

加速度ロガーを用いた建築構造物のリアルタイムモニタリングに関する基礎的研究

○梁 琪*¹ 谷 明勲*²
山邊 友一郎*³

キーワード：リアルタイム 構造性能モニタリング 加速度ロガー

1. はじめに

日本は地震国であり、地震発生直後に実施される建築構造物の応急危険度判定や、構造物継続使用の可否を検討する被災度区分判定¹⁾を迅速に行う必要がある。また、地球温暖化の観点(CO₂削減)から、建築構造物の長期使用に向けた構造特性のライフサイクルの各時点における構造性能の的確な把握が必要となる。近年、建築構造物の構造性能モニタリングに関しても、センサネットワークや RFID を用いた研究^{2)~5)}が行われている。これらの研究では、加速度センサやひずみゲージ等を用いて、地震時の構造損傷の同定や計測精度の検証が行われている。

しかし、現状では、コストパフォーマンスや簡便な使用が難しい等の原因で、構造性能モニタリングは一般建築物に普及するには至っていない。そこで、著者らは、簡便で安価なセンサを用いた使用上の簡便性とコストパフォーマンスに優れた建築構造性能モニタリングシステムの開発を目指し、安価な加速度ロガーを用いた基礎的な振動実験を行い、その計測精度の検証と建築性能モニタリングへの適用性に関する検討⁶⁾を行った。

既往の研究⁶⁾では、一方向にラーメン変形する1層供試体を対象とした振動台実験を通じ、一般的に用いられている加速度センサに代わるセンサとして、市販されている小型加速度ロガーの計測精度の検証を行った。実験より、用いた加速度ロガーは、一般の MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)加速度センサとほぼ同様の精度を有し、適切な遮断周波数を設定すれば、建築構造性能モニタリングに適用可能な精度を有することがわかった。したがって、本研究では、構造モニタリングを実際の建築構造物への適用性を検討するために、加速度ロガーを実際の建築物に設置し、リアルタイムで加速度を計測し、周波数解析による固有周期の同定により地震後の構造性能を判定し、高いコストパフォーマンスを有し、簡便に扱える性能モニタリングシステムの構築を目的とする。

本報では、まず、先行実験と用いる加速度ロガーの概要について述べる。次に、実際の建築構造物に適用するシステム構築を最終的な目標とした上で、リアルタイムモニタリング可能な試作システムを用いた基礎的実証実験を行い、特に、試作システムのデータ計測および通信精度の検

討を行う。

2. 実験システムの概要

2.1 加速度ロガーの概要⁷⁾

本研究で用いる加速度ロガーは、人や物の動き、傾き、振動等の分析を行うために開発された小型で軽量の加速度ロガーである。その外観と内部基板写真を図 2.1 に示す。

また、図 2.1 に示すように、加速度ロガーは、17 mm×30 mm×10 mm のサイズと 4g の重さで、加速度センサ、フラッシュメモリ、RTC(水晶時計)、CPU、電池が搭載されており、加速度ロガーを USB ケーブルで PC と接続すると、外部電源供給、リアルタイムモニタリング、測定の各種設定や記録したデータのダウンロードなどができる。加速度ロガーの各電子部品は、計測指令が入力されるまで待機モードに入り、データはフラッシュメモリに記録されるため、電源が切れても失われない。また、MEMS 技術で精度と量産性が確保され、安価に複数の加速度ロガー配置による詳細の計測も可能である。

