

WLAN・Mobile Internet 利用環境振動測定・遠隔監視システムと実施例

○平尾 善裕*1 国松 直*2
濱本 卓司*3

キーワード：環境振動 振動測定 遠隔監視 WLAN Mobile Internet

1. はじめに

工場・事業場、建設作業、道路交通および鉄道などに起因した地盤を伝搬する振動は、地盤面よりも建物内での振動が大きくなることが知られている¹⁾。また、建物内の振動評価に関する国際規格^{2,3)}や日本建築学会の指針⁴⁾では、鉛直方向の振動だけでなく、水平2方向を含めた並進3方向の振動加速度時刻歴を計測することが必須とされている。したがって、地盤面での鉛直振動を計測したとしても、建物内での振動暴露実態を把握することは困難である⁵⁾。しかし、3方向の振動加速度時刻歴を計測するには、多チャンネルの記録器が必要であり、建物内の各階における多点での同時計測では、センサと記録器の間を延長コードで接続するなど、大掛かりな仕掛けが必要となる。例えば、生活道路を稀に通過する貨物自動車が原因となり、建物内において居住者が振動によって不快な思いをする場合⁶⁾や、早朝または深夜に同様の現象が発生して目が覚める場合⁷⁾には、長時間あるいは無人での計測が必要となる。これまでの計測方法および装置では、居住者の日常生活に支障をきたすことにもなりかねない。また、無人計測では、計測した振動が居住者の歩行などによる建物内部の振動なのか、外部から伝搬した振動によるものかを判別することも困難であり、居住者の環境振動暴露実態を正確に把握できない状況にある。

そこで、建物内および地盤面における並進3方向振動加速度時刻歴の計測における簡便化および効率化を目的とした無線振動計測システムを開発した。本システムは、多点に配置した振動計測およびデータ記録装置の無線制御、インターネットを利用した遠隔地からのシステム制御およびデータ転送を実現している。併せて、システムを用いた振動計測実施例についても報告する。

2. 無線振動計測システムの概要

本システムでは、3軸振動加速度ピックアップと4チャンネルネットワークデータレコーダの組み合わせ（1.5 m 長ケーブルで接続）により、建物内および建物近傍の地盤などで3方向振動加速度時刻歴を収録する装置（図1、以下、振動計測装置と記す）を使用している。商用電源が確保できれば、最大72時間のデータ収録（2 GbyteのCFカード使用時）が行える。また、単1型アルカリ乾電池を4本使用することにより、連続6時間のデータ収集が可能で



Fig. 1. Wireless vibration measurement device. Accelerometer dimensions: 67 (diameter) × 40.7 (height) mm; Weight: 370 g. Main unit dimensions: 50 (height) × 350 (width) × 250 (depth) mm; Weight: 2 kg.

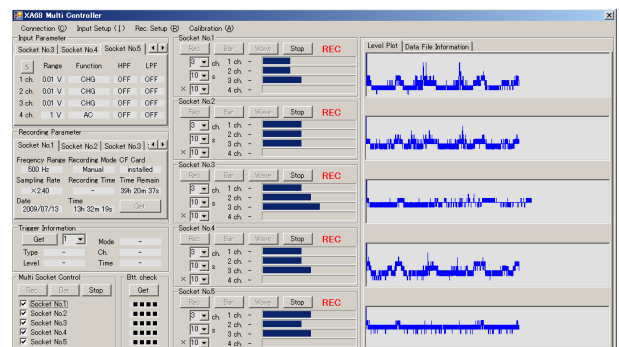


Fig. 2. Main form of control software for wireless measurement system stored data with five wireless vibration measurement devices (XA-72).

