

一般協力者との連携と安価・旧型強震計の活用による新たな地震観測体制「Pネット」

A New Approach for Strong Motion Observation using Low-cost Sensors in collaboration with Nonprofessional Partners

2. 構造 — 2. 振動

強震観測	強震計	地震応答
学校教育	防災教育	ウェブ GIS

正会員	○飛田 潤 *	TOBITA Jun
正会員	福和 伸夫 **	FUKUWA Nobuo

1. はじめに

近い将来の巨大地震災害に備えた建物耐震化や防災対策の充実、さらには地震発生時の速やかな対応のためには、広域で多様な対象（地盤・建物）をカバーした地震観測体制の果たす役割がきわめて大きい。

日本の強震観測は 1995 年兵庫県南部地震以降に急速に進展し¹⁾、国や中央機関による全国的な観測網の整備が行われた。気象庁や自治体の計測震度計が高密度で設置され、全国で数千箇所の観測点からの震度情報は速やかに災害対応に活用されている。観測・伝達のリアルタイム性を追求した緊急地震速報も実用化された。しかしこれらの観測網で波形記録の収集・公開・活用はあまり行われていない。自治体計測震度網などの波形観測記録をデータベース化する大都市圏強震動総合観測ネットワークの運用は東海・関東のみにとどまっている²⁾。

一方、防災科研の K-NET や KiK-net は全国を均等にカバーし、高品質の波形データを蓄積してインターネットで一般公開しており、耐震工学や防災に広く活用されている¹⁾。しかし、詳細な地盤状況も考慮した検討には、数 10km 間隔の設置密度は十分とはいえない。

これらの地盤における強震観測に対して、建物の地震応答観測例はさらに限定されている。1990 年で約 2000 箇所という報告¹⁾もあるが、高度経済成長期に建設された高層建物などが多く、民間による観測のため公開性と継続性が確保されず、公開・利用されている建物観測記録はわずかである³⁾。また記録の利用状況も、基本的な応答特性の確認にとどまっている。強震観測に要するコストや労力の負担に加えて、既存技術に対する技術者の過信や一般市民の無関心も一因と考えられる。

以上の背景から、可能な限り多数の観測対象と波形観測記録を確保するとともに、それらが広く活用される枠組みの構築が不可欠である。このために筆者らは、非専

門家との協働を誘導する新たな強震観測体制「P ネット」を提案している⁴⁾。「P」は、People、Person、Partner などの意味を含めたもので、要点は以下の 2 点である。

- ①安価な地震計で簡略な観測体制をとり、メンテナンスや強震記録の回収などを現地の非専門家に依頼する。
- ②上記作業に協力するインセンティブとして、利用者の立場で強震観測のメリットを実感できるソフトウェアやウェブ環境、教育プログラム等を提供する。

これにより、自治体等の観測システムの更新で大量に廃棄される観測機材などを有効活用し、最小限のコストで多数の観測点を確保するとともに、観測を担当する協力者の意識や興味を喚起し、結果として建物耐震化や地震防災の普及啓発に資することを狙っている。本報告では、再利用強震計などを含む機材の開発・整備、ウェブ GIS による利用環境の検討、設置例と観測結果などをまとめ、今後の展開を論じる。

2. 現地の協力者との連携による強震観測の基本体制

更新された強震計等の再利用を前提とし、オフラインのスタンドアロン観測を主とする。観測記録の回収とサーバへの転送、機材メンテナンスなどの作業を現地の観測協力者に依頼する。協力者には、それぞれの立場で強震観測を活用できるソフトウェア環境を提供する。

観測対象としてまず学校校舎を選び、高等学校の理科教員に協力を依頼している。観測の基本体制を図 1 に示す⁴⁾。強震計は校舎の 1 階と上階などに個別に設置する。GPS による時刻校正や UPS による電源バックアップは可能な範囲で実施する。地震発生時には、PC を直接接続して専用ソフトで記録を回収し、電子メールに添付して大学のサーバに送る。サーバでは記録のヘッダ等によりデータベース化し、結果はウェブ GIS により利用できるようにする⁵⁾。学校では、PC で回収した記録のオフライ

* 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・工博

** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

ン分析や可視化ができるとともに、ネットワーク経由で広域の観測記録を参照し、他の自然・社会情報と合わせて理科・社会・防災等の教育に利用できる。これらの利用画面の例を図2に示す。図2左は利用者に提供しているPC用ツールで、強震計から回収した記録の最大値、震度、波形、1自由度系の応答アニメーションや応答スペクトルが表示される。このソフトウェアにより強震計を振動の実験などにも活用できる。図2右はウェブGISで観測状況を表示した例である。