表 2.1、2.2 に加速度ロガーの性能仕様を示す。

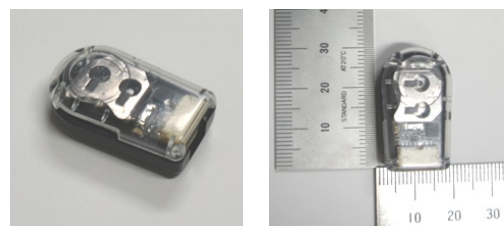


図 2.1 加速度ロガーの外観と内部基板写真

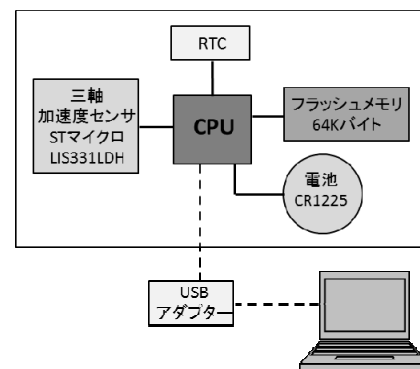


図 2.2 加速度ロガーのシステム構成の概要

表 2.1 加速度ロガーの性能仕様

通信方式	電源	ケース寸法	重量
USB	USB/CR1225	17x30x 10mm	4 g

表 2.2 加速度ロガーの性能仕様 (続き)

加速度センサ	測定データ	測定範囲	サンプリング周波数
STMicro LIS331LDH	X, Y, Z 三軸 (16bit)	±2g /±4g ^{*1}	100Hz~ ^{*2}
*1: 測定範囲の切り替え可能			
*2: 選択設定可能			

また、加速度ロガーは以下のような機能がある。

- ・加速度リアルタイムモニター機能
- ・測定開始トリガー機能 (時間指定、開始遅延、開始予約)
- ・デシメーションデジタルフィルタ機能 (ローパスフィルタ: 50Hz, 100Hz, 400Hz, 1000Hz 切替)
- ・内部 FFT 機能

2.2 実装実験の概要

本研究の実証実験は神戸大学自然科学研究棟 3 号館(図 2.3)を対象とする。対象建物は、地下 2 階、地上 8 階建ての SRC 建物である。図 2.4 に一般階平面図の概要を示す。

用いる加速度ロガーは安価のため、多数に配置するのが可能であるが、本研究では 1 箇所に加速度ロガーを設置してリアルタイムモニタリングを行う。図 2.4 に示す位置に、加速度ロガーを設置し、接着テープにより床スラブ上に固定する。検討の際、図 2.4 のように水平 2 方向 (x, y) 及び鉛直方向 (z) の加速度を計測する。ワイヤレス通信システムが加速度ロガーに導入されれば、将来的には、図 2.5 に示すように、無線通信装置によりリアルタイムで計測されたデータを収集する事も可能となり、加速度ロガーの位置変更も容易になると考えられる。

2.3 先行実験の概要

本研究の先行実験では、加速度ロガーによるリアルタイム計測の有効性を検証するために、施設の利用者の少ない対象建物の 7 階北東方向の床 (緑の星) に加速度ロガーを設置し、加速度応答のリアルタイム計測を行った。加速度ロガーは USB コードを介して PC と接続し、HDD に振動波形を常時に 24 時間連続記録した。先行実験の様子を図 2.6 に示す。なお、計測データはサンプリング時間 0.01s で収録した。また、計測原点は実験開始から最初 5 秒のデータ(500 個)を平均して求めた。

3. 実験結果

3.1 計測された加速度

今回の先行実験では、計測期間に加速度ロガーで計測で



図 2.3 対象建物の写真

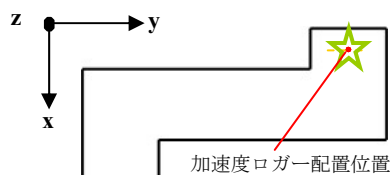


図 2.4 一般階平面図の概要



図 2.5 加速度ロガー配置とデータ通信の概要



図 2.6 先行実験の写真

きる地震が発生しなかった。このため、本報では、加速度ロガーにより計測された微振動の加速度応答を示す。図 3.1、3.2 に示す計測振動波形は、HDD に 24 時間連続記録したもから抽出した結果である。ただし、図 3.1 にある日の午後 2 時頃の x, y, z 方向の計測結果の一部 (10 秒間) を、図 3.2 に同日の午後 11 時頃の x, y, z 方向の計測結果の一部 (10 秒間) をそれぞれ示す。