あり、商用電源が確保できない場所においても計測が可能である。ネットワークデータレコーダには、Ethernetポート(IEEE 802.3)が装備されており、LAN (Local Area Network) 上のPC（以下、制御用PCと記す）から制御ソフトウェア（図2）により、データレコーダの全ての機能を遠隔操作および収録したデータファイルの制御用PCへの転送が行える。本システムでは、振動計測装置に内蔵されている無線LANモジュール(IEEE802.11a/b/g)を用いて5台の振動計測装置と制御用PCをネットワーク化（図3）することにより、制御用PCから各振動計測装置を同時制御できる。多点同時計測において5台の振動計測装置を建物内外の測定点に配置したとしても、振動加速度ピックアップの延長ケーブルやLANケーブルなどで装置間を接続する必要はない。

制御用PCは、建物内外を問わず何処にでも設置することができ、階を越える通信や外壁を隔てた通信においても約20 m（見通し距離では約50 m）の範囲において安定し

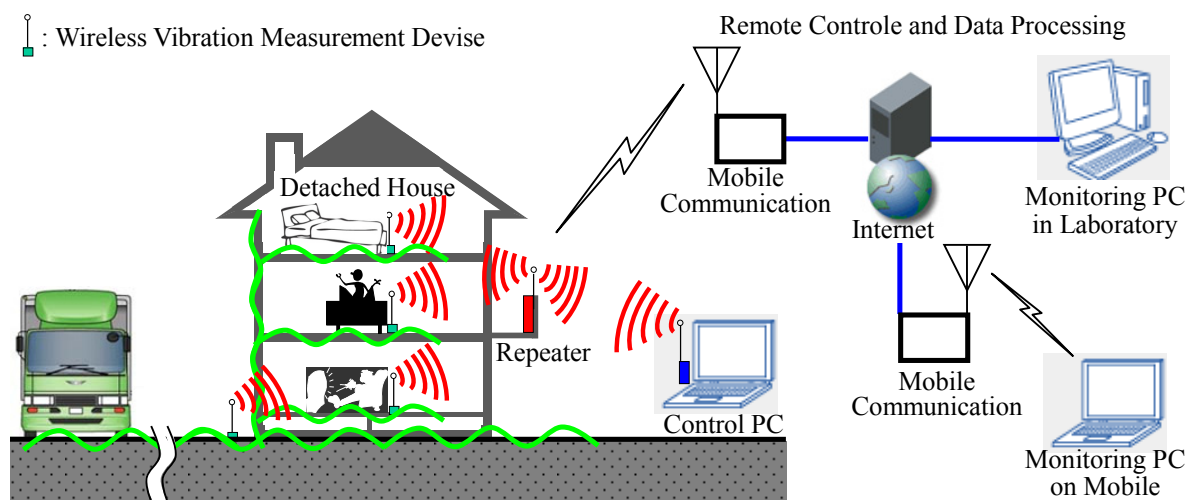


Fig. 3. Concept of wireless vibration measurement system using wireless local area network, mobile communication systems and wider internet communication system.

た通信が行える。無線 LAN モジュールに装備されている WDS (Wireless Distribution System) リピーター機能および高利得アンテナを使用した中継局を設置すれば、ALC パネル外壁や RC 造などの厳しい通信環境の建物においても、50 m 以上 (見通し距離では 100 m 以上) の範囲での安定した通信が行えることを確認している。中継局を複数設置すれば、高層ビルでの計測や見通し距離で 1 km を超える通信も可能である。

