

# ワンボードマイコンを用いた建築構造物の性能モニタリングに関する 基礎的研究

—GR-SAKURA を用いた検討—

○梁 琪\*<sup>1</sup> 谷 明勲\*<sup>2</sup>  
山邊 友一郎\*<sup>3</sup>

キーワード：ワンボードマイコン 構造性能モニタリング 加速度センサ

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の広範囲に大きな被害が発生し、建築構造物の応急被災判定や被害調査に多くの人手や時間を要した。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<sup>1)</sup>や、継続使用の可否を検討する被災度区分判定被害同定を迅速に行う必要がある。このため、被災建物の損傷を短時間で容易に検出する建築構造性能モニタリングに関する種々の研究<sup>2)~5)</sup>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。また、近年、情報通信技術(ICT)の発展に伴い、建築構造物の性能モニタリングに関する研究が、計画・構造・環境の各分野で活発に行われている<sup>6)~8)</sup>。このような状況を踏まえ、筆者らは、低コストかつ容易に導入可能な構造性能モニタリングシステムを構築するために、小型MEMS加速度センサを用いて基礎的な研究を行い、その計測精度の検証と建築性能モニタリングに適用可能な精度を有することを明らかにした<sup>9)</sup>。

筆者らは、既往の研究に引き続き、一般的に用いられているデータロガーに代わる計測データを送信・収集するシステムとして、安価かつ入手しやすいワンボードマイコンの建築性能モニタリングへの適用性に関する検討を行なっている。また、2005年に開発されたArduinoは、安価なハードウェア及びオープンソースかつシンプルな開発環境を有し、近年、様々な分野に活用されている。したがって、本研究では、Arduino互換ボードの一つであるGR-SAKURAを用い、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、前述の小型MEMS加速度センサと

GR-SAKURAからなるモニタリング可能な試作システムを用いた基礎的振動台実験を行い、データロガーによる収集したデータとの比較で、試作システムのデータ計測および通信特性の検討を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 GR-SAKURA<sup>10)</sup>

本研究で用いるワンボードマイコンGR-SAKURAは、マイコンと入出力ポートを備えた基板から構成されるシステムである。Arduinoと互換性があるため、xBee無線通信などの拡張基板を活用できるうえ、さらに約10倍の性能のCPUを搭載し、より高性能なシステムも作成できる。また、新たなクラウドベース開発環境を用いることにより、パソコンやAndroid端末に、プログラムの開発、コンパイルや実行をすることが簡単にできる。

図1にGR-SAKURAの写真を示し、その概要を表1、2に示す。

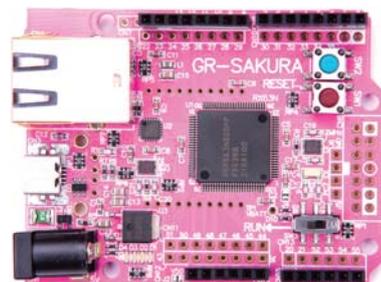


図1 GR-SAKURAの基板写真

表1 GR-SAKURAの性能仕様

CPU	RAM	A/D変換	供給電力
32bit	1Mbyte	12bit	5V

表2 GR-SAKURAの性能仕様(続き)

開発環境	カードスロット	通信方式
PC/Android端末	Micro SD	USB/Ether Net

### 2.2 加速度センサ

本研究では、小型MEMS三軸加速度センサを用い、加速度を計測する。ただし、データ収集用のデータロガーとGR-SAKURAの供給電圧は異なるため、そ

れぞれを対応する2種類の加速度センサ A と B を使用する。加速度センサ A と B の写真を図2に示し、主な性能仕様をそれぞれ表3,4に示す。



(a) 加速度センサ A (b) 加速度センサ B  
図2 加速度センサモジュール

表3 加速度センサ A (KXM52-1050)の仕様

供給電力 (DC/V)	検出範囲 (g)	検出感度 (mV/g)	ノイズ ( $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
5	$\pm 2$	1000	35

表4 加速度センサ B (MMA7361LC)の仕様

供給電力 (DC/V)	検出範囲 (g)	検出感度 (mV/g)	ノイズ ( $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
3.3	$\pm 1.5$	800	350

### 2.3 供試体

本研究では、天版、基礎とアルミニウム製柱で構成され、一方向のみにラーメン変形する3層供試体を用いる。各層柱の内法高さは250mmとし、天版には200mm×300mm×2mmの鉄板を用い、柱には断面寸法20mm×250mm×2mmのアルミニウム板を用いた。供試体の寸法を図3に示す。なお、各層の天板上には、約4600gの重量を付加して実験を行った。