計測結果より、計測時間帯にかかわらず、x, y 方向の加

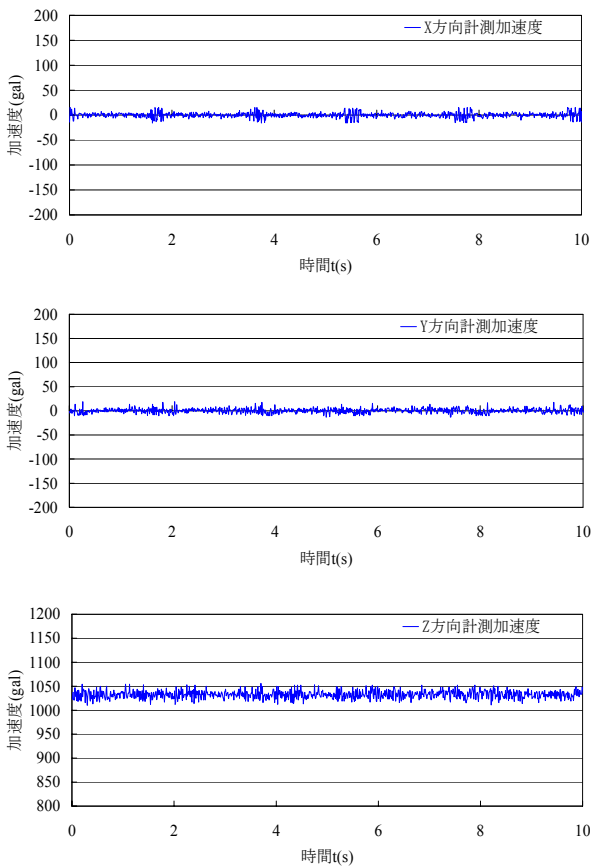


図 3.1 計測された加速度（午後 2 時頃）

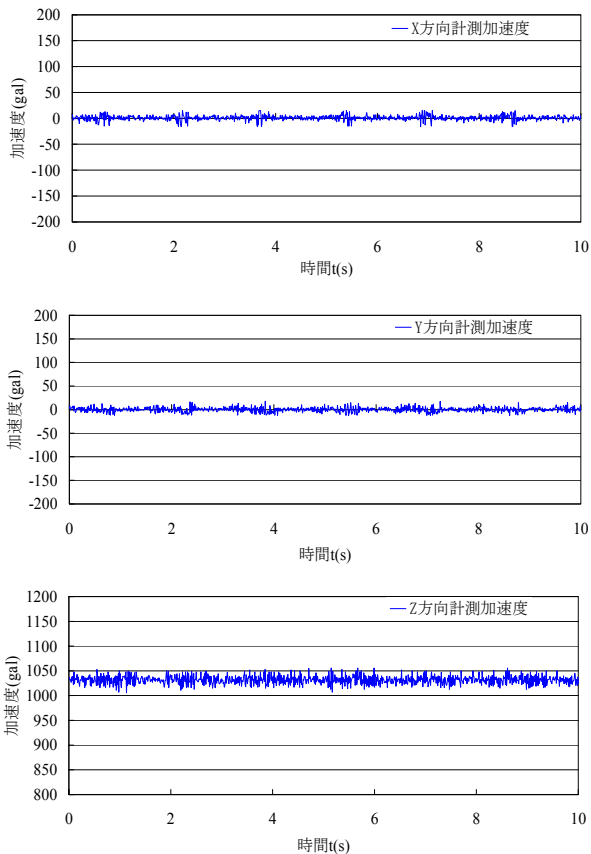


図 3.2 計測された加速度（午後 11 時頃）

速度応答データは、約±15gal の範囲内に変化し、z 方向の加速度応答データは、約 1000~1050 gal (重力加速度を含む) の範囲内に変化した。異なる計測時間帯の施設の利用が計測に及ぼす影響はほぼ見られなかったと考えられる。