また、本システムの中継局には、移動体通信事業者 (携帯電話会社など) が提供している高速モバイルルータが組み込まれており、インターネットに接続できない環境においても携帯電話網経由でインターネットに接続することができる。それにより、VPN (Virtual Private Network) を用いて遠隔地にある PC (以下、遠隔操作 PC と記す) による制御用 PC の操作および遠隔操作 PC への計測データ転送が可能である。測定対象の建物は、移動体通信事業者のサービスエリア内であれば立地を問わない。それに加えて、無線 LAN 上に IP (Internet protocol) カメラを複数台接続することができるため、制御用 PC および遠隔操作 PC のどちらからでも同時に振動源の動画による遠隔監視が可能である。これにより、無人計測においても、システムの作動状況、計測データ収集状況および振動源監視を遠隔操作 PC (例えば、研究室やオフィスの PC、モバイル PC などインターネットに接続されている世界中の PC) より行うことができる。すなわち、建物内外で稀に発生する振動や早朝または深夜に発生する振動を計測するための長時間あるいは無人計測において、居住者の日常生活に支障をきたすことなく、振動暴露実態を把握できる計測システムが構築できたと考える。なお、本システムの無線 LAN 上には、IPv4 の理論上、100 台を超える振動計測装置 (IP アドレスクラス C を使用、ネットワークデータレコーダと無線 LAN モジュールのそれぞれに IP アドレスが必要) が接続可能であるが、データ転送などに必要な通信速度を考

慮すると 1 台の制御用 PC につき最大 5 台の振動計測装置が最適であると判断し、制御ソフトウェアを作成した。ただし、無線 LAN 上の制御用 PC を増設すれば、最大 5 台単位で振動計測装置を容易に増やすことができる。

3. 3 階建て木造住宅における振動計測実施例

無線振動計測システムを用いて、小規模鉄骨造建屋の解体作業現場に隣接する 3 階建て木造住宅において、約 8 時間に亘り、有人および無人振動計測を行った (図 4)。なお、測定点の選定方法は、日本騒音制御工学会平成 20 年度振動評価手法及び規制手法等検討調査委員会 (環境省委託業務) が提案した建設作業に係る振動測定マニュアル (案)⁹⁾ に依った。同マニュアル案では、家屋近傍地盤 (家屋の基礎から振動源方向に 1 m 点) および家屋内において、3 方向の振動加速度時刻歴を同時計測 (データ収集) することを推奨している。家屋内の測定点においては、家屋基礎 (玄関のたたきなど) のほか、居住空間 (居間、食堂、寝室などのフローリングのような硬い床面) を対象として、2 点以上の測定点を設けるとしている。その選定方法は、「居住者が日常生活を営む上で、振動によって最も迷惑を受けているところあるいは振動を最も不快に感じているところ

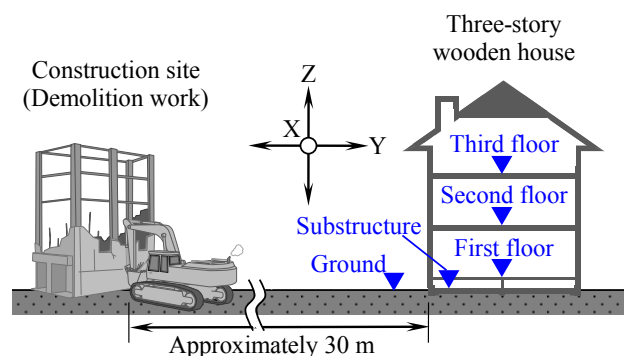


Fig. 4. Measurement point arrangement in three-story wooden detached house near construction site doing demolition work.

に測定点 A を設ける。2 階建て以上の家屋では、測定点 A と異なる階において、最も迷惑を受けているあるいは振動を最も不快に感じているところに測定点 B を設置する。」としている。家屋内での振動計測では、振動ピックアップを設置する場合に、床組みなどの詳しい情報が必要になるほか、家屋の構造に関する専門的な予備知識が必要となる場合が多い。しかし、居住者の振動暴露実態を把握するためには、マニュアル案のように居住者の申告により測定点を選定する方法が最適であるとしている。また、家屋近傍地盤および家屋内での振動を同時計測（秒単位で同期しているデータ収録）すれば、無人計測においても、発生した振動が居住者の歩行などによる内部振動なのか、外部からの振動によるものかを判別することも容易であり、居住者の振動暴露実態を正確に把握できる。地盤の測定点は、家屋の基礎から解体工事現場方向に 1 m 点の家屋近傍地盤（玄関前のアスファルト舗装面）とし、家屋基礎（玄関のたたき）および各階の床面（木製フローリング面）に合計 5 点の測定点を配した。また、家屋の中心から解体作業現場方向に近い家屋の水平軸を Y 方向、Y 方向に垂直な水平方向を X 方向、鉛直方向を Z 方向とした。なお、解体工事現場と家屋の基礎までの距離は、約 30 m であった。

