

# OSHW を用いた建築構造的モニタリングシステムに関する研究 ー オープンソースハードウェアの計測性能の比較検討 ー

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

キーワード：オープンソースハードウェア，計測性能，加速度センサ

## 1. はじめに

日本は、世界でも有数の地震多発国である。1995年には、近代都市直下で発生した兵庫県南部地震により、大きな地震被害(阪神・淡路大震災)が生じた。また、2011年にはプレート境界で発生した東北地方太平洋沖地震により、振動被害に加えて、津波による大きな被害が生じた(東日本大震災)。このような大地震発生後は、余震による二次災害の防止を目的とした被災建物の応急危険度判定<sup>1)</sup>や、被災建物の被災度合いと残余耐震性能を判定する被災度区分判定<sup>2), 3)</sup>等が実施される。これらの判定は、主に目視調査によって行われるため、二次災害の危険性があり、判定に時間を要する場合<sup>4)</sup>も見られる。建築構造部材は、一般に、天井裏や仕上げ材で被覆されており、直接目視できない場合も多い。このため、近年のICTの急速な発展と各種センサの普及により、種々のセンサやデバイスを用いた建築構造的モニタリングに関する研究<sup>5)9)</sup>が行われている。しかし、現状では一般の建物まで普及する状況には至っていない。

近年、種々のオープンソースハードウェア(Open Source Hardware: 以下 OSHW)が開発<sup>10), 11)</sup>され、安価なセンサも利用可能な状況にあり、建築分野でも、種々のモニタリングに OSHW が利用されている<sup>12)-14)</sup>。しかし、OSHW のスペックは様々で、プログラミング環境も異なるため、その利用に際しては、各 OSHW の計測精度を検証し、その性能を把握する必要がある<sup>15)-17)</sup>。本研究では、代表的な OSHW である Arduino と、Arduino とピンコンパチブルな2種の OSHW を用いて加速度計測精度の検証を行う。ここでは、OSHW を加速度のデータロガーとして使用することを想定し、一定サンプリング間隔で加速度データをマイクロ SD カードに保存する実験を、小型振動台を用いて行う。また、OSHW により得られた加速度データの FFT 解析を行い、供試体の固有周期の同定精度についても検討を行う。得られた実験結果を基に、本実験で用いた OSHW の計測精度を明らかにし、その建築構造的モニタリングへの適用性についても検討を行う。

## 2. オープンソースハードウェア(OSHW)と加速度センサ

本研究では、OSHW として種々の分野で用いられている Arduino<sup>18)</sup>と、GR-SAKURA<sup>19)</sup>、FRDM25KL<sup>20)</sup>の3種の OSHW を用いる。表1に、各 OSHW のスペックを示す。

表1 使用する OSHW のスペック

	Arduino Uno R3	GR-SAKURA Full	mbed FRDM KL25Z
作動電圧	5V	3.3V	5V
MCU	ATmega328	RX63N	Freescale KL25Z
動作周波数	16MHz	96MHz	48MHz
データ用 Flash	32KB	32KB	128KB
SRAM	2KB	128KB	16KB
Interface	-	イーサネット対応	-
	USB ファンクション / ホスト機能	USB ファンクション / ホスト機能	USB ファンクション / ホスト機能
	-	Arduino Uno R3 Pin-compatible	Arduino Uno R3 Pin-compatible
	-	Micro SD	MMA8451 on-board
アナログ入力	6 (10bit)	16 (12bit)	6 (16bit)
OS	Arduino IDE	Cloud Web Compiler	mbed Online Compiler

GR-SAKURA, FRDM25KL は、Arduino とピンコンパチブルで、Arduino に接続可能な種々の拡張モジュール(シールド)を使用することができる。

また、これらの OSHW はアナログ I/O およびデジタル I/O を有しているが、ここでは接続や取り扱いが容易なアナログ型の加速度センサを使用する。表2に使用する加速度センサ A(MMA7361LC)<sup>21)</sup>と加速度センサ B(CXL17LF3)<sup>22)</sup>のスペックを示す。なお、加速度センサ CXL17LF3 は、各 OSHW の計測精度の比較を行うためのレファレンスとして 16 bit データロガー(GL-900)を用いた計測を併せて行う。