### 2.4 実験システム

実験システムの概要と写真をそれぞれ図4, 5に示す。加速度センサ A と B は、供試体天版に設置し、加速度時刻歴応答を計測した。加速度センサ A は、8ch の独立 16bitA/D 変換器を有するデータロガー GL900 と接続し、計測データを収集した。一方、加速度センサ B は GR-SAKURA により、パソコンで計測データをモニタリング・収集した。また、データロガーによる収集したデータを比較するために、加速度センサ B の場合には、RTC と接続しデータを時刻同期して収集した。

本研究では、GR-SAKURA の性能を検証するために、0.01s と 0.02s の2種類のサンプリング間隔で実験を行った。また、入力地震波は、JMA Kobe NS(1995), Taft EW(1952), Hachinohe NS(1964), El Centro NS(1940)の4波を用いた。

## 3. 実験結果

図6~13に地震波ごと絶対加速度応答時刻歴の比較を示す。赤線は加速度センサ B と GR-SAKURA による計測結果であり、青線は加速度センサ A とデータロガーによる結果である。

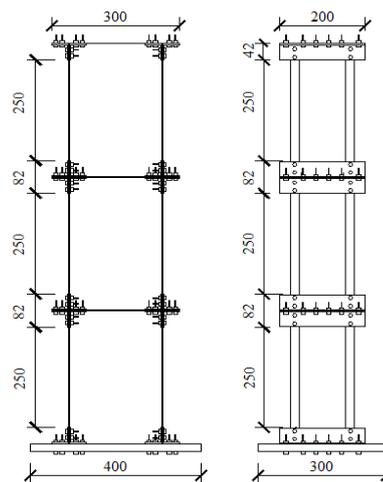


図3 供試体の寸法(単位: mm)

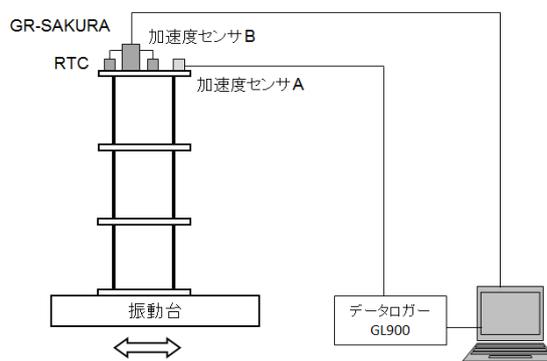


図4 実験システムの概要

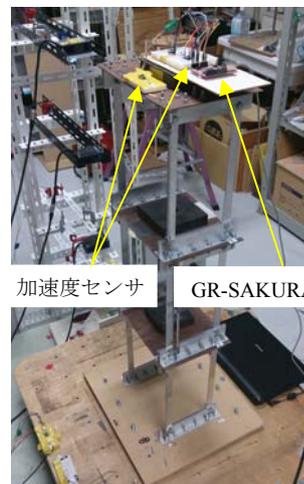


図5 実験システム写真

また、以下の式(1)で求めた地震波ごと加速度センサ A と加速度センサ B に対するそれぞれの計測誤差の一覧を表5に示す。式(1)中、 $L_A$ : 加速度センサ A による最大・最小加速度応答、 $L_B$ : 加速度センサ B による最大・最小加速度応答である。

$$Error(\%) = \frac{L_A - L_B}{L_A} \quad (1)$$

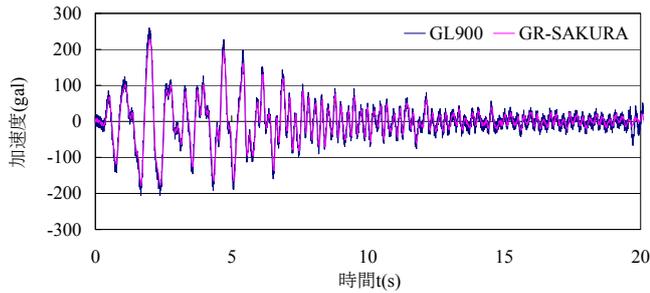


図 6 Kobe 波 (サンプリング 0.01s)