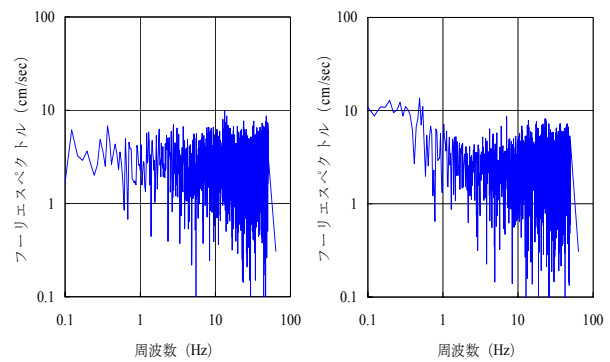
図 3.1 と図 3.2 の x 方向加速度応答データにより、ほぼ一定の時間間隔（約 2 秒）で、周期的な振動波形が観測された。この現象の原因については、風などの外乱による微小な振動等が考えられるが、今後検討を行う必要がある。

3.2 FFT 解析による固有周期の算定

既往の研究⁷⁾により、加速度応答データを用いて周波数解析を行うことで、フーリエスペクトルから固有周期を同定することができる。周波数解析手法には、高速フーリエ変換（FFT 解析）を用いた。

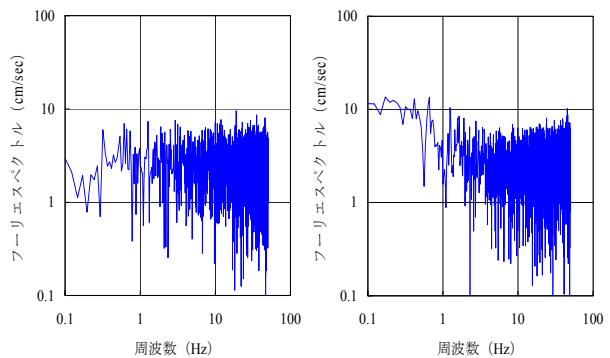
本研究で開発している構造ヘルスマonitoringシステムは、対象建物の固有周期を同定することにより構造耐震性能の判定を行う事を想定している。このため、先に示したリアルタイム計測実験によって得られた微振動の計測データを FFT 解析し、固有周期を求めることを試みた。午後 2 時頃と午後 11 時の x、y 方向の加速度応答データにより FFT 解析結果を、図 3.3(a)(b)と図 3.4(a)(b)にそれぞれ示す。

これらの結果より、計測方向と計測時間帯にかかわらず、各フーリエスペクトルから構造物の卓越周波数を求める



(a) x 方向 (b) y 方向

図 3.3 FFT 解析結果（午後 2 時頃の加速度応答データ）



(a) x 方向 (b) y 方向

図 3.4 FFT 解析結果 (午後 11 時頃の加速度応答データ) ことはできなかった。固有周期同定が可能となる加速度レベルについては、今後、地震動が計測できた段階で、検討を行う予定である。

4. まとめと今後の課題

本研究では、地震後の建物被災判定や常時の建築物の性能把握に構造モニタリングを幅広く普及させ、簡便かつ安価なセンサを用いた構造モニタリング技術を構築するための基礎的知見を得るために、小型加速度ロガーを用いた実構造物のリアルタイムモニタリングに関する基礎的実験を行い、本研究で用いた小型加速度ロガーのリアルタイム計測特性や周波数解析による固有周期の同定、リアルタイム計測への適用性について検討を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 計測時間帯にかかわらず、x、y 方向と z 方向の加速度応答データは、約±15gal と約 1000~1050 gal (重力加速度を含む) の範囲に変化し、部屋の利用による計測結果への影響は見られず、地震時の計測も可能であると考えられる。
- 2) 対象建物の桁方向 (x 方向) に、約 2 秒間隔で、周期的な振動波形が観測された。これは、風などの外乱による微小な振動等の原因が考えられる、今後さらに検討を行う必要がある。
- 3) 今回計測された微小な振動では、フーリエスペクト図の卓越周波数が不明瞭であったため、固有周期を正確に把握することができなかった。このため、固有周期同定が可能となる加速度レベルについては、今後、地震動が計測できた段階で、検討を行う必要がある。
- 4) 今回の先行実験で、加速度ロガーは USB コードを介して PC に接続することにより、リアルタイム計測を行ったが、本システム、実構造物の応答加速度のリアルタイムモニタリングに適用可能であることが明らかとなった。

