

高精度傾斜センサを用いた振動測定装置の試作

西川 隼人¹・高谷 富也²・釣 健孝³・福井 繁雄³・宮島 昌克⁴

¹正会員 舞鶴工業高等専門学校 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

E-mail:nisikawa@g.maizuru-ct.ac.jp

²正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

E-mail:takatani@maizuru-ct.ac.jp

³非会員 舞鶴工業高等専門学校 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

E-mail:t.suri@maizuru-ct.ac.jp, s.fukui@maizuru-ct.ac.jp

⁴正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

本研究では、これまでのMEMSセンサに関する研究で用いられていない高精度傾斜センサによる振動測定装置を試作した。高精度傾斜センサは一般的なMEMSセンサと比べて分解能が高く、自己ノイズも小さいため、従来よりも小さな振動を測定することができる。

試作した振動測定装置の性能を調べるためにサーボ型加速度計とともに、木造建物の常時微動を測定し、加速度フーリエスペクトルから建物の振動特性を評価した。これらの装置の計測波形から求めたフーリエスペクトルの固有振動数は概ね一致した。また、サーボ型加速度計で評価した伝達関数の固有振動数はフーリエスペクトルの固有振動数と近い値となった。

Key Words : Mems sensor, Inclinator, Wooden house, Natural frequency

1. はじめに

近年、急速に発達しているMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用したMEMSセンサが地震工学の分野においても用いられるようになってきている^{1)~4)}。MEMSセンサはサーボ型の計器に比べて、小型で非常に安価というメリットがある反面、センサの性能上、常時微動のような振幅の小さな振動の測定は難しい。MEMSセンサにおいても常時微動レベルの振動の計測が可能となれば、構造物や地盤の振動特性評価を低コストで実施することが可能となり、地震防災上極めて意義が大きいものと考えられる。

著者らはこれまでの研究で利用されていない高精度の傾斜センサを用いることにより、従来のMEMSセンサを利用した研究に比べて、小さな振幅の振動を測定できる測定装置を試作した。試作した測定装置の性能を確認するために、サーボ型加速度計とともに木造建物の常時微動波形を測定し、それらの波形から建物の振動特性を評価した。建物の振動特性は測定波形から得られたフーリエスペクトルや耐震性に関連するフーリエスペクトルの固有振動数によって評価し、測定装置とサーボ型加速度計による測定結果を比較した。

2. 振動測定装置

(1) 傾斜センサ

測定装置では傾斜センサを用いて加速度を計測する。傾斜センサは村田製作所のSCA103T-D04⁵⁾を用いた。SCA103T-D04は出力される電圧を加速度に変換し、さらに角度に変換するセンサであり、主な特性は表-1のとおりである。表-1に示すようにSCA103T-D04の感度は16V/gであり、サーボ型加速度計の感度(2~10V/g)、MEMS加速度センサの感度(2V/g以下)に対し、高い分解能を有している。一方、自己ノイズは一般的なMEMS加速度センサに比べれば小さいものの、サーボ型加速度計の10倍以上程度の値となっている。なお、SCA103T-D04の自己ノイズの値はローパスフィルターの帯域幅によって決定される。SCA103T-D04はデジタル、アナログ両方の出力が可能であるが、デジタル出力では分解能が12bitであるため、より高い分解能を得るためにアナログ出力を用いた。アナログ出力は差動出力であるため、共通モードノイズをキャンセルすることが出来る。

(2) 回路

測定装置は主に傾斜センサ、ローパスフィルター、差

表-1 SCA103T-D04の主な特性⁵⁾

感度	16V/g
帯域幅	18Hz
自己ノイズ	7 μ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$
定格電圧	4.75～5.25V
軸	1方向
出力	差動 (アナログ)

動出力を増幅するための計装アンプ、レギュレータ、計装アンプに必要な負電圧を生成する回路から成っている。図-1に回路図を示す。レギュレータ回路は市販のものを外付けしているため、回路図には示していない。ローパスフィルターは1次の特性を持つものであり、抵抗と積層セラミックコンデンサーにより構成される。ローパスフィルターの遮断振動数は次式で得られる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_i C_i} \quad (1)$$

ここに、 f_c は遮断振動数(Hz)、 R_i は抵抗値(Ω)、 C_i はコンデンサーの容量値(F)、 i は図-1に示す抵抗、コンデンサーの番号に対応する。