表2 加速度センサのスペック

加速度センサ A (MMA7361LC)			
供給電力(VDC)	検出範囲(G)	検出感度(mV/g)	ノイズ(mGrms)
3.3	±1.5	800	13.56
加速度センサ B (MMA7361LC)			
供給電力(VDC)	検出範囲(G)	検出感度(mV/g)	ノイズ(mGrms)
5	±1.7	1200	4

## 3. 実験概要

### 3.1 供試体

本研究では、図1に示す3層供試体の3層天版上に2種の加速度センサを設置し、3層天版上の絶対加速度の計測を行う。供試体は、天版(鋼板)、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。供

試体寸法は図 3 中に示すように、各層柱には 250(内法)×20×2 mm のアルミ板、天板には 200×300×2mm の鋼板を用いた。なお、供試体の各層天版上には約 4600g の重量を負荷している。図 2 に実験システムの写真を示す。なお、図 2 中には OSHW と加速度センサの接続に用いたスクリーシールドも併せて示す。

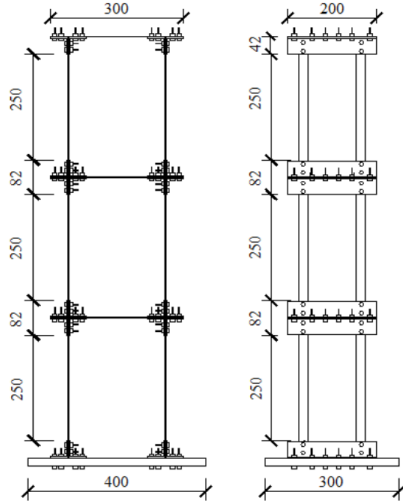


図 1 3層供試体

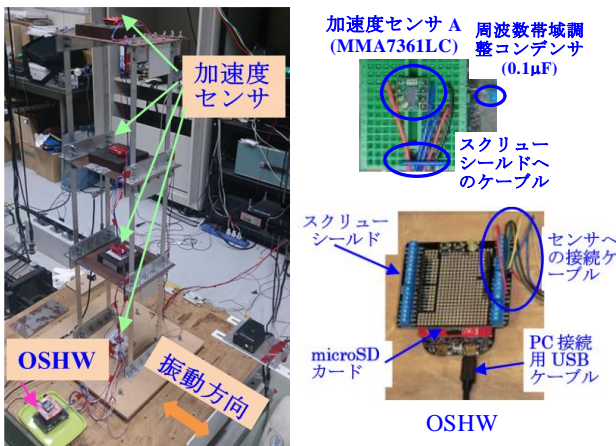


図 2 振動台実験システムの写真

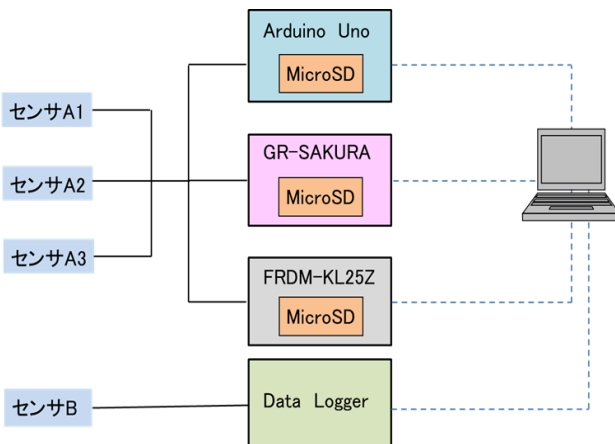


図 3 実験システム回路の概要図

### 3.2 実験システム

本実験では、加速度センサ A, B は供試体 3 層天版上に固定し、供試体 3 層天版上の絶対加速度を計測した。加速度センサ A は、図 2 中に示すブレッドボードからスクリーシールドを介して OSHW に、加速度センサ B はデータロガー(GL-900, 独立 8ch, 16bitA/D)に接続した。実験システム回路の概要図は図 3 に示す。実験システム回路の概要図は図 3 に示す。

図 4 に OSHW のシステムフローを示す。今回使用した OSHW では、使用できるライブラリが異なるため、タイマ割り込み等のライブラリは使用せず、いずれの OSHW でも使用できるマイクロ秒タイマを使用している。

