

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)~5)}。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MEMS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を測定し、建物の振動特性を調べた。振動特性において、特に建物の耐震性と関連する指標として重要な固有振動数に着目し、測定装置とサーボ型加速度計による固有振動数の評価結果を比較した。

2. 振動測定装置

(1) 傾斜センサ

安価な振動測定装置を製作する上でMEMSセンサの利用が必要不可欠である。MEMSセンサにおいて加速度を計測できるセンサとして加速度センサ、傾斜センサがある。傾斜センサは重力加速度を測定し、それをもとに次式で得られる傾斜角を測定するものである。

$$\alpha = \sin^{-1}(a/g) \quad (1)$$

ここに α は傾斜角、 a は加速度、 g は重力加速度である。市販の加速度センサ、傾斜センサの中で最も性能が高い村田製作所製の傾斜センサSCA103T-D04⁶⁾を振動測定装置の製作に用いた。表-1にSCA103T-D04の主な特性を示す。比較のために、いくつかの研究^{3), 4)}で用いられているKionix社製の加速度センサKXM52-1050⁷⁾の特性を合わせて示す。表-1に示すようにSCA103T-D04の感度は16V/gであり、KXM52-1050の感度(1V/g)に対し高い分解能を有し、また、自己ノイズはKXM52-1050の1/5である。なお、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

表-1 SCA103T-D04とKXM52-1050の特性^{6), 7)}

	SCA103T-D04	KXM52-1050
感度(V/g)	16	1 (電圧5V時)
帯域幅(Hz)	18	3000 (XY方向), 1500 (Z方向)
自己ノイズ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	7	35 (XY方向), 65 (Z方向)
定格電圧(V)	4.75~5.25	2.7~5.5
軸	1方向	3方向
範囲(g)	± 0.26	± 2
出力	差動 (アナログ)	シングルエンド (アナログ)

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。一方、KXM52-1050を含む多くの加速度センサはシングルエンド出力であるため、共通モードノイズの影響が含まれてしまう。以上のように、傾斜センサSCA103T-D04は一般的なMEMS加速度センサに比べて、感度が高く、自己ノイズが小さいなどの特徴を持っていることから、微小な振動の測定に適している。

(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。

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

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LT1168⁸⁾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(3)⁸⁾から増幅率を計算することができる。

$$G = \frac{49400}{R_G} + 1 \quad (3)$$

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MAX1044⁹⁾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MAX1044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

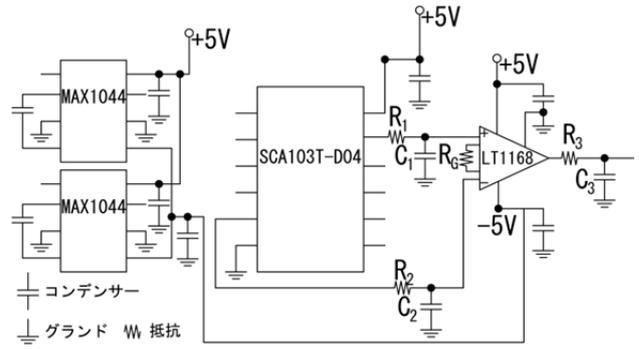


図-1 回路図

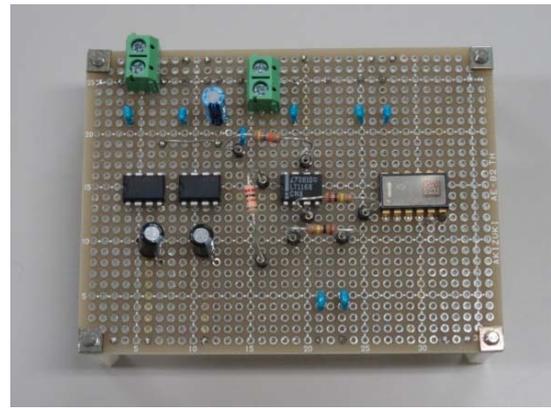


図-2 振動測定装置

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-USB¹⁰⁾によって計測した。AD変換の分解能は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、次式によって加速度に変換した。

$$A = \frac{980V}{2^{16} \cdot G} \quad (4)$$

ここに A は加速度振幅(cm/s^2)、 V は電圧(V)である。

3. 木造建物の振動測定結果

(1) 振動測定装置の測定条件

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。

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 サーボ型加速度計関係の計器(右から加速度計, 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	
B邸	51	2014/8/15, 2015/1/24		1階, 2階	
C邸	84年以上	2014/8/15		1階, 2階	
D邸	62	2013/12/30	2014/3/21	2階	