計装アンプはLinear Technology社製のLT1168⁶⁾を用いた。LT1168は消費電力が小さく、抵抗1本で増幅率を設定することができ、式(2)⁶⁾から計算することができる。

$$G = \frac{49400}{R_G} + 1 \quad (2)$$

ここに、 G は増幅率、 R_G は抵抗値(Ω)である。

計装アンプに必要な負電圧はMaxim Integrated社製の電圧コンバータMAX1044⁷⁾を用いた回路によって生成した。負電圧の出力低下を防止するためにMAX 1044を2つ並列接続して用いた。電源電圧はアルカリ単3電池4本をレギュレータに繋げ、電圧を5.0Vに調整し、回路に供給した。

上記のセンサや部品類をスルーホール基板にはんだ付けた。図-2に試作した振動測定装置を示す。装置の寸法は縦7.2cm、横9.5cmであり、軽量で非常にコンパクトである。また、振動測定装置の製作費は1万円程度であり、一般的なサーボ型加速度計の計器一式に比べて非常に安価で製作することができた。

振動測定装置の出力はContec社製のアナログ入力装置 AI-160802AY-USB⁸⁾によって計測した。分解能は16bitである。記録される計測値はアナログ値であるため、まず電圧に変換し、その後、加速度に変換した。

3. 木造建物の振動測定結果

(1) 振動測定装置の測定条件

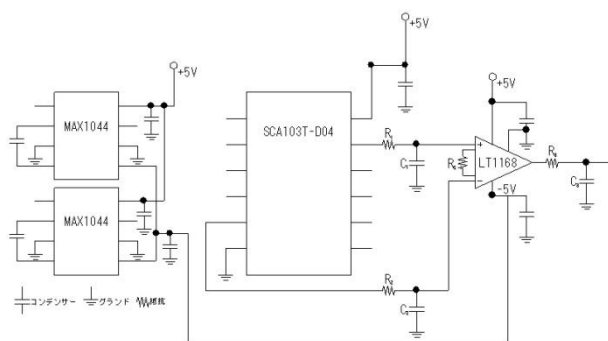


図-1 回路図

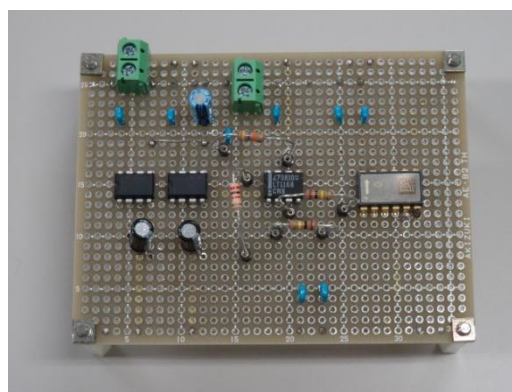


図-2 振動測定装置

SCA103T-D04からの出力の後に遮断振動数15.9Hzのローパスフィルター、計装アンプの後には33.9Hzのローパスフィルターを配置した。計装アンプの抵抗値 R_G は1k Ω か2k Ω を用いた。それぞれの抵抗値 R_G に対応する増幅率 G は50.4倍、25.2倍である。

(2) サーボ型加速度計

試作した振動測定装置の性能を確認するために、サーボ型加速度計による測定結果と比較した。測定にはミットヨ社製のサーボ型加速度計V405-BR、サンエス社製のプリアンプ、リアルタイム音響振動解析装置、解析用ノートパソコンを用いた。表-2にサーボ型加速度計の主な特性、図-3に測定で用いた計器を示す。音響振動解析装置のAD変換の分解能は24bitである。

(3) 対象建物

本研究では石川県内の3棟の2階建て木造建物で振動測定装置とサーボ型加速度計によって常時微動測定を行った。表-3に木造建物の築年数、測定日、測定場所を示す。

(4) フーリエスペクトルと固有振動数

図-4に振動測定装置とサーボ型加速度で測定した波形の一例を示す。波形全体を見ると、両波形が対応しており、1.1秒付近と5.4秒で大きな振幅が見られる。両波形

表-2 サーボ型加速度計V405-BRの主な特性

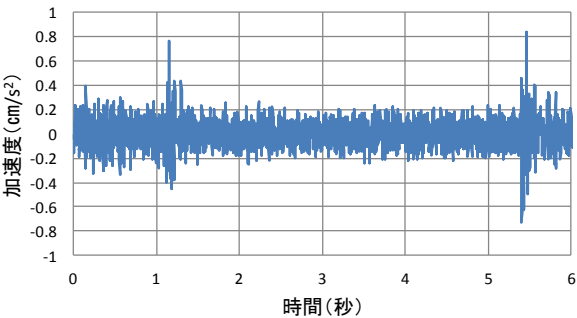
感度	3V/g
分解能	$1 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$
周波数範囲	DC～450Hz
軸	1方向