加速度センサ B の計測間隔は 10ms で一定とした。また、OSHW では計測精度の検証を行うため 10ms, 20ms, 30ms の 3 種の計測間隔を設定し、60 秒間の計測を行った。なお、OSHW の 3 軸加速度の計測データは、オンボード(GR-SAKURA)または SD カードシールド(Arduino, FRDM25KL)を使用して、マイクロ SD カード(クラス 10, 16GB)に保存する。なお、本実験システムでは、OSHW とデータロガー(GL-900)が同期していないため、両者の最大値を同一時刻として重ねあわせを行う。

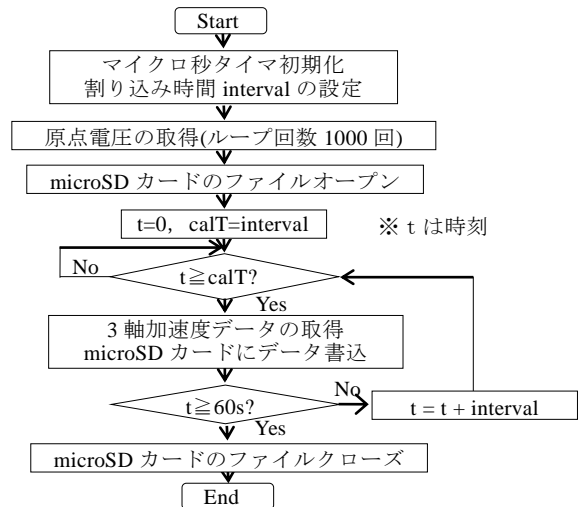


図 4 OSHW プログラムのフロー

さらに、OSHW は USB 接続したノート PC を介して起動させた。また、振動台への入力地震波としては、El Centro NS (1940), Taft EW (1952), Hachinohe NS (1964), JMA Kobe NS (1995) の 4 波を用いた。

### 4. 実験結果

実験結果として、3 種の OSHW で計測した絶対加速度とレファレンスで計測した絶対加速度の時刻歴の比較を、計測間隔 10ms(El Centro), 20ms(Taft), 30ms(Hachinohe) の場合をそれぞれ図 5~7, 図 8~10, 図 11~13 に示す。

また、表 3 に絶対加速度の最大値(Max), 最小値(Min) の計測誤差(Error)を式(1)で求めた結果を示す。

$$\text{Error} = \frac{|\text{OSHW の計測結果} - \text{レファレンスの計測結果}|}{|\text{レファレンスの計測結果}|} \times 100\% \quad (1)$$

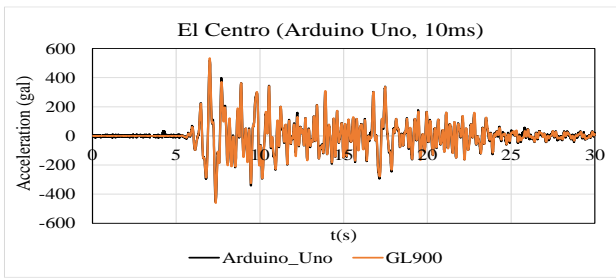


図 5 Arduino の計測結果(El Centro NS, 10ms)

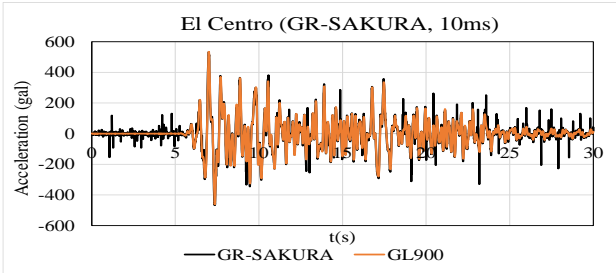


図 6 GR-SAKURA の計測結果(El Centro NS, 10ms)

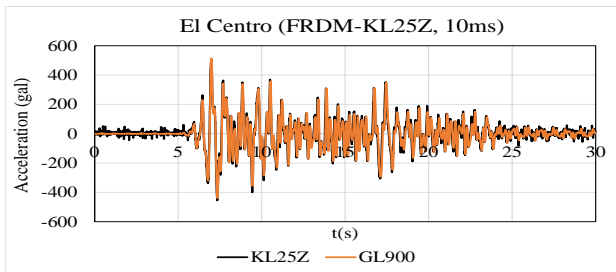


図 7 FRDM25KL の計測結果(El Centro NS, 10ms)

