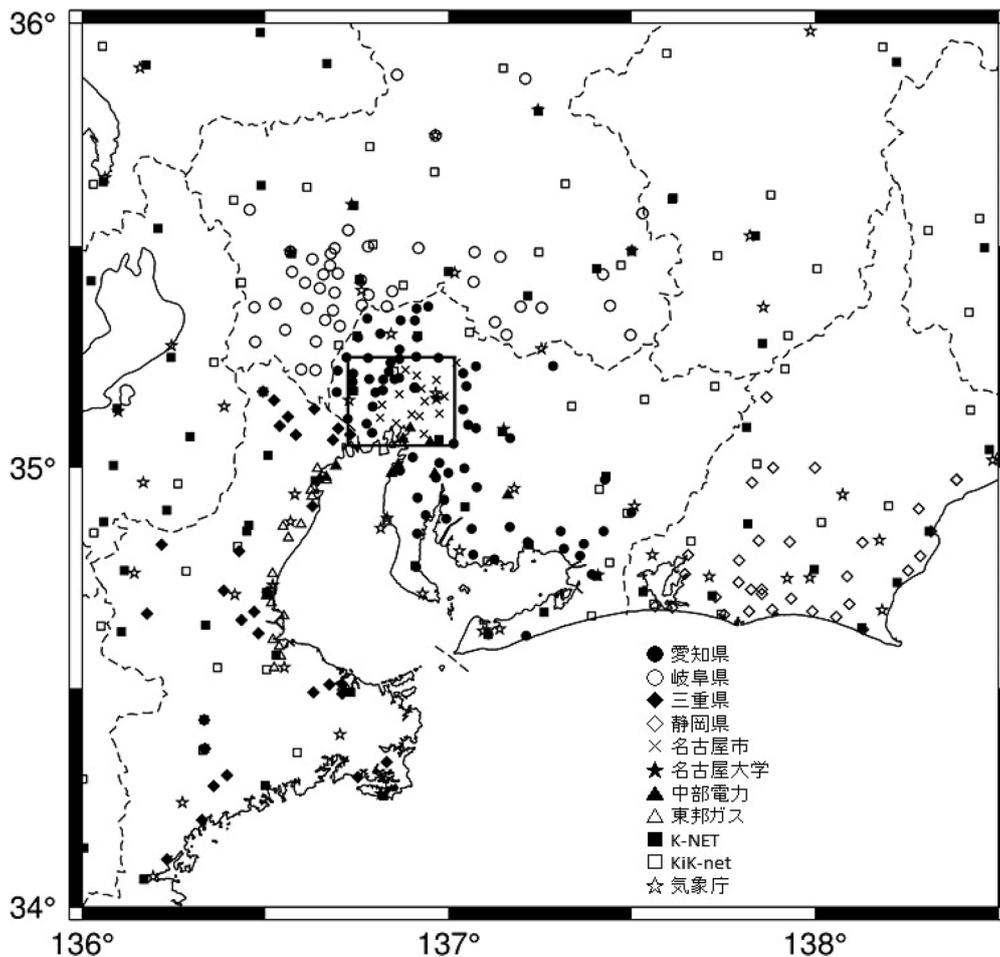


図 1 2016年4月1日三重県南東沖の地震の記録が得られた観測点

応用も行われている。ただし現状でもオンラインでのデータ公開は行っていない。

観測機器はほとんどがサーボ加速度計であり、震度計の標準仕様に準じてフルスケールレンジ、分解能、刻時精度、データ容量や電源補償機能など共通性が高い。またフォーマットは強震 WIN32 を採用するなど共通性が高まっている。

震度観測点の高密度化や観測点配置により観測最大震度が大きくなる傾向が知られている⁵⁾。将来展開として一層の高密度化を目指して、高精度の震度観測点を簡易な計測機器で補間する「階層的震度観測網」を限定地域で試みている。近年は廉価な MEMS 加速度センサを用い、気象庁の検定を受けた計測震度計 (OYOSI 製 ACCURA 等) を使用して、LTE 通信でコンパクトな観測体制を構築している。さらに将来は多様なセンサの活用が想定され、コネクテッドカーの車載加速度センサ等によるビッグデータの地盤震度計測の検討を始めている。

