

# オープンソースハードウェアを用いた構造モニタリングに関する研究

## - 実大3層鉄骨構造物の計測実験 -

○古泉 一希\*<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，加速度センサ，ジャイロセンサ，性能モニタリング

### 1. はじめに

日本は世界有数の地震大国である。1995年の阪神・淡路大震災や、2011年の東日本大震災も記憶に新しい。

大地震発生直後には建築構造物の余震等による二次災害防止のため、各種調査<sup>1)3)</sup>が行われるが、その調査方法は目視によるものであり、天井裏や仕上げ材等で被覆された構造部材の調査には多くの人手と時間を要する。また、被災建物に残留変形が無く建物使用に支障が無い場合でも、構造部材が損傷している場合があることが考えられる。このような建築構造物の被災度診断を行う構造成能モニタリングシステムが開発<sup>4)8)</sup>されているが、まだ一般の建築物に普及する状況には至っていない。

近年、情報通信技術(ICT)の発展に伴い、センサや種々のシステムを用いた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>9)12)</sup>。このような状況を踏まえ、本研究では、被災建物の構造部材の損傷を、短時間で容易に検出できる手法として、比較的安価で容易に入手可能なセンサとオープンソースハードウェア(Open Source Hardware：以下 OSHW)<sup>13), 14)</sup>を用いた建築構造成能モニタリングシステムを試作<sup>15), 16)</sup>し、実大構造物の振動台実験において試作システムを用いた計測を行い、試作システムの建築構造成能モニタリングシステムへの適用可能性に関する検討を行った。ここでは、実大3層鋼構造建物について、1) 加速度センサを用いた構造特性変化の検出、2) ジャイロセンサを用いた構造部材損傷の検出について検討を行い、試作システムの実用性を明らかにすることを目的とする。

### 2. 計測装置

#### 2.1 OSHW

本研究では OSHW の内、Arduino<sup>17)</sup>を使用する。表 1 に Arduino 基板上に配される主なピンの種類と機能を示す。プログラミングは、Arduino プログラミング言語と Processing をベースとした Arduino IDE(開発環境)を用いて、専門知識のない一般の人でも比較的容易にプログラミングを行うことができる。また、この OSHW は、アナログとデジタルの入力ポートを有し、各種センサを容易に接続できるが、本システムでは I2C 接続によるデジタルセンサを用いて試作システムの構築を行う。

表 1 Arduino 基板上のピンの種類と機能

ピン	機能
デジタル IO ピン (pin 0-13)	HIGH、LOW のデジタル値の入出力ポートとして任意に設定可。
アナログ IN ピン (pin 0-5)	アナログ入力値 = {入力電圧(0~Vdd)/Vdd}×1024
Vdd	電圧出力 5V or 3.3V
GND	基準電位 0V

#### 2.2 無線通信機能(Xbee)

無線通信システムには多くの種類があるが、ここでは Arduino に容易に接続できる XBee(ZigBee 規格)を用いる。XBee は、省電力に優れ、非常に使いやすく豊富な機能を持った無線通信機器で、国内利用の認可を得ており、個人でも容易に導入することができる。XBee の特性を表 2 に示す。XBee には 2 種類の規格がある<sup>18)</sup>が、本研究ではシリーズ 2 を用いる。

表 2 Xbee の特性

RF データレート	250Kbps	シリアルデータレート	1200bps~1Mbps
室内/アーバンレンジ	最大 40m	動作温度	-40°C~+85°C
屋外/見通しレンジ	最大 120m	動作湿度	0~95%
送信出力	2mW	電源電圧	2.1~3.6VDC
受信感度 (1%PER)	-96dBm	送信電流	45mA
周波数帯域	2.4GHz	受信電流	40mA

#### 2.3 加速度及びジャイロセンサ(InvenSense 社製センサ)

本基板は、プライマリ I2C に接続した 3 軸加速度センサと 3 軸ジャイロセンサの 6 軸データを出力する機能を有する IMU(慣性計測装置)である。本基板の特性を表 3 に示す。

表 3 InvenSense 社製センサの特性

測定軸	3 軸加速度 角速度	レートノイズ (dps/√Hz)	0.01
出力	I2C	消費電力 (mW)	12
感度 (LSB/°/sec)	131 65.5 32.8 16.4	フルスケールレンジ (°/sec) / (g) 任意に選択可	±250/±2 ±500/±4 ±1000/±8 ±2000/±16
クロック誤差(%)	1.0	電源電圧(V)	2.1~3.6