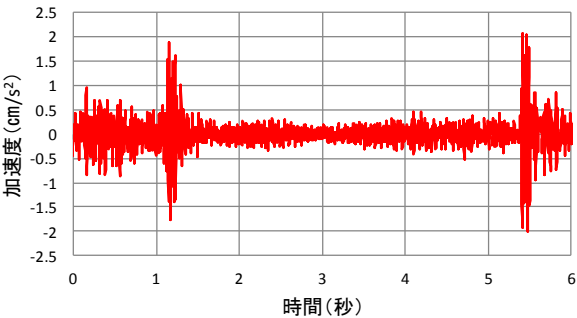
図-3 サーボ型加速度計，プリアンプ，リアルタイム音響振動解析装置

表-3 測定対象とした木造建物の情報

	築年数	測定日		測定場所	
		測定装置	サーボ型	測定装置	サーボ型
A邸	51	2014/8/13		1階，2階	1階，2階
B邸	51	2014/8/15		1階，2階	1階，2階
C邸	62	2013/12/30	2014/3/21	2階	2階



(a) 測定装置



(b) サーボ型

図-4 加速度波形（A邸，長辺方向）

の振幅が異なる要因として、アンプによる電圧の増幅率や自己ノイズレベル、ローパスフィルターの帯域幅の違いなどが考えられる。

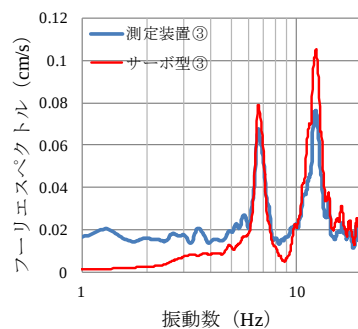
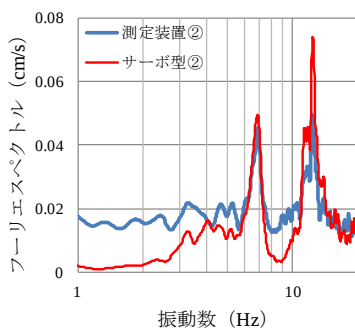
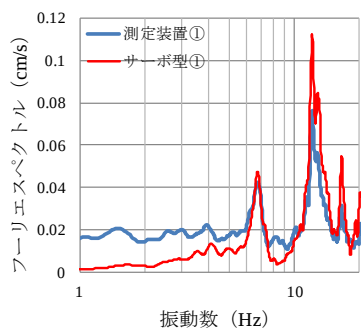
図-5、図-6に振動測定装置とサーボ型加速度計による測定を同時に行ったA邸とB邸の加速度波形から求めたフーリエスペクトルの一例を示す。フーリエスペクトルは測定順に示しており、凡例に測定順の番号を示している。サンプリング振動数は振動測定装置は500Hz、サーボ型加速度計は512Hzであり、測定時間はそれぞれ32.768秒間、32秒間である。フーリエスペクトルはバンド幅0.4HzのParzen windowによって平滑化した。なお、図-5、図-6では建物2階で測定した結果のみを示す。建物1階で測定した結果を示していない理由は後述する傾斜センサの自己ノイズレベルによるものである。

図-5のA邸のフーリエスペクトルを見ると、長辺方向では6Hz付近、12Hz付近に1次、2次のピークが振動測定装置とサーボ型いずれにも見られ、中には明瞭な3次のピークが見られるものもある。短辺方向は明瞭な1次のピークが4Hz付近にあり、ピークの位置は振動測定装置とサーボ型で概ね一致している。