建物観測の展開と観測情報活用の取り組み

兵庫県南部地震以降の耐震化や建築基準法の性能規定化などにより、特に一般的な中低層建物を中心に多様な建物の強震観測データを蓄積している。建物の観測は個別性が高く、データの公開性が低いなどの制約があるため、種々の建物・地盤条件で戦略的な観測体制を展開し、地盤・建物のデータベースと合わせて公開・活用することを試みている^{3),6),7)}。観測対象の多くは庁舎や病院、あるいは学校等の公共性の高い建物であるが、高層オフィス、免震建物 (レトロフィット含む)、文化財など特殊な観測例もある。また、地盤・建物系の振動特性などを抽出するため、多様な比較対象や建設中の建物で連続観測を行うなど、「戦略的強震観測」を実施している。

庁舎の観測は多数実施しており、庁舎内のトータルな防災活動への展開も試みている⁸⁾。また強震計を高等学校に貸与し、手動によるメンテナンス・データ回収を依頼するとともに、記録の分析等で連携して、理科・防災教育に活かす取り組みを行っている⁶⁾。

観測機器は状況により多様である。建物側で用意された

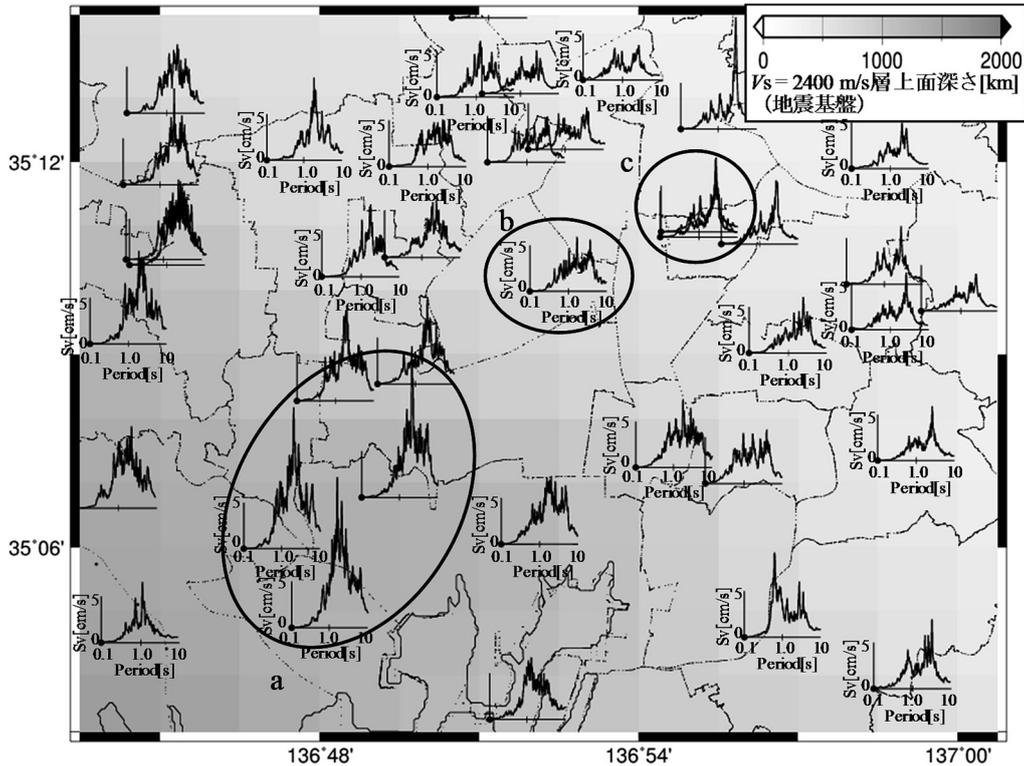


図 2 名古屋市周辺 (図 1 中の長方形) の速度応答スペクトル分布

観測システム (キネメトリックス社, アカシ社製など) のほか, 期間を限った観測ではスタンドアロンの強震計 (ALTUS ETNA, K-NET95 など) を用意して設置している場合が多い. 観測状況によっては廉価な加速度センサ (OYOSI E-catcher, 白山工業 SU102+LU102 等) を使用する. オフラインの場合は頻繁な点検が必要となるが, メモリ大容量化などでカバーするとともに, 観測建物の所有者や使用者との関係構築に寄与するともいえる.