なお、本研究では、IMU3000のみをArduinoに接続したものをジャイロセンサとして、IMU Fusion BoardをArduinoに接続したものを加速度センサとして用いる。

### 3. 実大3層鉄骨ラーメン構造物加振実験概要

図1に示す実大構造物に、鷹取60%、80%、100%、南海50%、100%、150%の加振波を入力し、無線通信による計測データの受信を、図1中の赤丸の地点で行った。なお、データ転送は、各センサから計測データをXbeeによりサーバに直接受信する方式とした。

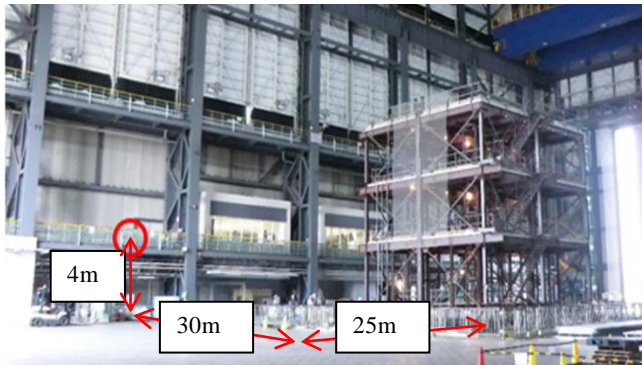


図1 実大構造物とデータ受信位置の位置関係

図2にセンサ配置を示す。配置したセンサは、加速度(加速度センサ A01~A03)、梁端回転角(ジャイロセンサ G01~G08)、層間変形角(ジャイロセンサ G09~G10)を計測した。図3(a)~(c)にセンサの設置状況を、図3(d)、(e)にジャイロセンサの計測方法の詳細を示す。なお、システムのサンプリング間隔は、データ計測記録を考慮して33msと設定した。