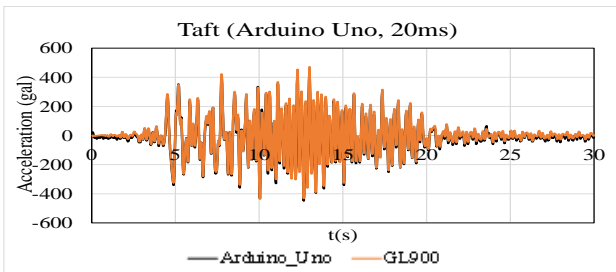


図 8 Arduino の計測結果(Taft EW, 20ms)

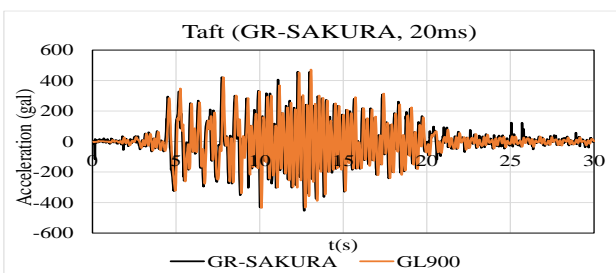


図 9 GR-SAKURA の計測結果(Taft EW, 20ms)

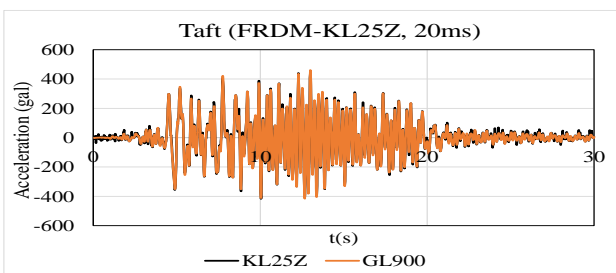


図 10 FRDM25KL の計測結果(Taft EW, 20ms)

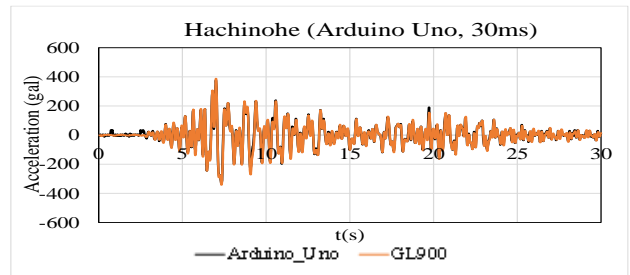


図 11 Arduino の計測結果(Hachinohe NS, 30ms)

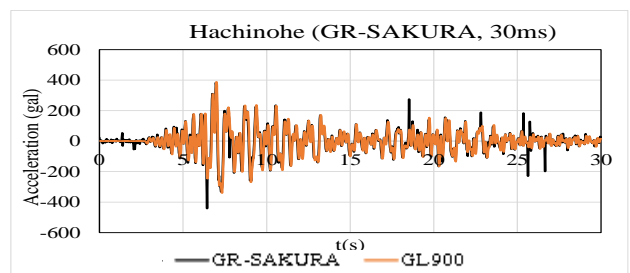


図 12 GR-SAKURA の計測結果(Hachinohe NS, 30ms)

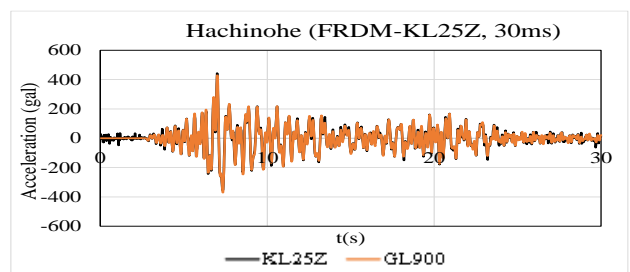


図 13 FRDM25KL の計測結果(Hachinohe NS, 30ms)