(2) サーボ型加速度計

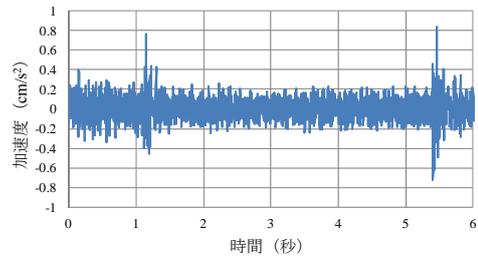
試作した振動測定装置の性能を確認するために、サーボ型加速度計による測定結果と比較した。測定にはミットヨ社製のサーボ型加速度計V405-BR, サンエス社製のプリアンプPA-9102(周波数範囲0.3~45Hz(-3dB)), リアルタイム音響振動解析装置DSA-Photon, 解析用ノートパソコンを用いた。表-2にサーボ型加速度計の主な特性, 図-3に測定で用いた計器を示す。音響振動解析装置のAD変換の分解能は24bitである。

(3) 対象建物

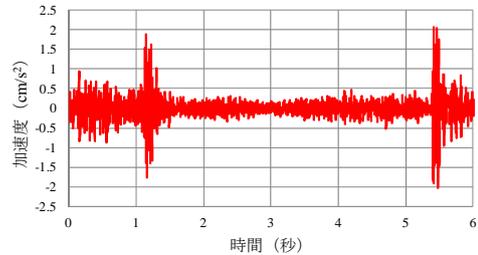
本研究では石川県内の4棟の2階建て木造建物で振動測定装置とサーボ型加速度計によって常時微動測定を行った。表-3に木造建物の築年数, 測定日, 測定場所を示す。

(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。両波形の振幅が異なる要因の一つとして、ローパスフィルタの

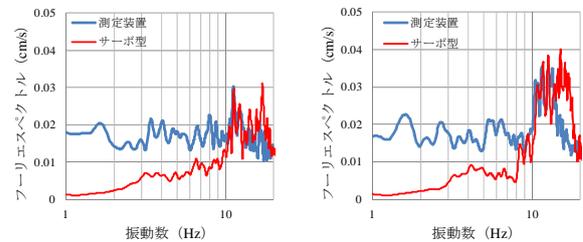


(a) 測定装置



(b) サーボ型

図-4 加速度波形 (A邸, 長辺方向)



(a) 長辺

(b) 短辺

図-5 A邸1階のフーリエスペクトルの一例

帯域幅の違いが考えられる。帯域幅は傾斜センサは15.9Hz, サーボ型は45Hzであり、15Hzでの応答はサーボ型の方が約30%, 20Hzでは約47%大きいことから、図-4のように高振動数成分の多い波形では最大振幅に差が生じた可能性がある。また、帯域幅以外にもアンプによる電圧の増幅率や自己ノイズレベルなどが波形の振幅の違いに影響を及ぼしたと考えられる。

続いて、加速度波形からフーリエスペクトルを求め、固有振動数を評価した。A~C邸では1階, 2階で測定を行ったが、図-5のA邸1階のフーリエスペクトルから明らかのように、10Hz以下では振動測定装置の振幅がサーボ型の振幅よりもかなり小さい。振動測定装置の10Hz以下の振幅は傾斜センサの測定範囲の下限値(自己ノイズレベル)に対応しているため、振幅が傾斜センサの測定範囲を下回る1階の振動を十分に測定できなかった。以上のことから、振動測定装置とサーボ型加速度計のフーリエスペクトルの比較を2階に対して行った。

図-6, 図-7, 図-8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, および, C邸の2階の加速度波形から求めたフーリエスペクトルの一例を