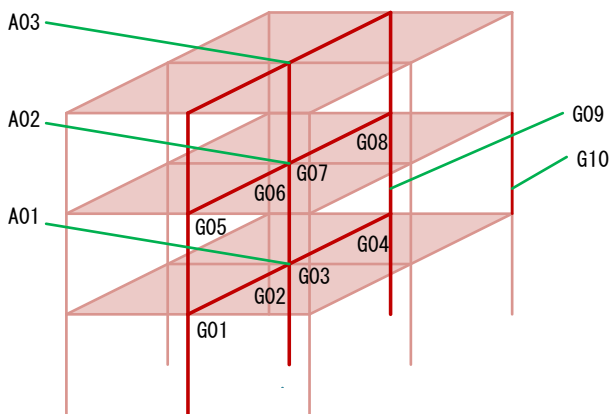


図2 センサ設置位置概略

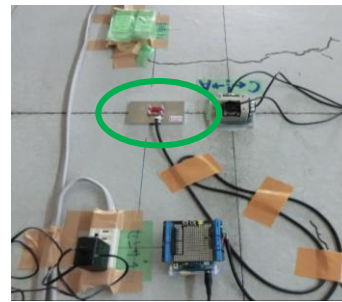
### 4. 実験結果及び考察

#### 4.1 建物損傷状況

鷹取100%加振時にG01、G04、G08の部分の大梁フランジが破断しG05の部分の大梁フランジに亀裂が生じた。

#### 4.2 Xbee無線通信状況

表4、5にXbeeによる無線通信の成功率を、式(1)に成功率の定義を示す。本研究では通信状況のみを検討した。



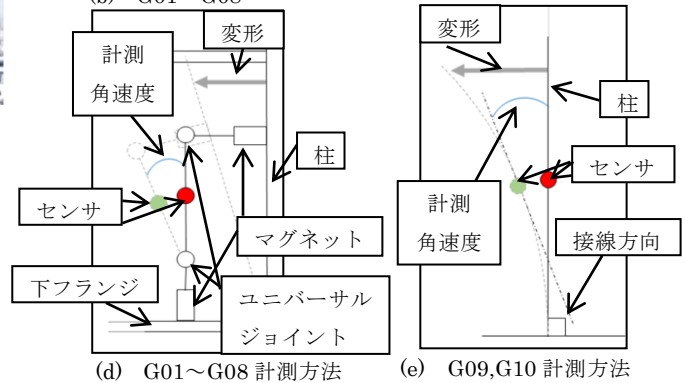
(a) A01~A03



(b) G01~G08



(c) G09~G10



(d) G01~G08 計測方法 (e) G09,G10 計測方法

図3 センサ設置方法

表4 地震波毎の無線通信成功率

鷹取 60%	鷹取 80%	鷹取 100%	南海 50%	南海 100%	南海 150%
38%	69%	77%	77%	85%	85%

表5 センサ毎の無線通信成功率

A01	A02	A03	G01	G02	G03	G04
67%	83%	33%	67%	50%	83%	67%
G05	G06	G07	G08	G09	G10	平均
100%	83%	33%	100%	67%	100%	72%

$$\text{無線通信成功率} = \frac{\text{通信回数}}{\text{計測回数}} \times 100[\%] \dots (1)$$

表4、5よりG07のように成功率が50%を下回るものもあれば、G08のように成功率が100%のものがあり、場所によって通信状況に大きな差が見られたため、受信位置による障害物の有無の影響と考えられ、実用性を高めるために今後、位置に影響しない安定した通信のできる他の通信方法を検討する必要がある。

#### 4.3 加速度センサ計測結果

図4~6に加速度センサA01~A03と別途計測されたサーボ型加速度センサ絶対加速度応答の時刻歴波形を、表6にサーボ型加速度センサに対する加速度センサA01~A03の最大計測誤差を、式(2)に加速度最大計測誤差の定

義を示す。

$$\text{加速度最大計測誤差} = \frac{||A.MAX| - |S.MAX||}{|S.MAX|} \times 100[\%] \dots (2)$$

A.MAX: A01~A03、G01~G10 計測値の絶対値の最大値  
 S.MAX: サーボ型加速度センサ計測値の絶対値の最大値  
 以下の式(2)(3)(4)で A.MAX は同様として使用する。

また、図 7~8 に計測加速度を、フィルタ処理を行わずに FFT 解析することによって算出した固有周期を示し、図 9、10 に、計測値をデータ数、データをすらすす時間の組み合わせを何種類か検討し、周期の変化が観察された 200 データ(計測秒数: 66s)ごとに FFT 解析を行って算出したランニングスペクトルを示す。なお、解析を行う際のデータ数は 1024 データとし、201 データからは値を 0 としている。