表 3 絶対加速度の最大値, 最小値の計測誤差

		計測間隔 10ms				平均誤差
		El Centro	Taft	Hachinohe	JMA Kobe	
Arduino Uno - GL900	Error_Max(%)	3.704	4.114	3.380	3.202	2.584
	Error_Min(%)	1.709	2.151	1.515	0.895	
GR-SAKURA - GL900	Error_Max(%)	0.277	3.438	2.233	2.239	2.197
	Error_Min(%)	1.244	4.199	1.034	2.913	
FRDM KL25Z - GL900	Error_Max(%)	2.727	1.529	3.751	0.456	4.515
	Error_Min(%)	3.456	5.189	6.117	12.898	
		計測間隔 20ms				平均誤差
		El Centro	Taft	Hachinohe	JMA Kobe	
Arduino Uno - GL900	Error_Max(%)	5.775	8.695	5.856	6.347	4.289
	Error_Min(%)	1.107	2.790	1.528	2.216	
GR-SAKURA - GL900	Error_Max(%)	0.200	3.139	1.893	0.864	8.179
	Error_Min(%)	1.572	4.197	47.063	6.500	
FRDM KL25Z - GL900	Error_Max(%)	4.074	3.221	0.795	6.161	2.810
	Error_Min(%)	0.512	0.083	2.694	4.939	
		計測間隔 30ms				平均誤差
		El Centro	Taft	Hachinohe	JMA Kobe	
Arduino Uno - GL900	Error_Max(%)	5.968	6.238	2.877	4.106	3.174
	Error_Min(%)	2.333	1.503	2.090	0.279	
GR-SAKURA - GL900	Error_Max(%)	1.107	6.745	1.257	2.500	7.160
	Error_Min(%)	3.670	9.035	29.798	3.170	
FRDM KL25Z - GL900	Error_Max(%)	3.316	2.364	3.255	1.826	2.761
	Error_Min(%)	1.386	0.839	3.928	5.171	

さらに, OSHW とレファレンスで計測した絶対加速度の FFT 解析を行い固有周期の同定を行った。図 14~17 に, JMA Kobe NS 波の場合についてデータロガー(GL-900, 10ms), Arduino(10ms), GR-SAKURA(20ms), FRDM25KL

(30ms)のフーリエ加速度スペクトルを示す。なお、FFT解析には、計測間隔 10ms では 4096 データ、20, 30ms では 2048 データを用いたため、サンプリング周波数は 10, 20ms で 1/40.96Hz, 30ms で 1/61.44Hz となる。また、表 4 に固有周期の全ての計測間隔について、OSHW の固有周期の同定誤差(Error)を式(2)で求めた結果を示す。

$$\text{Error} = \frac{\text{OSHW の周期同定結果} - \text{レファレンスの周期同定結果}}{\text{レファレンスの周期同定結果}} \times 100\% \quad (2)$$

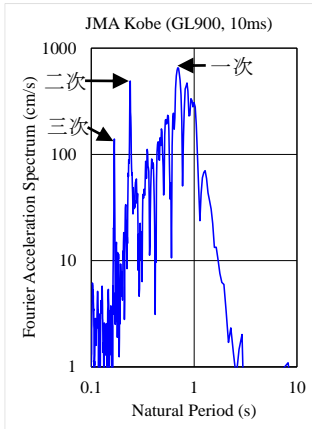


図 14 フーリエスペクトル (データローガー GL-900, 10ms)

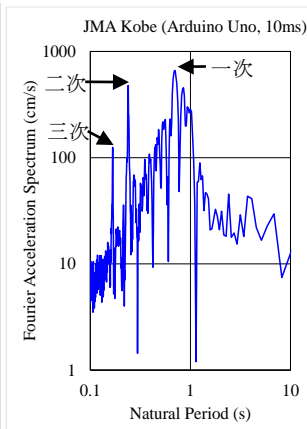


図 15 フーリエスペクトル (Arduino, 10ms)

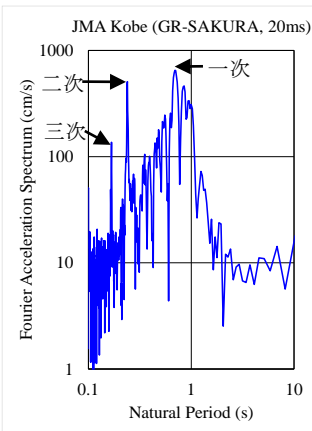


図 16 フーリエスペクトル (GR-SAKURA, 20ms)

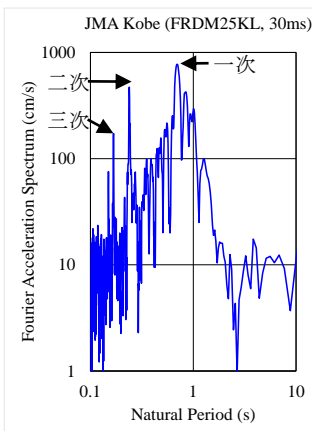


図 17 フーリエスペクトル (FRDM25KL, 30ms)