このように非専門家に観測の維持管理から記録回収まで任せ、記録の精度、信頼性、即時性などに過度に期待しないことで、機材や設置、維持管理の費用・労力を減じて観測の展開が容易になる。また、大規模災害のインフラ障害時でも一定レベルのデータ回収ができ、最終的に多数の建物の観測記録をデータベース化できる可能性がある。

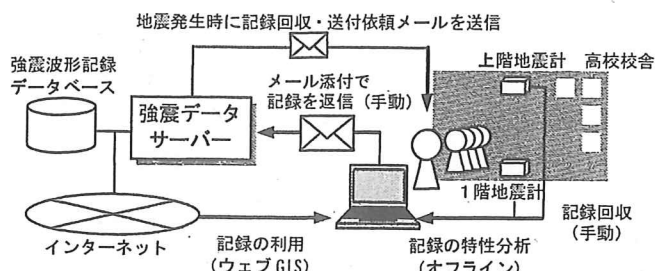


図1 観測協力者との連携による強震観測体制



図2 学習用ツールの例

3. 観測機材

本論で用いる強震計は主に防災科研から譲渡を受けたK-NET95で、1995～1996年に設置され、2003～04年度の更新により撤去されたものである。2008年に動作テストを行ったところ、133台のうち正常な観測ができないものが13台、観測は可能だが動作の一部に問題があるものが11台あった。

使用に当たりバッテリーボックスを外し、AC電源直結に改造した。電源確保が重要な場合は、安価な外付けUPSを接続することにより、内蔵バッテリーのチェック

と交換の手間を省き、規格品のUPSの定期交換で対応可能とした。メモリは8MB(120秒×70記録程度)で増設できないため、ノイズや余震が続く場合は頻繁なメンテナンスを必要とする。時刻校正はGPSを用いており、空が広く見える窓際にアンテナを設置すればほぼ受信する。インターフェイスはシリアルポートで、19,200bps程度の転送速度が上限となる。

強震観測の特性確認として、Eディフェンスにおける振動実験で、普及型強震計や小型廉価強震計と比較を行った(図3)。使用した3種の強震計の仕様比較を表1に、ホワイトノイズ加振時の特性比較を図4に示す。結果としてK-NET95強震計は今回の目的には十分な性能を持つことを確認した。なお、小型・廉価な半導体センサー強震計も、上下成分や分解能の問題はあるものの、ある程度以上の振幅では水平動は良好な特性を示している。

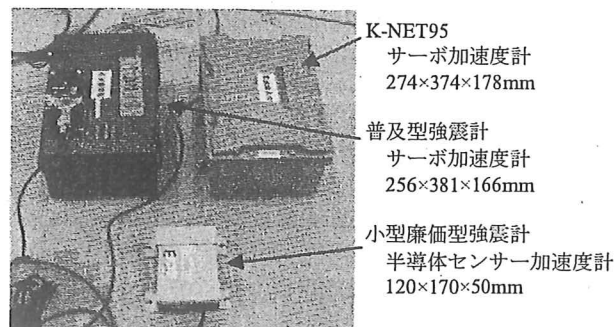


図3 振動台実験における特性確認の状況

表1 強震計の仕様緒元の比較

	①普及型(Eterna)	②K-NET95	③小型廉価(E-catcher)
センサー	サーボ加速度計	サーボ加速度計	半導体センサー加速度計
測定範囲	±2G(0.25~40G設定可能)	±2G	±2G(水平)、1G(鉛直)
周波数範囲	DC~40Hz	DC~30Hz(-3dB)	水平DC~20Hz、上下~4Hz
A/D変換	分解能16bit以上	24bit	実効16bit
ダイナミックレンジ	105dB以上	114dB	ノイズレベル20dB
サンプリング	100, 200Hz	100Hz	100Hz
時刻補正	GPS	GPS	NTP
記録媒体・時間	PCカード~512MB	フラッシュメモリ 8MB	100秒×56記録
通信ポート	RS-232C	RS-232C	RS-232C、イーサネット
電源	AC+内蔵バッテリー	AC(バッテリー追加可)	AC100V+乾電池
寸法	256×381×166mm, 3kg	274×374×178mm, 7kg	120×170×50mm