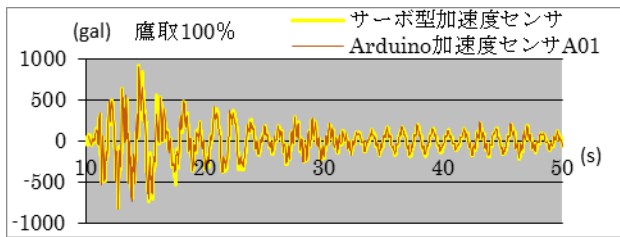


図 4 鷹取 100%加振時 A01 計測絶対加速度応答

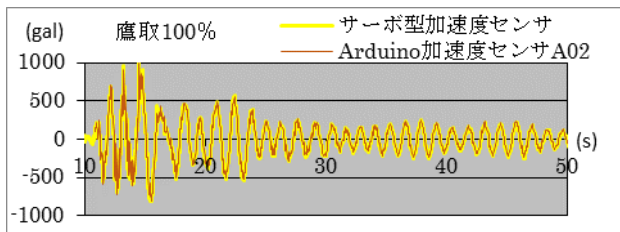


図 5 鷹取 100%加振時 A02 計測絶対加速度応答

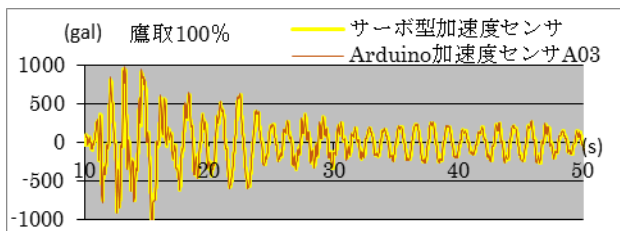


図 6 鷹取 100%加振時 A03 計測絶対加速度応答

表 6 加速度最大計測誤差

A01	A02	A03
2.87%	5.73%	5.56%

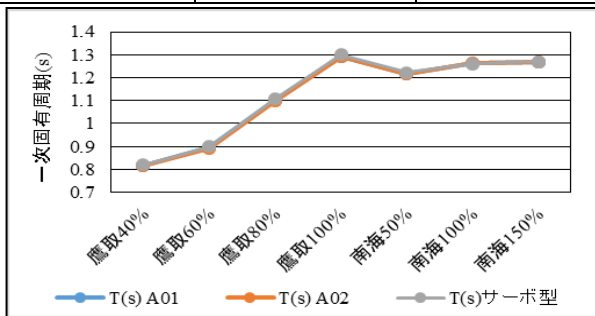


図 7 FFT 解析結果による一次固有周期

図 4~6 と表 6 に示すように、位相、振幅共に 6% 以下

と誤差が小さく、比較的良好な対応を示した。また、図 7~9

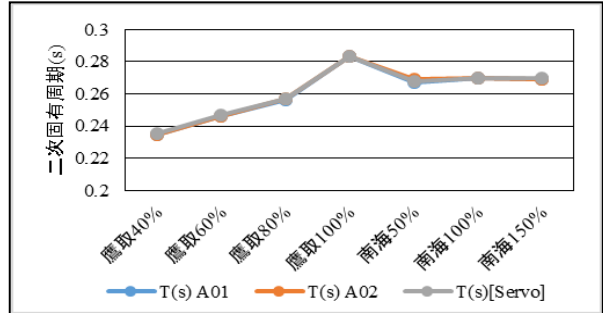


図 8 FFT 解析結果による二次固有周期

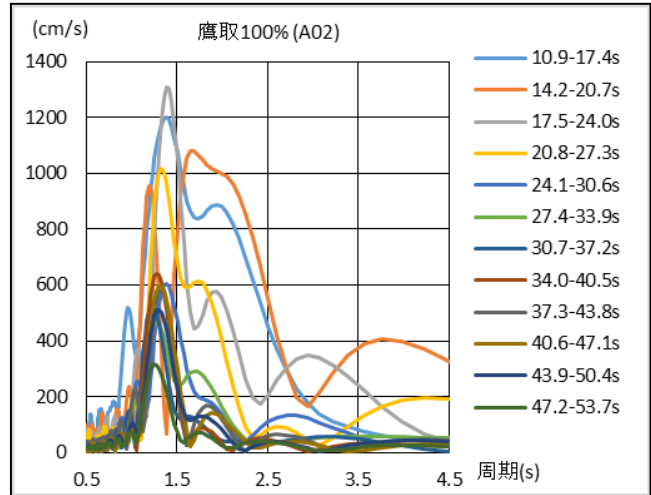


図 9 フーリエ加速度ランニングスペクトル

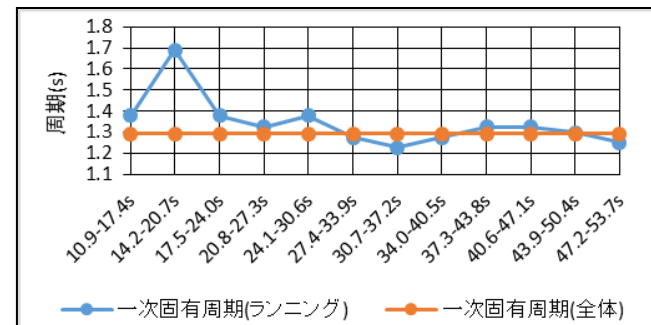


図 10 ランニングスペクトル(一次固有周期の変化)

に示す固有周期はフィルタ処理を行わずに FFT 解析したが、得られた固有周期や変化の傾向は、サーボ型加速度計の計測結果を用いた場合と類似しており、図 9~10 に示すランニングスペクトルから、14.2~20.7s の間に大きい固有周期の長周期化が見られ、この間に建物に大きな損傷(鉄骨大ばり破断)が起きたと判断することができる。なお、周期が低下しているのは、地震の継続時間の後半になると入力加速度の値も小さくなるため、部材の荷重-変形関係は塑性域から除荷した弾性域で応答することになり、塑性化した時の剛性よりも剛性が大きくなるための変化だと考えられる。これより、加速度センサは建築構造性能モニタリングシステムへの適用可能性が高いと考える。