### 5. 考察および結

本研究で用いた 3 種の OSHW は、図 5~13 の時刻歴応答波形からも明らかなように計測間隔が 10, 20, 30ms のいずれの場合でも、マイクロ SD カードに保存されたデータに欠測は見られず、レファレンスで用いた加速計による計測結果とほぼ一致している。本研究では、計測間隔はマイクロ秒タイマを使用して決定したが、その遅れは 5μs 程度であり、ここで用いた 3 種の OSHW は加速度応答のデータローガーとして十分使用可能であることがわかる。ただし、今回用いた OSHW の AD 変換がシーケンシャルに行われるため、3 軸加速度の計測データは完

表 4 固有周期の同定誤差一覧

Earthquake	El Centro	Taft	Hachinohe	JMA Kobe	
Interval (ms)	Period (s)	Arduino Uno			
10	1st	0.683	0.650	0.931	0.706
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.240
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
20	1st	0.683	0.650	0.931	0.694
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.238
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
30	1st	0.690	0.654	0.931	0.698
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.239
	3rd	0.168	0.168	0.167	0.167
Mean	1st	0.685	0.651	0.931	0.700
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.239
	3rd	0.168	0.168	0.168	0.168
GL-900 (10ms)	1st	0.683	0.661	0.931	0.694
	2nd	0.241	0.240	0.240	0.240
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
Error(%)	1st	0.375	-1.41	0.000	0.764
	2nd	-0.520	0.0651	0.0651	-0.259
	3rd	0.000	-0.0457	-0.0908	-0.0908
Earthquake	El Centro	Taft	Hachinohe	JMA Kobe	
Interval (ms)	Period (s)	GR-SAKURA			
10	1st	0.683	0.853	0.931	0.706
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.240
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
20	1st	0.683	0.853	0.931	0.694
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.240
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
30	1st	0.690	0.654	0.931	0.698
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.239
	3rd	0.168	0.168	0.167	0.168
Mean	1st	0.685	0.787	0.931	0.700
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.239
	3rd	0.168	0.168	0.168	0.168
GL-900 (10ms)	1st	0.683	0.853	0.931	0.694
	2nd	0.241	0.240	0.240	0.240
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
Error(%)	1st	0.375	-7.80	0.000	0.764
	2nd	-0.520	0.0651	0.0651	-0.0649
	3rd	0.000	-0.0457	-0.0908	0.000
Earthquake	El Centro	Taft	Hachinohe	JMA Kobe	
Interval (ms)	Period (s)	FRDM-KL25Z			
10	1st	0.683	0.650	0.931	0.931
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.240
	3rd	0.168	0.168	0.167	0.167
20	1st	0.683	0.650	0.611	0.694
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.238
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
30	1st	0.690	0.654	0.608	0.698
	2nd	0.240	0.240	0.239	0.239
	3rd	0.168	0.168	0.167	0.168
Mean	1st	0.685	0.651	0.717	0.774
	2nd	0.240	0.240	0.239	0.239
	3rd	0.168	0.168	0.167	0.168
GL-900 (10ms)	1st	0.683	0.650	0.931	0.694
	2nd	0.240	0.240	0.240	0.240
	3rd	0.168	0.169	0.168	0.168
Error(%)	1st	0.375	0.177	-23.0	11.6
	2nd	0.0651	0.0651	-0.0649	-0.259
	3rd	0.000	-0.182	-0.227	-0.136

全には時刻同期していないことに注意が必要となる。

さらに、用いた OSHW の AD 変換精度は 10bit(Arduino), 12bit(GR-SAKURA), 16bit(FRDM25KL), 16bitAD 変換結果を [0, 1] の実数値で出力でそれぞれ異なるが、表 3 に示す計測値の最大・最小値およびその誤差の一覧から、計測精度に対する AD 変換精度の影響は小さく、若干の例外はあるが概ね約 7% 程度の計測誤差となっていることもわかる。また、CPU の作動周波数も、16MHz(Arduino), 96MHz(GR-SAKURA), 48MHz(FRDM25KL) と OSHW によって異なるが、計測間隔の設定や計測精度への CPU 作動周波数の影響も小さいことがわかる。