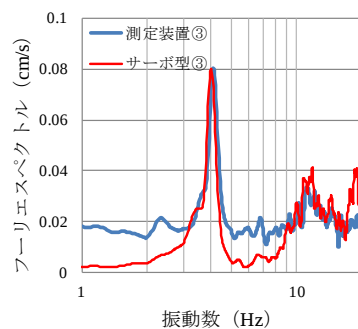
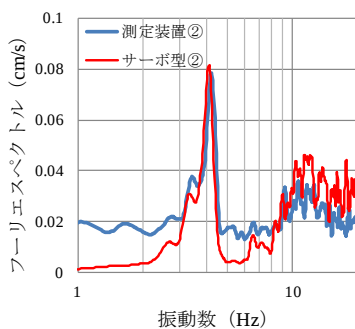
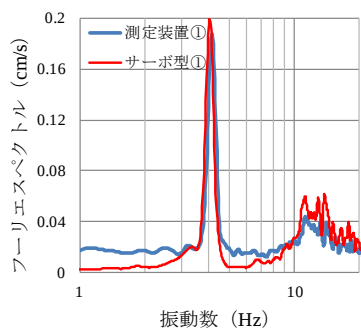
図-6のB邸のフーリエスペクトルを見ると、長辺方向では振動測定装置、サーボ型ともに6.5Hz付近に1次のピークが見られるが、10Hz以上の振幅が図によって異なっているものがある。これは振動測定装置に計測作業による振動が含まれてしまったためである。一方、短辺方向はいずれの図も測定装置、サーボ型ともに5.7Hz、10Hz付近に明瞭なピークが見られる。

上記の図-5、図-6では振動測定装置による加速度波形のフーリエスペクトルの振幅が0.01～0.02cm/sを下回っておらず、この振幅が傾斜センサの自己ノイズレベルに対応しているものと考えられる。建物1階でも振動測定装置による計測を行ったが、今回、着目した振動数帯（1～20Hz）の多くでフーリエスペクトルの振幅が自己ノイズレベルに対応すると考えられる振幅を下回ったため、測定結果を示さなかった。1階は建物の応答の影響が小さいため、常時微動の振幅が小さく、そのためフーリエスペクトルの振幅が自己ノイズレベルを下回ったものと考えられる。

続いて、図-7、図-8にA邸、B邸の2階のフーリエスペクトルと伝達関数の平均値、図-9にC邸の2階のフーリエスペクトル平均値を示す。平均値とは複数回測定した加速度波形から求めたフーリエスペクトルの算術平均のことである。伝達関数は2階と1階のフーリエスペクトルの比である。表-3に示すようにC邸では1階で測定を行わなかったため、伝達関数を求めている。C邸の測定条件はA邸、B邸と異なり、サンプリング振動数は振動測定装置では1000Hz、サーボ型では160Hz、測定時間はいずれも12.8秒間である。

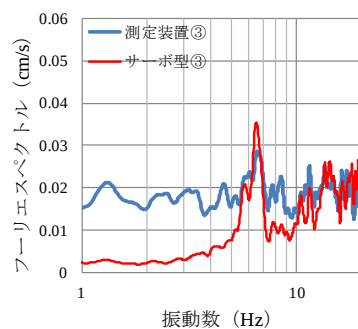
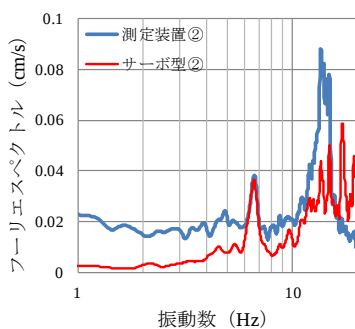
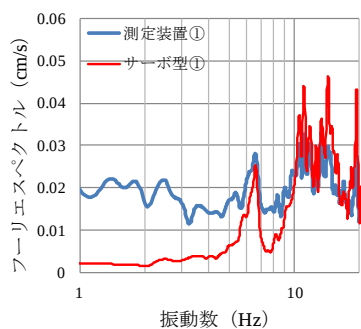


(a) 長辺

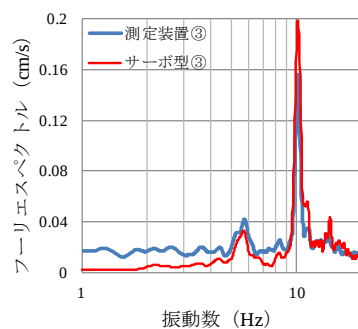
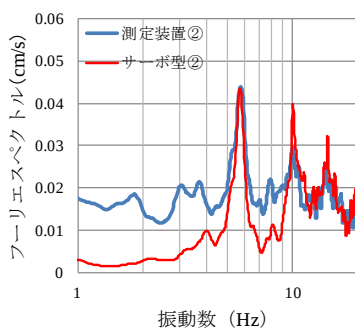
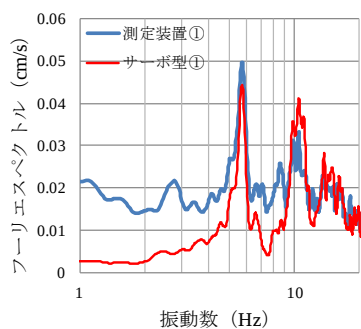