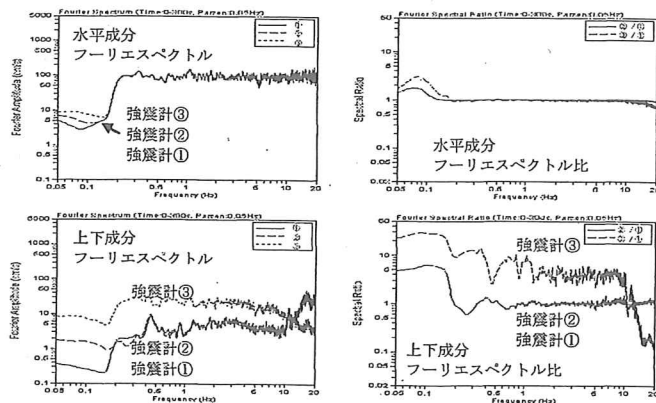
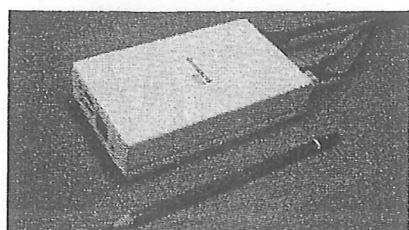


図4 ホワイトノイズ加振時のスペクトル特性比較

強震計の記録回収等の方式は、機器の制約も考慮して新たな試みを行っている。まず観測記録をメール添付でサーバに転送する方法は、ADSLやケーブルTVなどのネットワーク接続が可能であれば、自動送信とすることもできる。図5に小型のLinuxBoxを用いたネットワークインターフェイスを示す。主な機能は、定期的に強震計にアクセスし、新たな記録があれば読み出し、メモリ残量が少なくなればクリアし、NTPによる時刻あわせも行う。回収した記録および強震計のステータスはメール添付で自動送信する。これにより強震計のメモリ容量の制約やGPSの受信状況の影響は大幅に緩和される。本方法は外部から直接接続をしないため、一般家庭でグローバルアドレスが使えない場合や、行政機関等でセキュリティの制約が極めて厳しい場合でも対応できる利点がある。

以上の一連の検討により、強震計はネットワーク接続、インターフェイス速度、時刻同期、記憶容量などに制約があっても何らかに対応できるため、旧式あるいは安価な機材の活用が可能となる。K-NET に続き、2009 年度からは自治体の計測震度計が全国一斉に更新されつつあり、大量に廃棄される観測機材をコストをかけずに有効活用できる本手法の意義は高い。



接続されているケーブルは、地震計とのシリアル接続、LAN 接続、AC 電源。寸法は、約 135×80×33mm。

図5 小型LinuxBoxを用いたネットワークインターフェイス

4. 高校における観測の運用例

提案する観測体制に基づいて、愛知県内の高校数校で、理科教員の協力により建物強震観測を継続している⁴⁾。図6に鉄筋コンクリート造4階建校舎の1階と4階に設置した強震計の状況、図7に観測記録の例を示す。この学校は岡崎市にあり、2009年度には6地震の記録が得られた。最大の記録は2009年8月11日駿河湾の地震で、地盤で震度3、建物4階では約50galの応答である。2台の強震計はトリガ連動しておらず、この記録では1階のGPSも受信していないが、上下動成分の0.5~3Hzの範囲で相互相関関数により十分な精度で時刻合わせが可能で、図7(d)(e)のように4階/1階の伝達関数が安定して求められた。地震ごとに同定した固有振動数を図8に示す。張間・桁行両方向ともに数gal~50gal程度の範囲の記録であり、固有振動数の振幅依存性が見られる。

次に、最も近いK-NET地点(AIC014)と1階の記録

との比較を図9に示す。地点間は約10kmあるが、変位波形の長周期成分の特徴はよく一致している。振動台における性能テスト⁷⁾から、0.1Hz程度のローカットフィルタを用いれば加速度の二階積分による変位が安定して得られることを確認している。大振幅応答の際は層間変形から損傷評価も可能である⁷⁾。

以上のように本観測体制は、既存の地盤観測網の間を埋め、あるいは都市部の一般建物の観測を多数実現するために有効であることがわかる。

5. 今後の展開とまとめ

学校における観測は、前節で述べたような記録確保に関しては成果を挙げつつあるが、教育への密接な関連付けは関心の高い理科教員と一部の高校生徒に限られており、より多くの生徒や小・中学生への展開が課題である。高校の先生からは、防災や物理(振動)だけでなく、地学(地震)や地理(社会や災害)の教育に、生徒の関心を集める実質的な教材の希望が多い。指導要領の改訂により小中高等学校で防災教育が取り入れられたため、防災を軸とした既存教科教育の活性化も考えられる。