計測では、まず 1 時間に亘り、有人にて 3 方向振動加速度時刻歴の連続収録を行い、その間、2 階の居間でテレビを視聴していた居住者が振動を感じたと申告した時の各測定点での最大加速度を算出した。それをもとに、本実施例では家屋近傍地盤での鉛直方向振動加速度において、 0.3 cm/s^2 を閾値として、振動計測装置に組み込まれたデータレコーダのトリガモードを使用することにより、居住者が感じる振動をもれなく収録できると考えた。具体的に

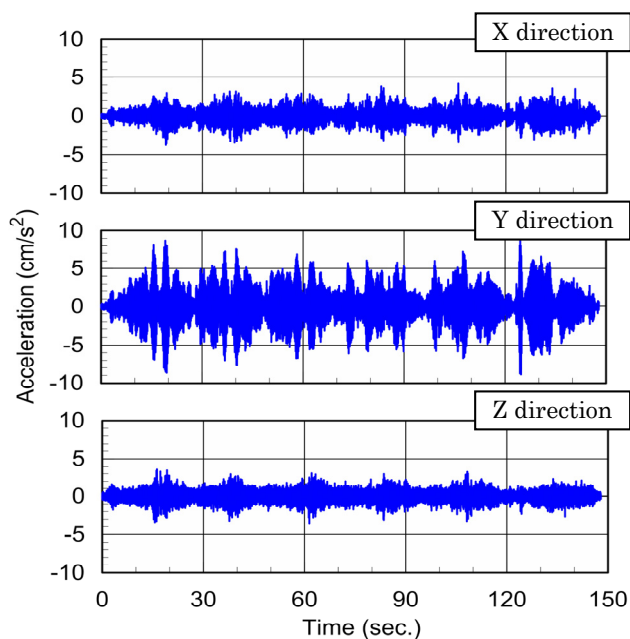


Fig. 5. Tri-axial acceleration waveforms recorded on third floor in three-story wooden house near construction site performing demolition work.

は、家屋近傍地盤に設置した振動計測装置のトリガイベントが発生し、データ収録を開始すると同時に、制御用 PC から自動的に家屋内の全測定点においてデータ収録を開始するように制御ソフトウェアを設定した。また、データ収録時間は 5 秒間のプリトリガによる 5 分間とした。トリガ計測時は、計測対象家屋から約 15 km 離れた研究室に置かれた遠隔操作用 PC により、VPN 経由で各振動計測装置におけるデータ収集状況および解体工事の作業状況を監視した。研究室では、トリガイベントが発生し、振動計測装置にデータファイルが作成される度に、制御用 PC を介して遠隔操作用 PC へのファイル転送を行い、随時データ分析を行った。

図 5 に 3 階床における並進 3 方向振動加速度時刻歴（サンプリング周波数 1200 Hz）の一例を示す。これらの振動は、全ての測定点の X、Y および Z 方向において最大の振動加速度を計測した時のものであり、油圧クラッシャーを