しかし、図 5~13 に示すように、OSHW での計測結果の時刻歴波形にノイズが見られる場合があり、表 3 中でも最大計測誤差が約 47% となる場合もある(10% を超え

る誤差は 36 回中 3 回)。今回の実験では、OSHW に接続する加速度センサはブレッドボード上で配線を行っている。このため、供試体の振動でブレッドボード上の配線等が振動ノイズが発生することが考えられる。センサは基板上にハンダで固定することが望ましく、今後、計測ノイズの除去法について検討を行う必要がある。

次に、計測結果の FFT 解析による固有周期の同定については、図 14~17 より、使用する OSHW や計測間隔によらず、ほぼ同様の固有周期が得られることがわかる。ただし、表 4 に示す固有周期の同定誤差では、El Centro, Taft 波の場合にはほぼ同様の固有周期が得られているが、Hachinohe 波の場合の同定結果は 3 種の OSHW, 3 種の計測間隔とも、JMA Kobe 波の場合には FRDM25KL の 10ms の計測間隔の場合に他の地震波の場合と異なった 1 次固有周期の結果となっている。これは、図 14~17 に示すように、今回用いた供試体では、0.7 秒付近と 0.93 秒付近にほぼ同程度のスペクトル値を有するピークが見られ、その大きさにより一次固有周期の同定結果が異なったためと考えられる。本研究では、計測結果にフィルタ操作は行っていないが、フィルタ操作による固有周期同定精度の向上についても、検討を行う必要があると考える。

以上より、今回使用した OSHW と加速度センサは、若干の検討課題はあるが、いずれも加速度のデータロガーとして建築構造性能モニタリングに適用可能で、建築構造性能モニタリングの普及に資することができると考える。ただし、各 OSHW によってプログラム開発環境や、用意されているライブラリも異なり、プログラミングによって処理時間が大きく異なるため、適切なライブラリの使用やプログラミング手法の検討を行うことが必要となる。今後、より汎用性のある建築構造性能モニタリングシステムを構築するためには、WiFi, Zigbee, Bluetooth 等の無線通信手法から適切な手法の選択とデータ収集法の検討を行う必要があると考える。

**【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, 及び課題番号 25420581 の援助の下に行われた。

#### 【参考文献】

- 1) 日本建築防災協会, 全国被災建築物応急危険度判定協議会: 被災建築物応急危険度判定マニュアル, 1998.1.
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課監修, 日本建築防災協会: 震災建築物の被災区分判定基準および復旧技術指針(各種構造), 2001.9
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課監修, 日本建築防災協会: 震災建築物の被災区分判定基準および復旧技術指針(木造編), 2003.1.
- 4) 国土交通省災害情報: 災害情報 東日本大震災第 84 報(平成 24 年 8 月 1 日 10:00 作成)の「被災建築物応急危険度判定」, pp.190-193, 2011. 9.1. (<http://www.mlit.go.jp/common/000237202>.)

Pdf, 2014.6.16 閲覧)

- 5) 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, No.4, pp.111-116, 2006.2.
- 6) 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.
- 7) 熊谷仁志, 岡田敬一: 層間変位モニタリングによる地震後の建物健全性診断, 日本コンクリート工学協会, コンクリート工学, Vol45, No.4, pp.10-15, 2007.4.
- 8) 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, 防火, 海洋, 情報システム技術, pp.495-496, 2008.7.
- 9) 草野直幹: 計測地震防災のすすめ, 建築と社会, 構造のページ, p.46, 2013.1.
- 10) Tom I. and Dan O.: Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers, Thomson, 2004.5.
- 11) Tom Igoe, 小林茂監訳, 水原文訳: Making Thing Talk Arduino で作る「会話」するモノたち, オライリー・ジャパン, 2008.1.
- 12) 日本建築学会・情報システム技術委員会: 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.
- 13) 日本建築学会・情報システム技術委員会: 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.
- 14) 日本建築学会・情報システム技術委員会: 建築におけるセンシングからビッグデータまでを考える, 2013 年度日本建築学会大会(北海道) 情報システム部門研究協議会資料, 2013.8.
- 15) 谷明勲, 佐々木宏仁, 山邊友一郎: センサネットワークを用いた地震情報収集システムに関する研究—OSHW を用いたデータ収集・通信に関する基礎的検討—, 日本建築学会第 36 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), pp.253-256, 2013.12.
- 16) 梁琪, 谷明勲, 山邊友一郎: 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—, 日本建築学会第 36 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), pp.257-260, 2013.12.
- 17) 谷明勲, 山邊友一郎, 梁琪: オープンソースハードウェア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—オープンソースハードウェアの計測性能の比較検討—, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114, No.65, 知的環境とセンサネットワーク研究会, ポスター番号 15, pp.41-42.
- 18) Arduino Uno HP: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno#UxVCaM5-k-I> (2014.6.16 閲覧)
- 19) GR-SAKURA HP: <http://japan.renesas.com/products/promotion/gr/overview/index.jsp> (2014.6.16 閲覧)
- 20) FRDM25KL HP: <https://mbed.org/handbook/mbed-FRDM-KL25Z> (2014.6.16 閲覧)
- 21) Data sheet: [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7361LC.pdf](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361LC.pdf)(2014.10.01 閲覧)
- 22) Data sheet: <http://www.xbow.jp/cx1.pdf> (2014.10.01 閲覧)