観測と教育を結びつける試みは、最近では東大地震研・防災科研ほかの首都圏小学校での地震観測⁸⁾や、京大防災研の満点地震計の活用⁹⁾などの例が見られる。一方、ネットワーク接続の振動観測機器を希望者に多数提供して、全国のリアルタイム揺れ情報をウェブで公開するプロジェクト¹⁰⁾がある。最近では高機能の携帯電話に内蔵された加速度センサーの出力を、GPS位置情報つきで収集・地図表示する試みもあり、より広く一般の興味を惹くために有効である。これらに対して本論の観測体制は、工学的観点から建物を主な目的とし、良質な波形記録の収集とデータベース化を目指すとともに、防災や耐震化と高度に連携する点が明確に異なっている。

観測協力者としては、高校教員のほかに、強震観測を専門としない一般の建築技術者・研究者をはじめ、他分野の技術者・研究者、行政やメディア、さらには耐震・防災に興味を持つ個人や建物管理者などを想定している。たとえば観測対象建物の情報入力に基づく簡易耐震診断機能の実装、ウェブGISによる地盤状況や入力地震動を考慮した被害予測、それらと観測記録の連携による建物のヘルスマニタリングと被災度判定などが考えられる。建築技術者向けには、建物の建設中から継続的に観測を行うことで、完成時に所期の性能であることの確認や長期的な劣化モニタリングに利用する。中小地震記録の蓄積により実際の応答特性とその変化を明確にでき、劣化・損傷の評価も可能である。

以上のように、P ネットにより非専門家が連携して強震観測に関与することで、運用負荷やコストを低減するとともに、データ流通を促し、強震観測の底辺を拡げることが期待できる。また多様な立場、興味、知識・技術を持つ協力者との協働により、強震観測記録の新たな利活用や防災への展開が期待できる。

謝辞

高校の理科教員の方々には継続的な観測にご協力いただいている。ソフトウェア等の開発はファルコン、白山工業にご協力いただいた。また防災科研 K-NET の記録を使用した。以上、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所編：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、2004.
- 2) 飛田潤、福和伸夫ほか：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、第 13 号、49-52、2001.

- 3) 日本建築学会強震観測小委員会編：第 3 回強震データの活用に関するシンポジウム、2002.
- 4) 飛田潤、福和伸夫：旧型強震計の活用と一般観測協力者との連携による強震観測体制「P ネット」の展開、日本地震工学会大会、46-47、2008.11
- 5) 飛田潤、福和伸夫、倉田和己：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、第 9 巻第 2 号、51-60、2009.2
- 6) 廣野衣美、牧原慎一郎、福和伸夫ほか：多点多成分振動観測記録の効果的な分析を支援する動画アプリケーションの開発、日本建築学会技術報告集、第 28 号、423-428、2008.10
- 7) 飛田潤、福和伸夫ほか：普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷のモニタリング、構造工学論文集、Vol.56B、229-236、2010.3.
- 8) 東大地震研・防災科研ほか：首都圏地震観測網(MeSO-net) <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/shuto/MeSO/>
- 9) 矢守克也：「満点計画」と防災学習のコラボ・プロジェクト
- 10) ウェザーニュース：Yure プロジェクト <http://weathernews.jp/yure/>

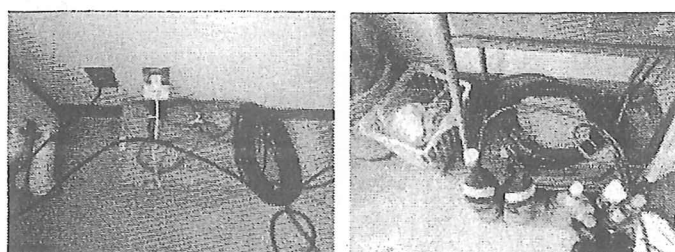


図 6 高校校舎の強震計設置状況例 (左：4 階、右：1 階)