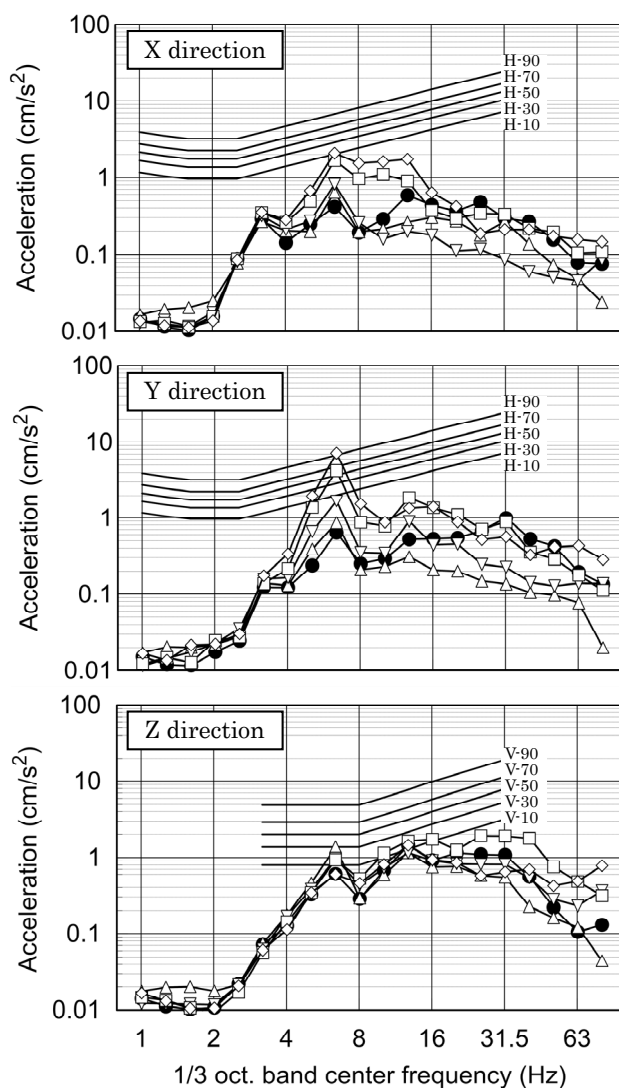


Fig. 6. 1/3 octave band frequency characteristics of the tri-axial acceleration measured in three-story wooden house near construction site performing demolition work; ●: Ground; △: Substructure; ▽: first floor; □: second floor; ◇: third floor.

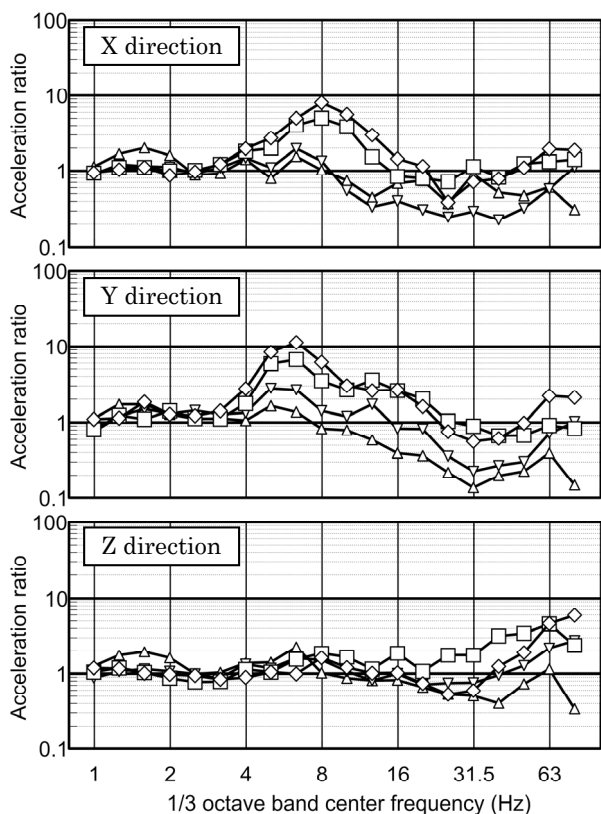


Fig. 7. 1/3 octave band vibration amplifications of three-story wooden house; △: Substructure; ▽: first floor; □: second floor; ◇: third floor.