(b) 短辺

図-5 A邸のフーリエスペクトル

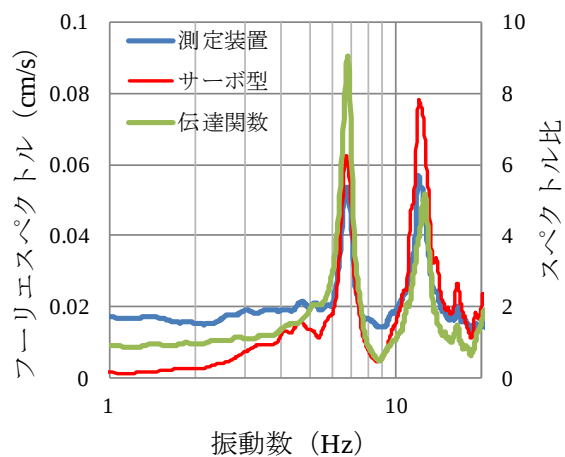


(a) 長辺

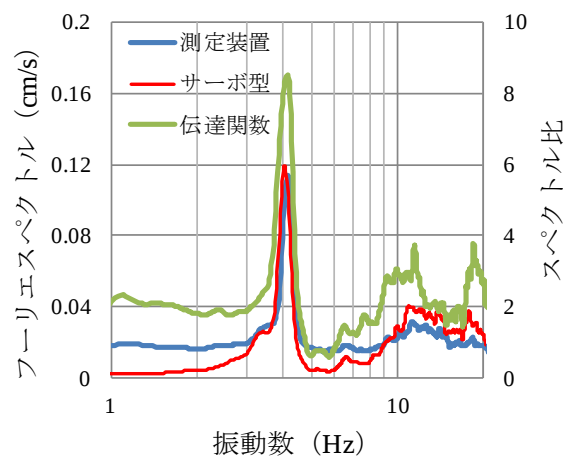


(b) 短辺

図-6 B邸のフーリエスペクトル

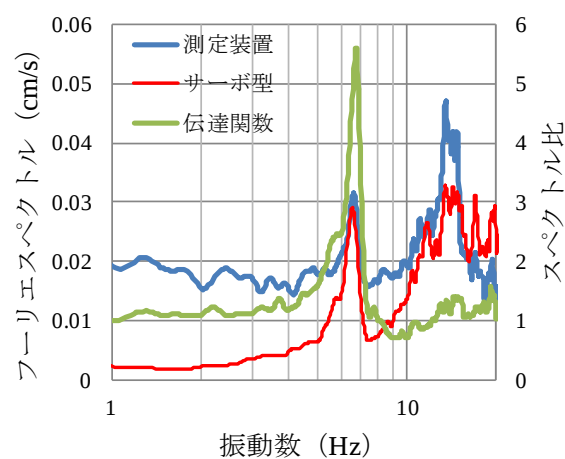


(a) 長辺

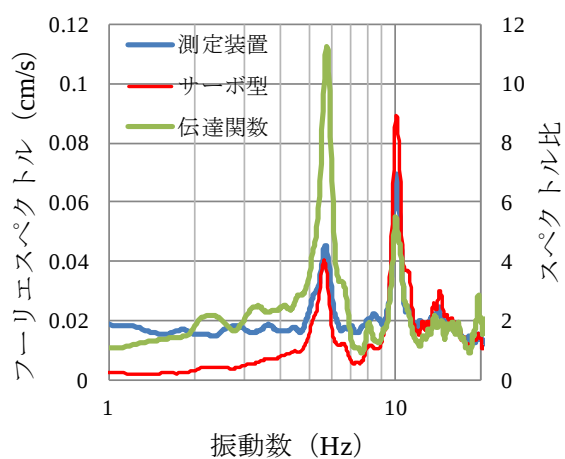


(b) 短辺

図-7 A邸のフーリエスペクトルと伝達関数の平均値

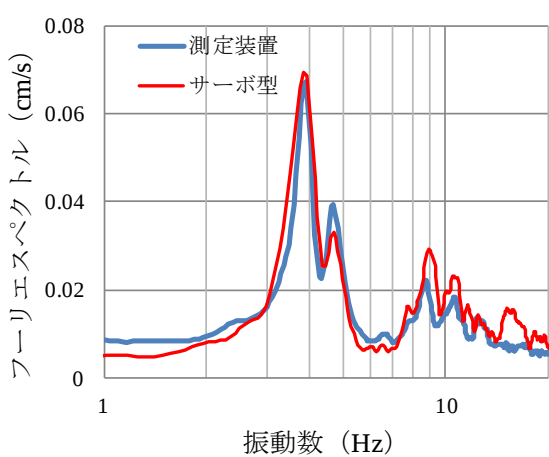


(a) 長辺

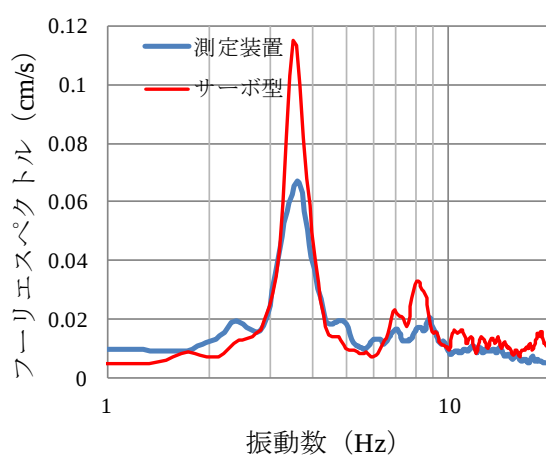


(b) 短辺

図-8 B邸のフーリエスペクトルと伝達関数の平均値



(a) 長辺



(b) 短辺

図-9 C邸のフーリエスペクトルの平均値

表-4 A邸のフーリエスペクトルと伝達関数の固有振動数

(a) 長辺				(b) 短辺			
	測定装置	サーボ型	サーボ型		測定装置	サーボ型	サーボ型
	フーリエスペクトル	伝達関数	伝達関数		フーリエスペクトル	伝達関数	伝達関数
1次固有振動数(Hz)	6.74	6.72	6.81	1次固有振動数(Hz)	4.15	4.03	4.12
2次固有振動数(Hz)	12.02	12.06	12.66	2次固有振動数(Hz)	11.23	10.96	11.47

表-5 B邸のフーリエスペクトルと伝達関数の固有振動数

(a) 長辺				(b) 短辺			