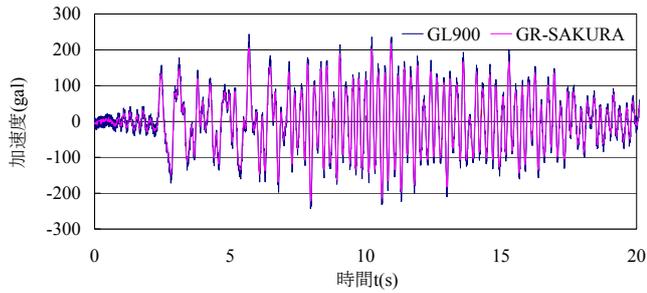


図 7 Taft 波 (サンプリング 0.01s)

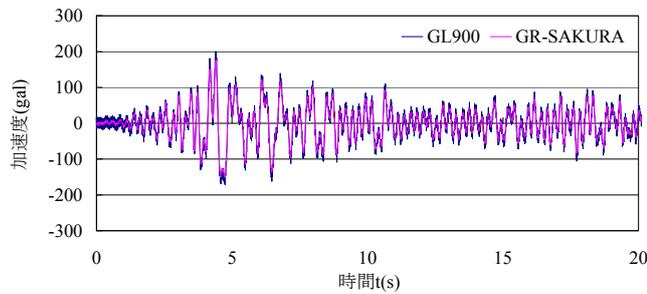


図 8 Hachinohe 波 (サンプリング 0.01s)

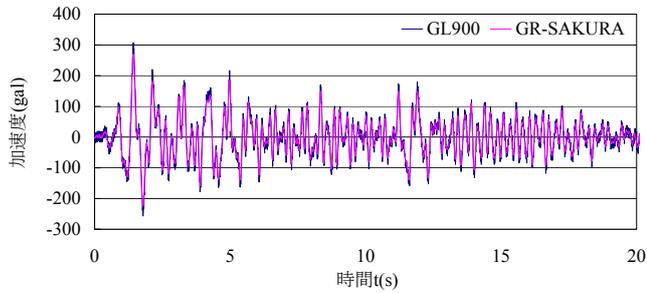


図 9 El Centro 波 (サンプリング 0.01s)

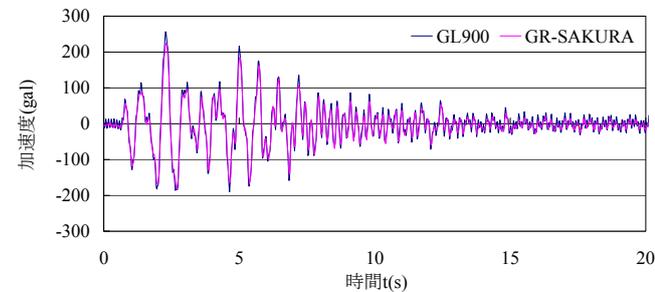


図 10 Kobe 波 (サンプリング 0.02s)

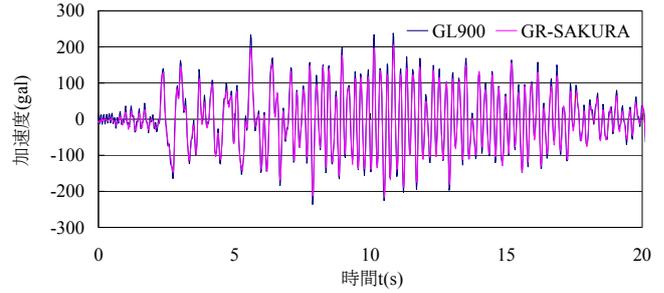


図 11 Taft 波 (サンプリング 0.02s)

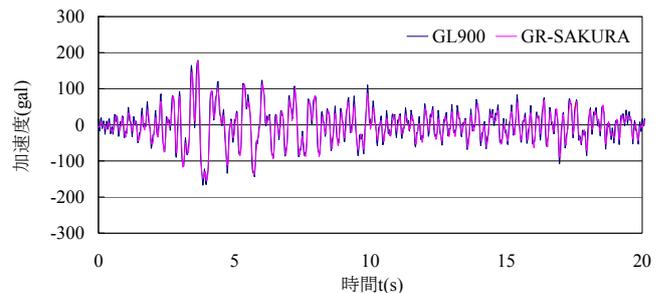


図 12 Hachinohe 波 (サンプリング 0.02s)