取り付けたパワーショベルによる小規模鉄骨造建屋の外壁破砕作業時に3階床において収録された振動である(IPカメラの画像記録より確認)。3階床では、Y方向(家屋から解体工事現場へ向けた水平方向)が卓越して大きく振動しており、X方向およびZ方向よりも2から3倍の加速度振幅が計測されている。また、約150秒間に多数の衝撃的な振動が計測されていることがわかる。

図6は、図5に示した振動加速度時刻歴および同時刻に収録された各測定点での振動加速度時刻歴をもとに、建築物の振動に関する居住性能評価指針⁴⁾に沿った分析方法による1/3オクターブバンド振動加速度(ゼロピーク値)を家屋の振動方向(軸)別に記載したものである。図中の評価曲線(H-10からH-90およびV-10からV-90)は、振動の知覚確率(%)を示している。これらの結果からも、Y方向の3階床は、他の方向よりも大きく振動していることがわかる。特に6.3 Hzでは、H-90(90%程度のひとが揺れとして感じる振動の大きさ)を超えている。計測終了直後に、居住者に対して当時の状況に関するヒアリングをした結果では、「2階の居間できしみ音とともに横揺れを感じた。あのような揺れが続くのであれば、工事を中止してもらいたい。」との反応があった。

図7は、図6をもとに算出した家屋近傍地盤と家屋内の測定点の振動加速度比(家屋による振動増幅特性)である。2階床および3階床において水平方向のXでは8 Hz、Y

では6.3 Hzを頂点とする共振曲線が見られる。3階床のX方向では8倍、Y方向では10倍を超える振動増幅が伺える。これらの振動増幅は、家屋固有の共振現象によるものと考えられる。また、図6に示した家屋近傍地盤における振動がH-10およびV-10以下の振動加速度であるにもかかわらず、3階床での振動がH-90を超える結果となった要因として、このような家屋による振動増幅が大きく影響していることがわかる。

4. おわりに

一般に広く普及している情報技術(IT)と振動計測装置を組み合わせることで、無線振動計測システムを構築し、建物内外における振動計測の簡便化、効率化を図れることを示した。また、稀に発生する振動や早朝または深夜に発生する振動を計測するための長時間あるいは無人計測において、居住者の日常生活に支障をきたすことなく、建物内での振動暴露実態を把握できる計測システムが構築できた。それに加えて、並進3方向の振動加速度時刻歴を収録(データ収集)することにより、建築物の振動に関する居住性能評価指針による評価のみならず、国際規格に規定されている振動評価量などを算出することもでき、今後、振動による不快感などを評価する上で有用なデータを容易に、また、効率よく蓄積することが可能となったと考える。

最後に、本報告は環境省地球環境保全等試験研究費による「外部振動源による家屋内環境振動の人体感覚評価・予測に関する研究」において実施されたものであり、関係各位ならびにリオン株式会社に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 大竹ほか：新幹線軌道近傍に建設された住宅の振動対策，日本建築学会大会学術講義集，pp.319-320，2001.9.
- 2) ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements.
- 3) ISO 2631-2:2003, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).
- 4) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説，2004.
- 5) Y. Hirao et al. Development of wireless measurement system for ground-borne vibration in buildings and measurements for vibration amplifications of detached houses, InterNoise Proc. 232, pp.1229-1237, 2011.9
- 6) 平尾ほか：振動測定マニュアル(案)に基づいた測定・分析事例，日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集，p.95-98，2012.4.
- 7) P. W. Arnberg et al. Sleep disturbances caused by vibrations from heavy road traffic, J. Acoust. Soc. Am., 88(1990), pp.1486-1493.
- 8) 4ch データレコーダ DA-20 取扱説明書，リオン株式会社
- 9) 日本騒音制御工学会：平成20年度振動評価手法及び規制手法等検討調査報告書，平成21年3月。

*1 財団法人 小林理学研究所 研究員 博士(工学)

*2 独立行政法人 産業技術総合研究所 主任研究員 工博

*3 東京都市大学建築学科 教授 工博