#### 4.4 ジャイロセンサ計測結果(梁端回転角)

図 12~16 に、ジャイロセンサで計測した角速度から求

めた梁端回転角と別途設置されたワイヤ式変位計から求めた梁端回転角(注1)の時刻歴波形を、表7にジャイロセンサで計測した角速度から求めた梁端回転角の最大計測誤差を、式(3)に梁端回転角最大計測誤差の定義を示す。

$$\text{梁端回転角最大計測誤差} = \frac{|A_{MAX}| - |W_{MAX}|}{|W_{MAX}|} \times 100[\%] \quad \dots (3)$$

W.MAX:ワイヤ式変位計の計測値の絶対値の最大値  
 なお、ジャイロセンサによる計測では、計測値に基線ずれやオフセットが見られたため、最小二乗法による基線補正<sup>19)</sup>とオフセット値の修正をデータ毎に行った結果を示している。(注2参照)

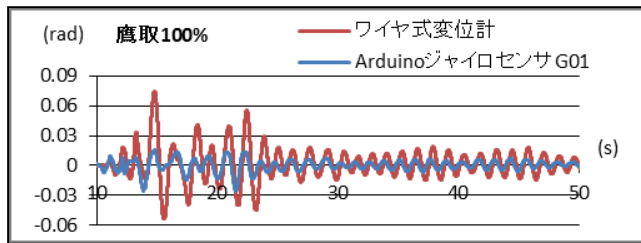


図 11 鷹取 100%加振時 G01 計測角度

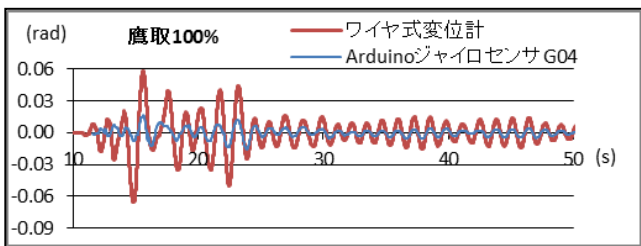


図 12 鷹取 100%加振時 G04 計測角度

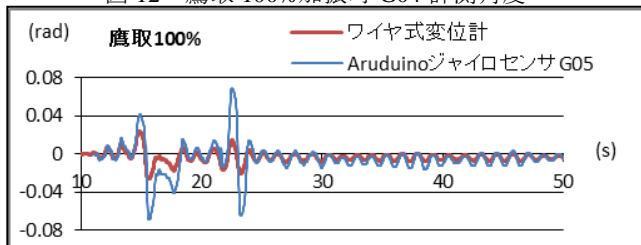


図 13 鷹取 100%加振時 G05 計測角度

梁端回転角に関する計測結果に関しては、表7に示すように計測誤差が最大で229%と大きな誤差が見られた。また、破断の生じていない部分に設置したセンサでは、図14や表7からもわかるように誤差は小さかった。しかし、図11~13、15に示すように位相は類似しているが、振幅の誤差が小さい場合(図11、12)と大きい場合(図13、15)が混在し、破断を検出することが困難であるとわかる。この誤差は、図16~18に示すように梁フランジ部の座屈によるセンサ設置部のずれによるものと考えられ、今後、破断検出可能なセンサ設置方法の検討をする必要がある。また、ジャイロセンサの基線ずれについても、角速度の計測値のフィルタ処理等による補正方法も検討する必要があると考える。