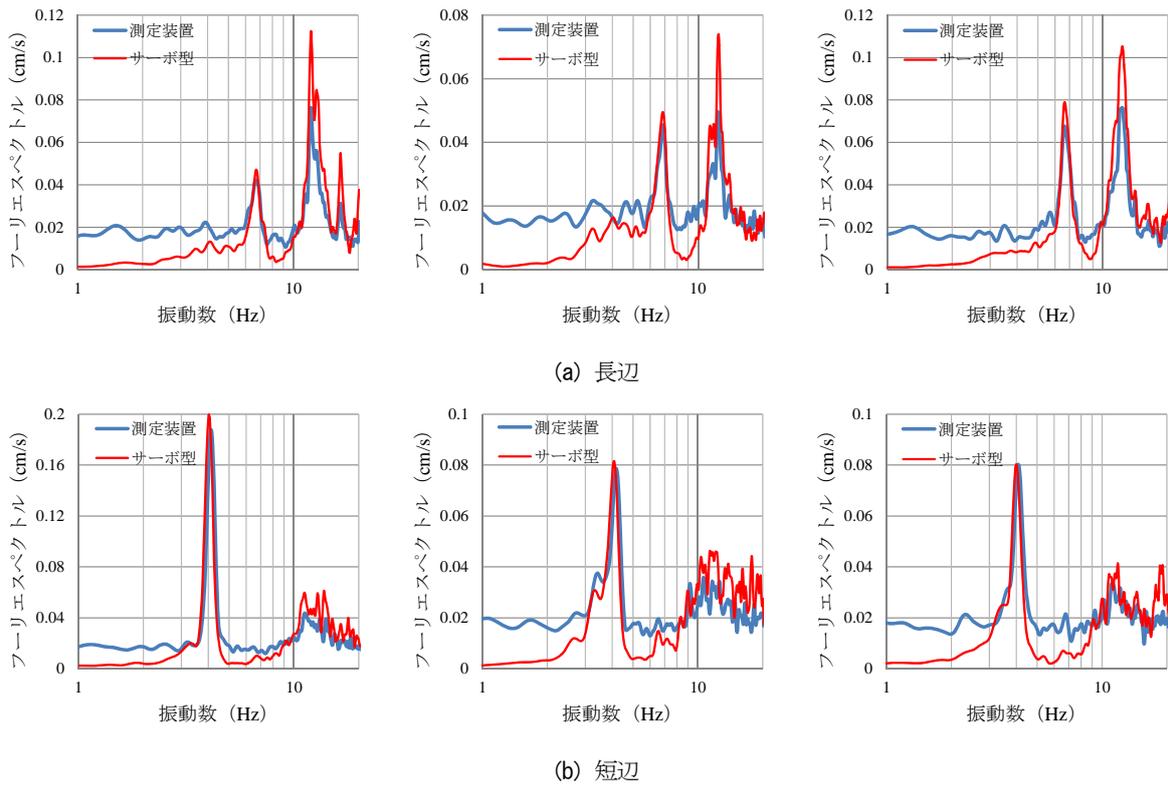


図-6 A邸2階のフーリエスペクトル

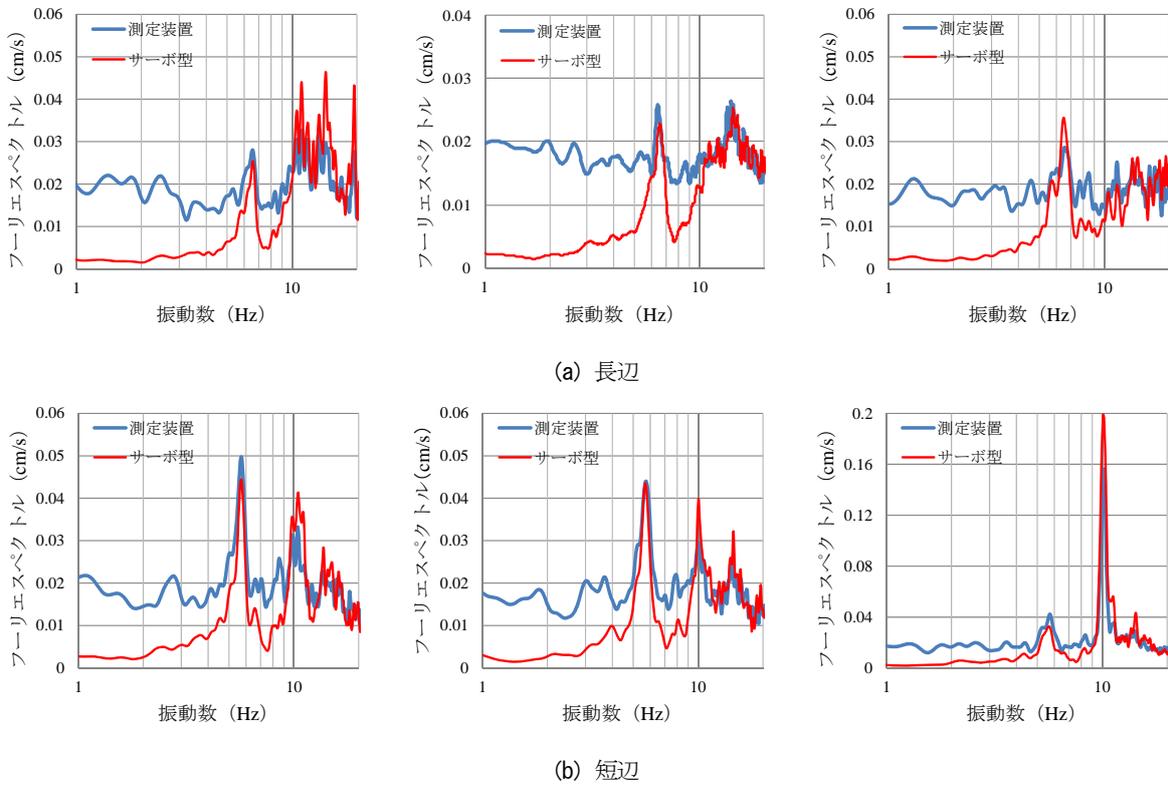


図-7 B邸2階のフーリエスペクトル

示す。サンプリング振動数は測定装置は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。

図-6のA邸2階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-7のB邸2階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。2次のピークは明瞭でないが、14Hz前後に見られる。一方、短辺方向のフーリエスペクトルでは測定装置、サーボ型ともに5.7Hz、10Hz付近に明瞭なピークが見られる。

図-8のC邸2階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3.4Hz付近に1次のピークがあり、短辺方向では4.2Hz付近に1次ピークが見られる。サーボ型のフーリエスペクトルを見ると、A邸、B邸に比べて振幅が小さく、振動測定装置の自己ノイズ