	測定装置	サーボ型	サーボ型		測定装置	サーボ型	サーボ型
	フーリエスペクトル	伝達関数	伝達関数		フーリエスペクトル	伝達関数	伝達関数
1次固有振動数(Hz)	6.59	6.59	6.72	1次固有振動数(Hz)	5.71	5.69	5.78
2次固有振動数(Hz)	13.52	13.53	14.41	2次固有振動数(Hz)	10.13	10.12	10.06

表-6 C邸のフーリエスペクトルの固有振動数

(a) 長辺				(b) 短辺			
	測定装置	サーボ型	サーボ型		測定装置	サーボ型	サーボ型
	フーリエスペクトル	伝達関数	伝達関数		フーリエスペクトル	伝達関数	伝達関数
1次固有振動数(Hz)	3.54	3.52	—	1次固有振動数(Hz)	3.91	3.83	—
2次固有振動数(Hz)	7.14	6.95		2次固有振動数(Hz)	4.70	4.69	

図-7、図-8を見ると、振動測定装置とサーボ型のフーリエスペクトルと伝達関数のピークの位置は概ね一致しており、スペクトルの形状も対応していることが分かる。

次に図-9のC邸の振動測定装置とサーボ型のフーリエスペクトルを見ると、測定日が異なるにも関わらず、スペクトル形状やピークの位置は概ね一致している。1次のピークは長辺、短辺方向ともに3~4Hzに見られる。スペクトル全体を見るとサーボ型によるフーリエスペクトル振幅の下限値がA邸、B邸に比べて大きい。C邸は2007年能登半島地震の際に震度5弱以上の揺れに見舞われたと推測される地域にあり、地震後に建物が揺れやすくなったとのことである。このことから強震動による建物の剛性低下がC邸のフーリエスペクトル振幅の下限値に関係している可能性がある。