- 
- \*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)

# Research on Structural Health Monitoring System of Buildings using OSHW - Comparison of Measurement Performance on Open Source Hardware -

○Qi LIANG\*<sup>1</sup>, Akinori TANI\*<sup>2</sup>, Yuichiro YAMABE\*<sup>3</sup>

Keywords: Open Source Hardware, Measurement Performance, Acceleration Sensor

## Introduction

Nowadays, monitoring on structural performance of buildings in life cycle, especially a quick emergency inspection including damage detection and residual seismic capacity after earthquake is becoming increasingly important. Recently, many research on structural health monitoring systems of buildings have been performed experimentally in Japan, and some sensors and communication technologies have also been introduced into monitoring systems. However, most of these systems were tested in laboratory or only utilized in some high-rise buildings, and have not been adopted in general buildings, because of their high-cost performance and complicated wiring construction. As the development of ICT, various kinds of open source hardware (OSHW) and sensor systems using MEMS have been developed and widely applied to many applications. Therefore, to develop more extensive structural health monitoring system with easy install and high cost performance, the authors have carried on studies on development of structural health monitoring system using OSHWs. It is necessary to clarify measurement accuracies of OSHWs due to their different specifications and developing environment, because various kind of OSHWs are developed and commercially available.

## Outline of Experiments

In this paper, Arduino and two other OSHWs which are pin-compatible to Arduino are employed as data loggers of acceleration data, and fundamental shaking table tests were performed to verify its measuring accuracy. A small-scale three-story specimen is employed to imitate a building structures, and MEMS based analog acceleration sensors were installed on the top of the specimen. Measured acceleration data were stored in micro SD card. Absolute accelerations of the specimen are also measured by a reference system, which consists of a high-precision acceleration sensor and a high-performance data logger, and observation performances of OSHWs were verified using these data. Furthermore, the observed acceleration data are processed to determine natural period of specimen by using FFT analysis. Accuracies of OSHWs were verified in comparison of errors between OSHWs and reference system. Based on results obtained through tests, measurement accuracies of employed OSHWs and the applicability of three OSHWs to structural performance monitoring system are verified and discussed.

## Results and Conclusions

In case of all three OSHWs, acceleration data were integrally obtained and stored in micro SD cards. Acceleration results measured by these OSHWs coincided with those measured by the reference system with nearly 7% measuring errors. However, large errors over 10% were observed with 3 times in 36 times. These large errors were considered to be strongly affected by experimental conditions such as electrical wiring on breadboard. Therefore, further studies on noise reduction are necessary to improve measuring accuracy of the proposed systems. Errors of obtained results also show that both resolution performances of AD converter and CPU operation frequency for all three OSHWs have little effect on measurement accuracy. The results of natural periods calculated by FTT were almost identical with those using data recorded by the reference system. In some case, differences of identified natural periods became large. These errors were considered to be also strongly affected by observation noises mentioned above, and it is necessary to introduce adequate filtering process in FFT analysis. Obtained results show that employed three OSHWs have enough accuracy and are considered to be applicable to a structural health monitoring system of buildings.

---

\*1 Graduate Student, Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University, M. Eng.

\*2 Professor, Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

\*3 Associate Professor, Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.