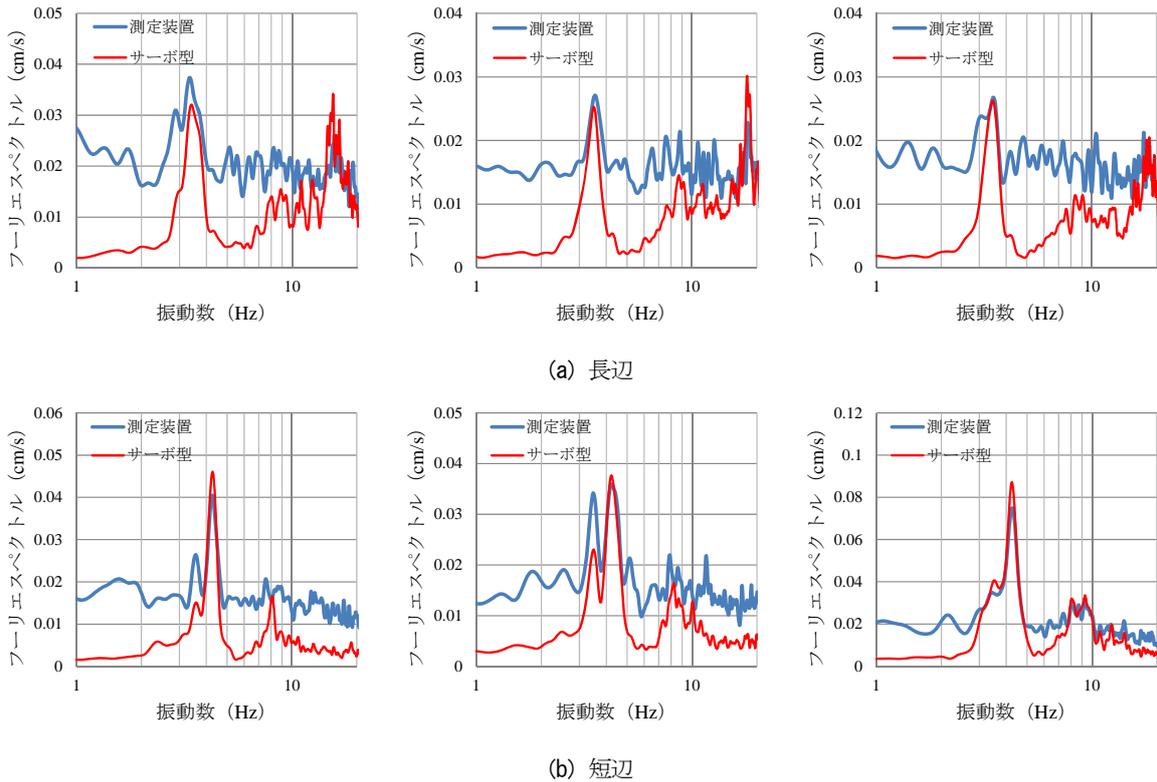


図-8 C邸2階のフーリエスペクトル

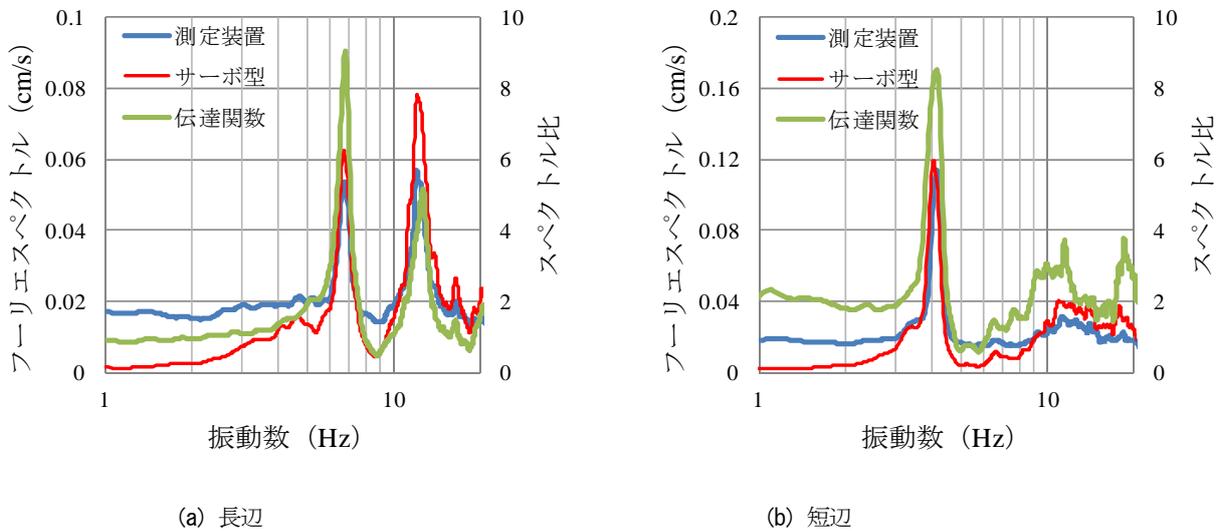


図-9 A邸2階のフーリエスペクトルと伝達関数の平均値

レベルを下回る振動数が多い。サーボ型のフーリエスペクトル振幅が小さい要因として、C邸が山間部に位置するため、人間活動に起因する振動が小さいことが考えられる。

これまでは各記録のフーリエスペクトルの特徴を見たが、続いて各記録のフーリエスペクトル平均値の特徴を調べる。また、建物の振動特性の評価には一般的に伝達関数が用いられていることから、伝達関数とフーリエスペクトルを比較した。振動測定装置では1階の微動の測定が困難なため伝達関数を評価できないが、2階のフーリエスペクトルと伝達関数の固有振動数が対応すれば、2階のフーリエスペクトルの固有振動数から建物の固有振動数を評価できると考えられる。

図-9、図-10、図-11にA邸、B邸、C邸の2階のフーリエスペクトルと伝達関数の平均値、図-12にD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D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ない。D邸の測定条件はA邸、B邸、C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。