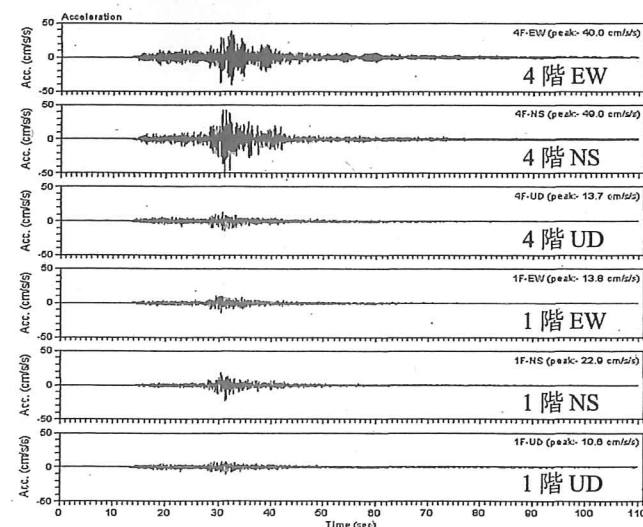


図 7 高校校舎で観測された加速度記録の例とスペクトル・伝達関数 (2009.8.11 駿河湾の地震)

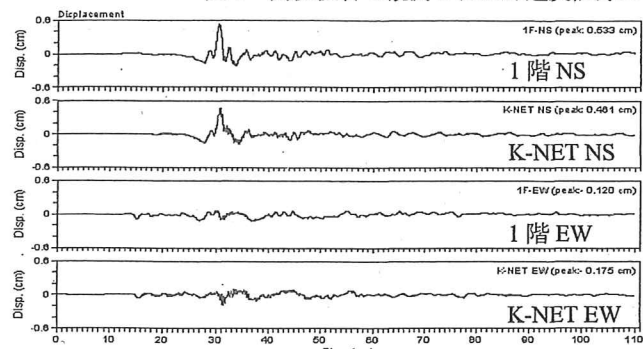


図 9 高校校舎の 1 階で観測された記録と最も近い K-NET (AIC014) の比較 (2009.8.11 駿河湾の地震)

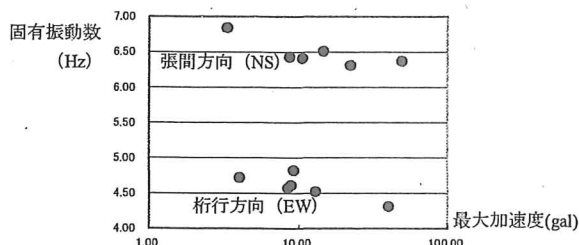
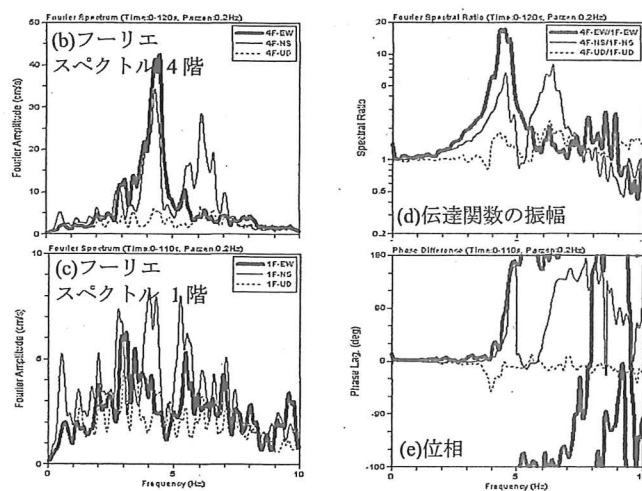
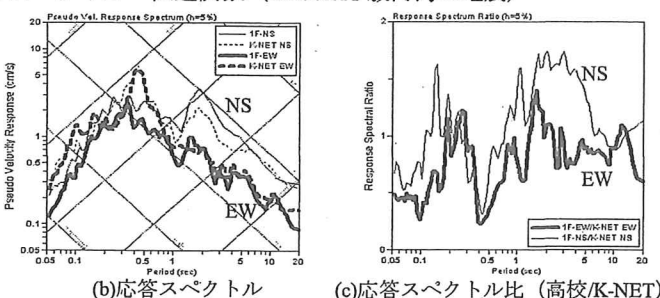


図 8 各地震で推定された固有振動数の振幅依存性



(a) 加速度波形 (4 階と 1 階で時刻同期済)



(b) 応答スペクトル

(c) 応答スペクトル比 (高校/K-NET)

(a) 変位波形 (加速度の 2 階積分、0.1Hz ローカットフィルタ適用)