表-4、表-5にA邸、B邸の振動測定装置、サーボ型で得られた波形から求めたフーリエスペクトルと伝達関数の平均値の1次固有振動数、2次固有振動数を示す。また、表-6にC邸のフーリエスペクトル平均値の1次固有振動数、2次固有振動数を示す。表-4、表-5を見ると、3つの1次固有振動数、2次固有振動数が概ね一致していることが分かる。表-6のC邸の1次固有振動数、2次固有振動数も近い値となっており、試作した振動測定装置によって建物の振動特性を評価できることが明らかになった。

4. まとめ

本研究ではこれまで利用されていない高精度の傾斜センサを用いることにより、従来のMEMSセンサを利用した研究に比べて、小さな振幅の振動を測定できる測定装

置を試作した。試作した測定装置の性能を確認するために、サーボ型加速度計とともに3棟の木造建物で振動測定を行い、それらの波形から建物の固有振動数などを評価した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 高精度傾斜センサなどを基板にはんだ付けし、振動測定装置を試作した。装置の寸法は縦7.2cm、横9.5cmであり、軽量で非常にコンパクトである。また、振動測定装置の製作費は1万円程度であり、一般的なサーボ型加速度計の計器一式に比べてはるかに安価である。

(2) 3棟の木造建物において振動測定装置とサーボ型加速度計で建物の常時微動を測定した結果、測定波形から求めたフーリエスペクトルの固有振動数は概ね一致した。

(3) 木造建物2棟ではサーボ型加速度計によって1階と2階で常時微動測定を行い、測定波形から伝達関数を求めた。伝達関数から評価した固有振動数は2階で計測した振動測定装置とサーボ型加速度計によるフーリエスペクトルの固有振動数と概ね一致した。

謝辞：測定において家主の方々にご協力頂きました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小野祐輔, 清野純史, 小林 望, 新垣芳一, 高橋天平: 小型センサを用いた構造物の地震被害の即時判定法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No.1, pp.705-709, 2009.
- 2) 沼田 宗純, 太田賢治, 小林 明夫, 小松高廣, 目黒公郎: 小型振動台による Smart Phone 内蔵加速度センサの評価試験, 生産研究, Vol.62, No.6, pp.637-642, 2010.
- 3) 中村 充, 柳瀬高仁, 池ヶ谷靖, 圓幸史朗, 米山健一

- 郎：構造物のヘルスマニタリングを目指したスマート加速度センサの開発，日本建築学会技術報告集，Vol. 14，No.27，pp.153-158，2008.
- 4) 澤田茉伊，志波由紀夫，小国健二：加速度計測のための無線センサネットワークの実用的な時刻同期手法の開発，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 65，No. 1，pp.30-37，2009.
- 5) 村田製作所ホームページ：SCA103 データシート，http://www.murata.co.jp/products/sensor/pdf/sca103t_inclinometer.pdf
- 6) Linear Technology ホームページ：LT1168 データシート，<http://cds.linear.com/docs/jp/datasheet/j1168f.pdf>
- 7) Maxim Integrated ホームページ：MAX1044 データシート，<http://www.maximintegrated.com/jp/products/power/charge-pumps/MAX1044.html#modalDatasheet>
- 8) Contec ホームページ：AIO-160802AY-USB，http://www2.contec.co.jp/prod_data/aio160802ayusb/aio160802ayusb.pdf

PRODUCTION OF VIBRATION MEASURING EQUIPMENT USING HIGH ACCURATE INCLIMETER SENSOR

Hayato NISHIKAWA, Tomiya TAKATANI, Takeyoshi TSURI, Shigeo FUKUI and Masakatsu MIYAJIMA

We produce vibration measuring equipment using high accurate inclimeter sensor that was not used in the past studies related to MEMS sensor. Since high accurate inclimeter sensor has higher resolution and lower self-noises than general MEMS sensors, it is able to measure slighter vibration than the MEMS sensors. In order to examine performance of the equipment produced in this study, vibration characteristics of wooden house is investigated by measurement by using the equipment and servo type accelerometer. Natural frequencies of Fourier spectra of acceleration waves measured by this equipment are mostly corresponded to that measured by the servo type accelerometer. Moreover, natural frequencies of transfer function evaluated by servo type accelerometer are close to those of Fourier spectra.