図-9、図-10、図-11を見ると、C邸長辺方向の振動測定装置のフーリエスペクトルではサーボ型や伝達関数で見られる2次のピークが明瞭に現れていない。しかし、それ以外については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いることが分かる。次に図-12のD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、振幅は異なるものの、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。

表-4、表-5、表-6にA邸、B邸、C邸の2階の振動測定装

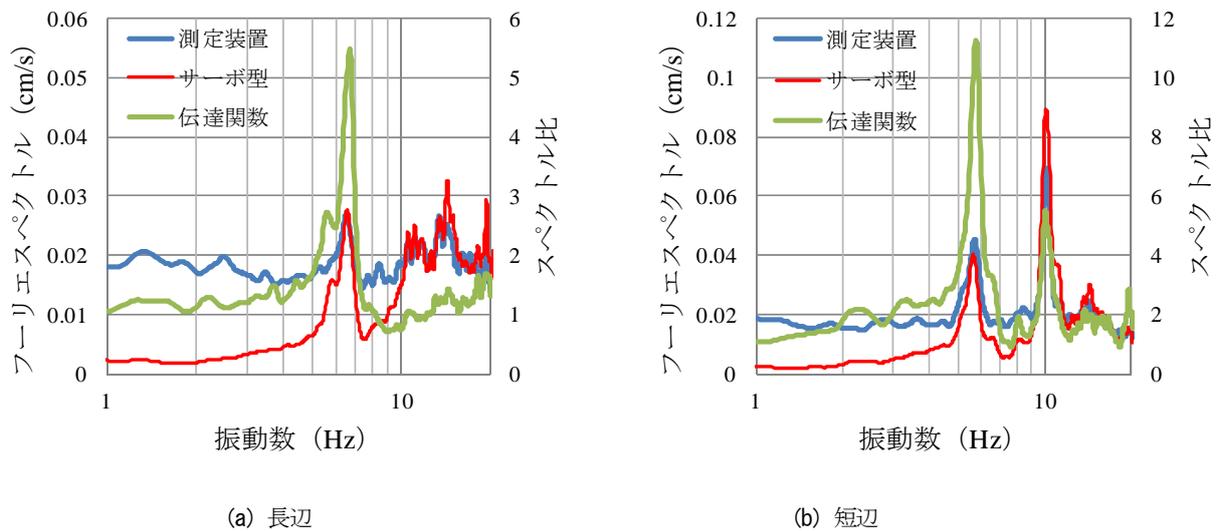


図-10 B邸2階のフーリエスペクトルと伝達関数の平均値

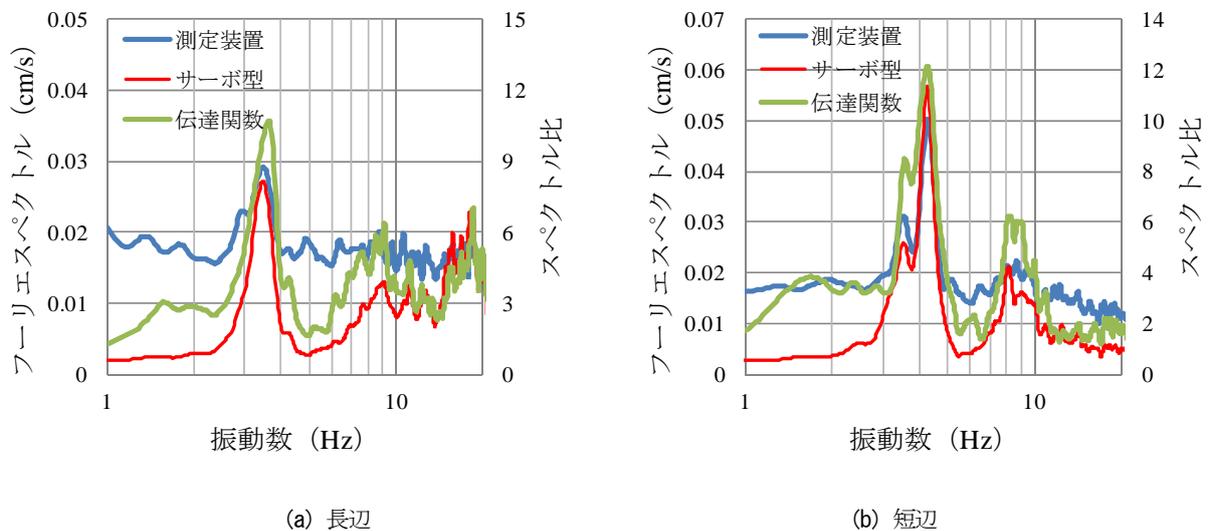


図-11 C邸2階のフーリエスペクトルと伝達関数の平均値

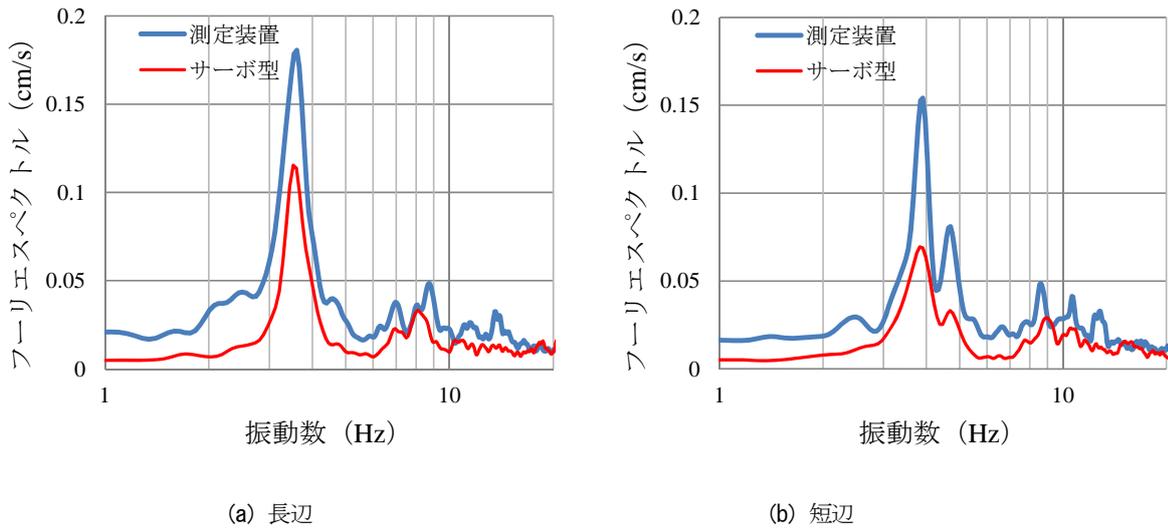


図-12 D邸2階のフーリエスペクトルの平均値

表-4 A邸2階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 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数	測定装置 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数
1次固有振動数(Hz)		6.74	6.72	6.81	4.15	4.03	4.12
2次固有振動数(Hz)		12.02	12.06	12.66	11.23	10.96	11.47

表-5 B邸2階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 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数	測定装置 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数
1次固有振動数(Hz)		6.50	6.56	6.66	5.71	5.69	5.78
2次固有振動数(Hz)		13.43	14.31	14.41	10.13	10.12	10.06

表-6 C邸2階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 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数	測定装置 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数
1次固有振動数(Hz)		3.48	3.47	3.63	4.27	4.25	4.25
2次固有振動数(Hz)		-	9.03	9.13	8.64	8.03	8.13

表-7 D邸2階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 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数	測定装置 フーリエスペクトル	サーボ型 フーリエスペクトル	サーボ型 伝達関数
1次固有振動数(Hz)		3.60	3.52	-	3.85	3.83	-
2次固有振動数(Hz)		6.96	6.95	-	4.70	4.69	-

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. C邸長辺の振動測定装置のフーリエスペクトルには明瞭な2次のピークが見られなかったため, 2次固有振動数を示していない. また, 表-7にD邸2階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. 図-13には測定装置とサーボ型のフーリエスペクトルの固有振動数の対応, 図-14には測定装置のフー

リエスペクトルの固有振動数とサーボ型から求めた伝達関数の固有振動数の対応を示す.