今後の課題としては、以下の検討が必要と考える。

- 1) 地震動の計測結果を用いて、加速度ロガーのリアルタイム計測特性を検証する。今回の先行実験で、地震が発生しなかったため、実際の地震動による対象建物の揺れを計測し、加速度ロガーの有効性をさらに検証する必要がある。
- 2) 用いる加速度ロガーは低コストで多数配置できるが、構造特性の変化を把握するために必要となる設置位置の検討を行うことが必要となる。また、寸法や重さが小さいため、実構造物への設置方法も併せて検討する必要がある。
- 3) 開発しているモニタリングシステムの簡便性を実現するためには、無線通信装置の開発が必要不可欠である。無線で通信すれば、加速度ロガーを自由に設置で

き、煩雑な配線工事も抑えられる。

- 4) 固有周期の同定による構造耐震性能判定システムを構築する。加速度ロガーの計測精度を考慮して、周波数解析による固有周期の同定から、建物構造の劣化や残存耐震性能との関係を明らかにし、信頼性の高い判定システムを開発することも必要となる。
- 5) 開発しているシステムを用い、本格的な実証実験を行う。本研究で示したモニタリングシステムを用いたリアルタイム計測を行い、対象建物構造の劣化や残存耐震性能を判定する。その結果により、開発している構造モニタリングシステムの有効性を明らかにする必要がある。

[参考文献]

- 1) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2005. 12.
- 2) 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣: センサ付き無線 IC タグ応用のユビキタス建築構造ヘルスマニタリング構想—加速度センサ実験に基づく応用システムの構築—, 日本建築学会総合論文誌, No4, pp. 111-116, 2006. 2.
- 3) 飯場正紀, 阿部秋男, 花井勉, 皆川隆之: 低コスト・小型地震計の性能確認と戸建て住宅の地震時挙動観測への適用, 日本地震工学会論文集, 第 7 巻, 第 2 号 (特集号: 震度計と強震計データの利活用), pp. 57-67, 2007. 3.
- 4) 圓幸史朗, 池ヶ谷靖, 中村充, 柳瀬高仁: スマートセンサと無線ネットワークを用いた構造ヘルスマニタリングシステムの開発, 日本地震工学会論文集, 第 7 巻, 第 6 号, pp. 17-30, 2007. 11.
- 5) 倉田成人, 鈴木誠, 猿渡俊介, 森川博之: ユビキタス構造モニタリングシステムの実建物での実証実験, 日本建築学会学術講演梗概集, A-2, pp. 495-496, 2008. 7.
- 6) 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎: 小型加速度ロガーを用いた建築構造性能モニタリングに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp. 103-104, 2012. 9.
- 7) 加速度ロガー Accstick4 のデータシート
<http://syscom-corp.jp/pdf/sensor/hygrothermal/AccStick4.pdf> (参照: 2012. 10. 12)
- 8) 宇賀治元樹, 谷明勲, 山邊友一郎: センサ付き RFID を用いた建築構造性能モニタリングシステムに関する研究, —その 3 周波数解析による構造性能モニタリング—, 日本建築学会第 31 回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 報告, pp. 207-210, 2008. 12.

-
- *1 神戸大学大学院工学研究科 大学院生 修士(工学)
 - *2 神戸大学大学院工学研究科 教授 博士(工学)
 - *3 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)