代表的な観測例

1998 年 4 月 22 日に発生した養老の地震 (M5.4) では 300 地点以上で観測記録が得られ, 最大震度は 5 弱 (三重県) であった. 観測初期の状況確認に寄与するとともに, 名震研や大都市圏強震動総合観測ネットワーク構築のきっかけとなる重要な地震であり, また養老断層近傍の地震としても意味がある. 2004 年 9 月 5 日の 2 回の紀伊半島南東沖の地震 (M7.2, 7.5) は, 現在であれば南海トラフ地震臨時情報につながる地震であり, 2 回目の地震では三重県で震度 5 弱, 愛知県・岐阜県・静岡県などで震度 4 が観測されている.

2016 年 4 月 1 日の三重県南東沖地震 (M6.5) はプレート境界の地震で, 南海トラフ地震の揺れの予測などに重要である. 関係観測機関に依頼して波形データのオフライン収集を行い, 気象庁, 防災科研 (K-NET, KiK-net) を含

めて 10 機関の計 386 地点の地表観測点で記録が得られた (図 1). 速度応答スペクトル (図 2) からは, 図中の a~c の各地点で深部・浅部地盤構造に対応する周期・振幅特性が読み取れる (c は名古屋市三の丸地点). また愛知県内の高密度震度分布には, 震源域に近い 1944 年東南海地震の推定震度分布との類似性がみられる. この地震では多数の建物観測記録も得られており, 複数の免震建物の応答比較や地盤条件の相違の影響などを検討している.

まとめ

大学の活動として地域における地盤・建物の強震観測の推進と, それを通じた防災・耐震化の活動基盤を構築していることが要点といえる. そのうえで, 近い将来の南海トラフ地震の記録をどのように取得し, 将来に活かすかが重要な課題と考えている.

謝辞

ここで述べた観測は地域の多くの機関の協力により行われている. また観測・システムの維持には多くの技術者と大学院生・学生の協力を得ている. 記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 福和伸夫・飛田 潤・中野 優, 2000, 名古屋地域強震観測研究会における地域の強震観測データ活用の試

- み—強震観測の最新情報 第13回, 地震学会ニュースレター, **11** (5), 14-17.
- 2) 飛田 潤・福和伸夫・中野 優・山岡耕春, 2001, オンライン強震波形データ収集システムの構築と既存強震計・震度計のネットワーク化, 日本建築学会技術報告集, **7** (13), 49-52, <https://doi.org/10.3130/aijt.7.49>.
 - 3) 福和伸夫・飛田 潤, 2005, 地域における多機関の強震観測網のネットワーク化と地域防災への活用, 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研究資料, **264**, 223-230.
 - 4) 飛田 潤・福和伸夫・倉田和己, 2009, ウェブGISとデータ相互運用技術による強震観測記録の統合利用環境, 日本地震工学会論文集, **9** (2), 51-60, https://doi.org/10.5610/jaee.9.2_51.
 - 5) 杉山充樹・吉岡優樹・平井 敬・福和伸夫, 2020, 震度観測体制の年代差・地域差の定量評価と震度情報の解釈, 日本地震工学会論文集, **20** (7), 101-119, https://doi.org/10.5610/jaee.20.7_101.
 - 6) 飛田 潤・福和伸夫・小島宏章・浜田栄太, 2007, 地盤・建物系の高密度強震観測の展開と建物動的挙動の検討, 日本地震工学会論文集, **7** (2), 37-56, https://doi.org/10.5610/jaee.7.2_37.
 - 7) 小島宏章・福和伸夫・飛田 潤・中野 優, 2003, 建物強震観測DB公開用webシステムの構築, 日本建築学会技術報告集, **9** (17), 553-558, <https://doi.org/10.3130/aijt.9.553>.
 - 8) 護 雅史・飛田 潤・福和伸夫, 2021, 南海トラフ地震に対する杭基礎中層庁舎建物の応答評価と防災啓発への活用, 構造工学論文集, **67B**, 605-614.