#### 4.5 ジャイロセンサ(層間変形角)

図19、20にジャイロセンサG09、G10で計測した角速度

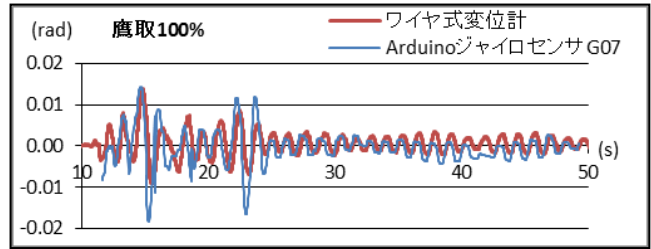


図 14 鷹取 100%加振時 G07 計測角度

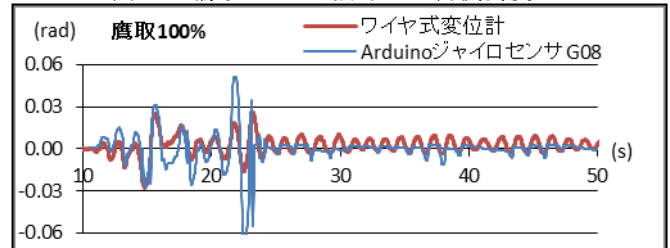


図 15 鷹取 100%加振時 G08 計測角度

表 7 梁端回転角最大計測誤差

G01	G02	G03	G04
65%	38%	50%	75%
G05	G06	G07	G08
229%	35%	33%	141%



図 16 鷹取 100%加振後 G04 の状況(破断) 図 18 鷹取 100%加振後 G07 の状況(変化なし)



図17 鷹取 100%加振後 G05 の状況(亀裂)  
 度から求めた2階層間変形角と別途計測されたレーザ式変位形の計測結果から求めた2階層間変形角の時刻歴波形を、表8にG09、G10ジャイロセンサの計測誤差を、式(4)に層間変形角最大計測誤差の定義を示す。

$$\text{層間変形角最大計測誤差} = \frac{|A_{MAX}| - |R_{MAX}|}{|R_{MAX}|} \times 100[\%] \quad \dots (4)$$

R.MAX:レーザ式変位計の計測値の絶対値の最大値

層間変形角に関しては、図19、20に示すように位相はほぼ一致しているが、表8に示すように、G09よりG10の誤差が大きくなり、ピン接合と剛接合の変形の違いからピン接合の柱に設置したG10の方が、誤差が小さくなると想定していたが異なる結果となり、センサによって

大きく差が出るので、今後、検討が必要と考えられる。

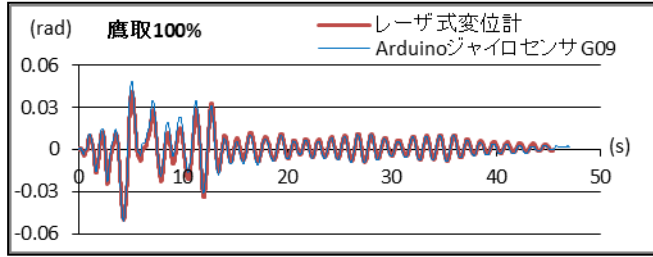


図 19 鷹取 100%加振時 G09 計測角度

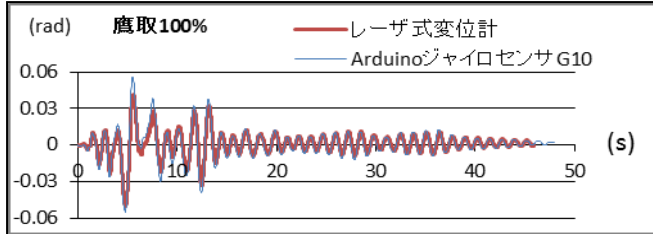


図 20 鷹取 100%加振時 G10 計測角度

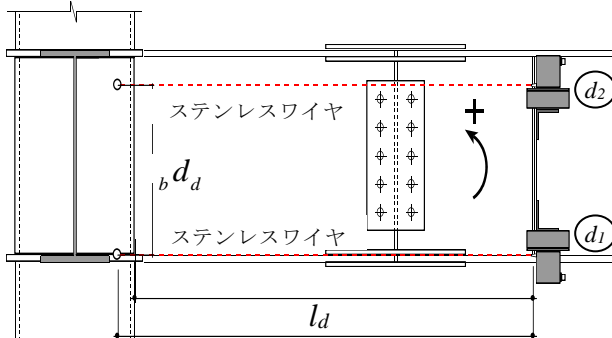
表 8 層間変形角最大計測誤差

G09	G10
9.9%	30.2%

### 5. まとめ

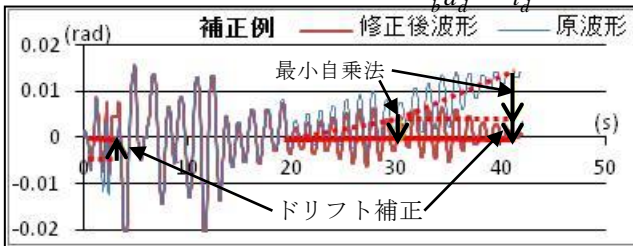
本研究では、実大構造物の振動台実験で OSHW と加速度センサ、ジャイロセンサを用いた試作システムを構築し、試作システムを用いた種々のデータ計測を行った結果、試作システムの実構造物への適用性に関しては加速度センサの適用性が高いと判断できる。Xbee 無線通信については各センサ同士でデータのやり取りができるような Adhoc ネットワークの構築や、さらに精度が良いと期待できる通信機器の利用が考えられ、また、ジャイロセンサでは設置方法や、補正方法の改善を行い、今後、適用性を上げる事が課題である。