表-4, 表-5, 表-6を見ると, 測定装置とサーボ型のフーリエスペクトル, および, サーボ型の伝達関数の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-7のD邸の1次固有振動数, 2次固有振動数も近い値となっている. 図-13, 図-14からも, 振動測定装置とサーボ型の固有振動数が対応していることが分かり,

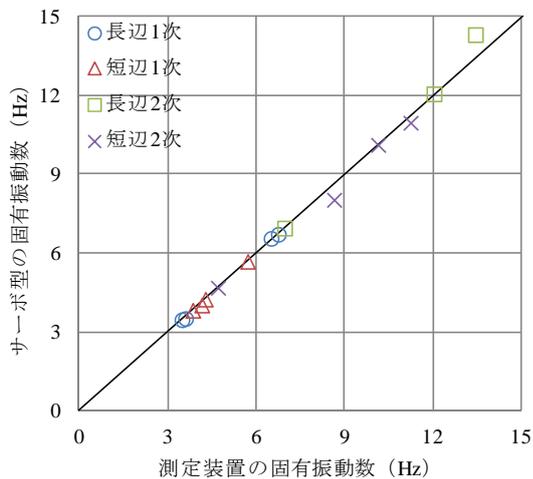


図-13 測定装置とサーボ型のフーリエスペクトルの固有振動数の対応

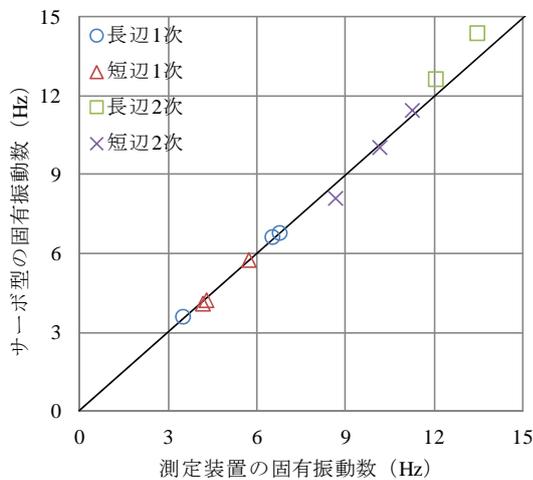


図-14 測定装置のフーリエスペクトルとサーボ型の伝達関数の固有振動数の対応

試作した振動測定装置によって建物の固有振動数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MEMS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。試作した測定装置とサーボ型加速度計によって、4棟の木造建物で振動測定を行い、それらの波形からフーリエスペクトルなどを求めた。また、建物の耐震性と関連する指標として重要な固有振動数を評価し、測定装置とサーボ型の結果を比較した。以下に本研究の結果をまとめる。

(1) 高精度MEMS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) 4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、2階の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3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、振動測定装置によって2階で計測した波形のフーリエスペクトルの固有振動数と概ね一致した。振動測定装置では1階の微動測定を十分に行えないが、2階で計測したフーリエスペクトルの固有振動数が伝達関数の固有振動数と対応したことから、建物の固有振動数を調べる上で振動測定装置が有用であると考えられる。

今後は傾斜センサを並列接続することにより、自己ノイズの低減をはかり、建物1階の振動の測定が可能になるように、振動測定装置を改良する予定である。

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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 澤田茉伊, 志波由紀夫, 小国健二: MEMS センサを用いた無線加速度センサシステムの開発, 大成建設技術センター報, 第43号, pp.09-1-09-6, 2010.
- 5) 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.
- 6) 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 (2014年8月25日閲覧)
- 7) 秋月電子通商ホームページ: KXM52 Series データシート, <http://akizukidenshi.com/download/KXM-52.pdf> (2015年1月18日閲覧)
- 8) Linear Technology ホームページ: LT1168 データシート, <http://cds.linear.com/docs/jp/datasheet/j1168f.pdf> (2014年8月25日閲覧)
- 9) 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 (2014年8月25日閲覧)

(2014.11.12 受付, 2015.3.9 修正, 2015.3.9 受理)

10) Contec ホームページ : AIO-160802AY-USB ,
http://www2.contec.co.jp/prod_data/aio160802ayusb/aio160802ayusb.pdf
f (2014年8月28日閲覧)

DEVELOPMENT OF VIBRATION MEASURING EQUIPMENT USING HIGH ACCURATE INCLIMETER SENSOR

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

We develop vibration measuring equipment using high accurate inclinometer sensor that was not used in the past studies related to MEMS sensor. Since high accurate inclinometer 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 developed 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.