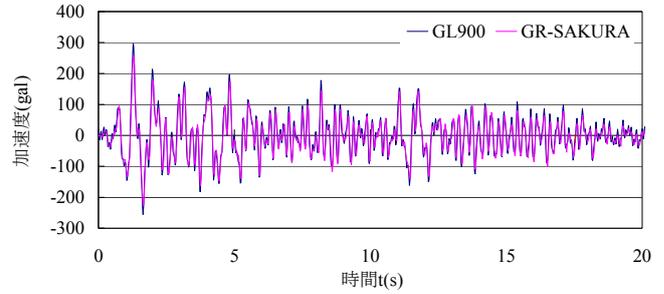


図 13 El Centro 波 (サンプリング 0.02s)

#### 4. 考察

GR-SAKURA による試作システムは、加速度応答を計測・通信した際に、GR-SAKURA の A/D 変換や通信などの処理により、データの送信失敗、読み飛ばすことがなく、データの遅れが見られず、試作システムの通信に問題がないと確認された。計測されたデータもパソコンの画面でリアルタイムモニタリングできた。

すべての図からわかるように、GR-SAKURA による計測結果と GL900 による計測結果を比べると、位相のずれが極めて小さく、ほぼ同じ位相特性を有する時刻歴波形が計測されている。また、用いた 2 種類のサンプリング間隔は、計測結果の位相に影響がなかったと考えられている。

一方、全ての結果において、GR-SAKURA により計測された加速度は GL900 のものと比べ、振幅が若干小さい傾向が見られる。また、異なるサンプリング間隔で計測された振幅の誤差を表 5 にまとめて示す。Hachinohe 波の結果以外、異なるサンプリング間隔で計測された結果はほぼ同程度の誤差となった。

このため、2種類のサンプリング間隔は、計測結果の振幅に対する影響はほぼ同じと考えられる。振幅が小さくなる原因は、加速度センサの計測性能の違いだと考える。

表5 計測誤差の一覧

	誤差%	Kobe	Taft	Hachinohe	ElCentro
0.01s	MAX	12.18	10.44	12.18	12.31
	MIN	13.72	8.82	11.82	12.90
0.02s	MAX	12.68	13.74	1.04	13.28
	MIN	4.05	8.54	7.46	12.43

## 5. まとめ

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及び情報通信技術を用いたモニタリングシステムを構築するために、振動台実験でワンボードマイコン GR-SAKURA のモニタリング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) GR-SAKURA による試作システムは、加速度応答を計測・通信した際に、データロガーと同様に、データ送信の失敗やミスなどの問題がなく、十分な CPU、メモリ及び A/D 変換の性能を有することが確認された。また、計測結果もパソコンに表示されるので、試作システムはリアルタイムモニタリングとしても利用できる。
- 2) GR-SAKURA による計測結果の位相と GL900 による計測結果を比べると、ずれがほぼなく、同等な位相特性を有する時刻歴波形が得られた。また、異なるサンプリング間隔は、計測結果の位相に影響がなかったと考えられる。
- 3) GR-SAKURA による計測結果の振幅は GL900 による計測結果より、若干小さな結果となった。サンプリング間隔が異なっても、その誤差がほぼ一致している。誤差の原因は加速度センサの性能の違いだと考えられる。
- 4) 以上の結果より、安価かつ簡便な GR-SAKURA 試作システムは、データロガーとほぼ同等な性能を有し、構造性能モニタリングに適用可能であることが明らかにした。

今後の課題としては、以下の検討が必要である。

- 1) より短いサンプリング間隔及び多数のセンサを同時に計測することにより、GR-SAKURA 試作システムの性能限界をさらに検討する。
- 2) 振動台実験を行い、GR-SAKURA 試作システムによる計測された変位応答及び周期同定の精度を検討する。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興財団科学研究費補助金基盤研究(C)：課題番号 23510201 の援助の下に行われた。

## 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) 日本建築学会 情報システム委員会：ユビキタス技術で実現する性能モニタリングの展望，2007年度日本建築学会大会(九州) 情報システム部門研究協議会資料，2007.8.
- 7) 日本建築学会 情報システム委員会：スマートな情報通信技術で実現する建築性能モニタリングの未来像，2010年度日本建築学会大会(北陸) 情報システム部門研究協議会資料，2010.9.
- 8) 日本建築学会 情報システム委員会：東日本大震災から情報システム技術を考える—情報共有，復旧・復興からスマートシティまで—，2012年度日本建築学会大会(東海) 情報システム部門研究協議会資料，2012.9.
- 9) 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.
- 10) <http://japan.renesas.com/>

\*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)