注 1: ワイヤ式変位計から求めた梁端回転角  $b\theta$



注 2: 基線補正方法

$$b\theta = \frac{d_1 - d_2}{b d_d} \times \frac{l_{dt}}{l_d} [\text{rad}]$$



### 【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: 震災建築物の被災度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: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針(木造編), 2003.1.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 日本建築学会・情報システム技術委員会: 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.
- 12) 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.
- 13) Tom I. and Dan O.: Physical Computing: Sensing and Controlling the Physical World with Computers, Thomson, 2004.5.
- 14) 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.
- 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) 梁瑛, 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) Arduino Home Page: <http://www.arduino.cc/>. (2014 年 10 月 9 日アクセス)
- 18) Robert Falubi, 小林茂監訳, 水原文訳: XBee で作るワイヤレスセンサーネットワーク, オライリー・ジャパン, 2011.12.
- 19) 株式会社 KEYENCE japan: 計測データを 100 倍活用する Excel テクニック データ取り込み&加工編

- \*1 神戸大学大学院工学研究科 修士課程
- \*2 神戸大学大学院工学研究科 教授
- \*3 神戸大学大学院工学研究科 准教授

# A Study on the Structural Monitoring Using the Open Source Hardware

○Kazuki KOIZUMI\*<sup>1</sup>      Akinori TANI\*<sup>2</sup>  
Yuichiro YAMABE\*<sup>3</sup>

Keywords : Open source hardware, acceleration sensor, gyro sensor, performance monitoring

In Japan, the earthquake powers, for secondary disaster prevention by aftershocks of the building structures, various surveys) is performed on a large immediately after the earthquake, but the survey methods is due to visual, finishing materials and the ceiling I takes time and much labor in the study of the structural member that is coated with, or the like. In addition, it is considered that even if there is no obstacle to building use without residual deformation to the affected building, there is a case in which the structural member is damaged, it is possible to easily ascertain the damage to the building after the earthquake, a secondary disaster monitoring system that can prevent that is required. In this study, it is easy to come by at a low cost, with the aim to build a monitoring system that is easy to treat, we have examined a prototype system of structural monitoring using open source hardware in actual-size structure. Structure of three layers of steel moment frame, I have entered the seismic waves of Nankai and Takatori. The open source hardware, it is possible to carry out the programming relatively easy for the average person who does not have the specialized knowledge, using the Arduino that can be easily connected to various sensors, acceleration, beam end in gyro sensor and acceleration sensor I was measuring the rotation angle, the story drift. Further, we examined the communication function using the Xbee which can be introduced easily by the individual.

As a result, wireless communication is considered the only communication status in this study, the average of the success rate was 72%, but there is also a part, the success rate is less than 50% is a large difference in communication status was seen. I considered the effects of the presence or absence of an obstacle by the receiving position is this. Acceleration is almost identical phase, amplitude in both, I showed a relatively good correspondence. It has also been found it is possible to read errors also tend damage buildings less for natural period which is calculated by the FFT analysis, applicability is high. Has measurement errors due to buckling of the beam flange, beam end rotation angle, was 229% at maximum. Phases is similar, but it has been found that is larger in the case the measured value of the amplitude is small mixed, to detect the rupture is difficult. The story drift, phase were nearly identical, but it has resulted in an error of a sensor installed in the pin junction pillar is increased, is different from expected.

From the above, it is also, we believe the use of communication equipment that can be expected construction of such a network can exchange data at each sensor to each other, or with good accuracy for the Xbee wireless communication, and installation method, the correction in the gyro-sensor by carrying out the improved method, in the future, to increase the applicability is a problem.

---

\*1 Kobe University Graduate School of Engineering master's program

\*2 Kobe University Graduate School of Engineering, Professor

\*3 Kobe University Graduate School of Engineering, Associate Professor