

MEMS技術を活用した寺院建築の振動計測に関する研究

Study on vibration measurement of temple architecture utilizing MEMS technology

松本慎也¹・光井周平²・大久保孝昭³・藤谷義信⁴

Shinya Matsumoto, Syuhei Mitsui, Takaaki Ohkubo and Yoshinobu Fujitani

¹近畿大学准教授 工学部建築学科 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

Associate Professor, Kinki University, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering

²呉工業高等専門学校助教 建築学科 (〒737-8506 呉市阿賀南2-2-11)

Assistant Professor, Kure National College of Technology, Dept. of Architecture and Structural Engineering

³広島大学大学院教授 工学研究院 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Professor, Hiroshima University, Faculty of Engineering

⁴広島大学名誉教授

Emeritus, Hiroshima University

Many traditional temple architecture is built in Japan. However, Japan is an earthquake-prone country. In order to maintenance these traditional temples, more rational building maintenance systems are demanded in Japan. In this study, the technology to support more effective repair planning methods for the traditional temples is considered. We built the wireless monitoring system using the MEMS(micro-electro-mechanical systems) technology. In this paper, we investigate the effectiveness of the monitoring system. And we shows the results of measuring the Jodoshinshu temples in Yamaguchi Prefecture, which was measured to accumulate the basic sample data.

Keywords : microtremor measurements, temple,

1. はじめに

我が国には、全国各地に数多くの寺院建築が存在しており、地域コミュニティーの中心的な存在を担いながら地域環境が構築されてきた。これらの寺院建築は、建築年代や建物規模など種々存在するが、所有者および管理団体により定期的に維持保全がなされることで今日に至っている。しかしながら、地震国である我が国において伝統的建築物を維持管理していくためには、より合理的で高度な維持保全システムの構築が求められている。本研究ではこのような伝統的建築物の維持保全のために、より効果的な補修改修を計画するための技術を支援する目的で、MEMS（微小電気機械システム）技術を活用した無線モニタリングシステムによる常時微動計測を行い、その有効性について検討するものである。伝統的建築物の微動計測に関する先行研究¹⁾²⁾は数多く報告されており、その挙動に関する研究成果は蓄積されつつあるものの、複雑な振動挙動をより正確に把握するためには、現場でより簡単かつ堅牢に使用できる計測システムの構築が望まれている。本論文では基礎資料を蓄積する目的で実施した山口県内のほぼ同じ建物規模である浄土真宗寺院3棟の微動計測の結果について示し、これらのデータから寺院建築の振動特性とMEMS技術の有効性について考察を行った。

2. 振動計測概要

計測には、広島大学で開発された無線通信ユニットを用いた高感度3軸加速度計を用いた（写真1参照）。本計測機器は長距離（通信距離100m）のBluetooth通信規格による無線通信方式を採用しており、床下や軒上、天井裏などの有線式では配線が困難な場所にもセンサーを容易に設置できる特徴がある。今回使用した

加速度センサーの仕様は以下に示す 2 種類であり、小型の加速度計（MEMS サーボ型）は梁上などの高い位置に設置し、大型の加速度計（過減衰型加速度計）は、梁上に設置するのが困難なために床上などの低い位置に設置して計測に用いた。

センサー機種

- ①～③ 小型加速度センサー
方式：MEMS サーボ型（Colibrys 社 SF3000L）
加速度検出範囲 $\pm 3g$ ($\pm 29.4m/s^2$, $\pm 2940gal$)
ノイズレベル： $300 ng_{rms}/\sqrt{Hz}$
- ④～⑦ 大型加速度センサー
方式：過減衰型加速度計（Mitutoyo 社 JEP-6A3）
加速度検出範囲 $\pm 2000gal$ (出力感度 $1.02V/m \cdot s^{-2}$)
ノイズレベル： $0.2 \mu V$ 以下



写真1 MEMS 計測機器

3. 測定建物

(1) 寺院A (山口県下松市)

山口県下松市における寺院 A では振動計測は、2 パターンについて微動計測を実施した。パターン 1 は、建物全体の振動特性を検討するための計測計画であり、計測位置を図 1～図 3 に示す。また、パターン 2 は主要な構面（南北 1 構面）に対する振動性状を検討するための計測計画であり、計測位置を図 4 に示す。



写真2 寺院A 全景(2011.3.20 撮影)

現本堂の建設・改修工事記録

- 1804 年 建立 (当時の棟札あり)
- 1926 年 本堂・山門修復 [既存の瓦をそのまま使ったもの、左右の鬼瓦も製造年代が異なる]
- 1986 年 本堂・山門昭和修復
- 1997 年 内陣修復
- 2005 年 門信徒会館新築

築 207 年 (調査年 2011 年現在)

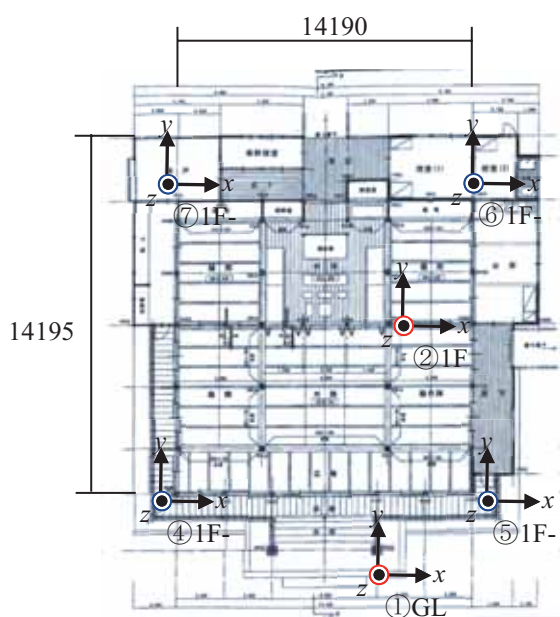


図1 計測位置 (1階平面図)

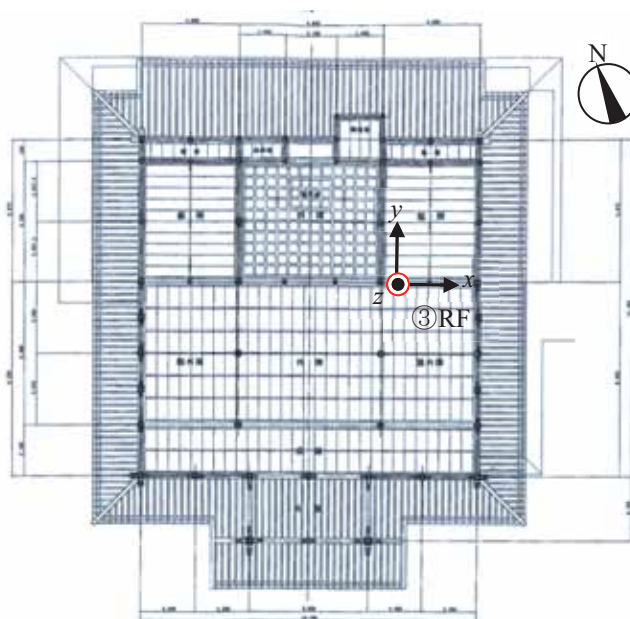


図2 計測位置 (天井伏図)

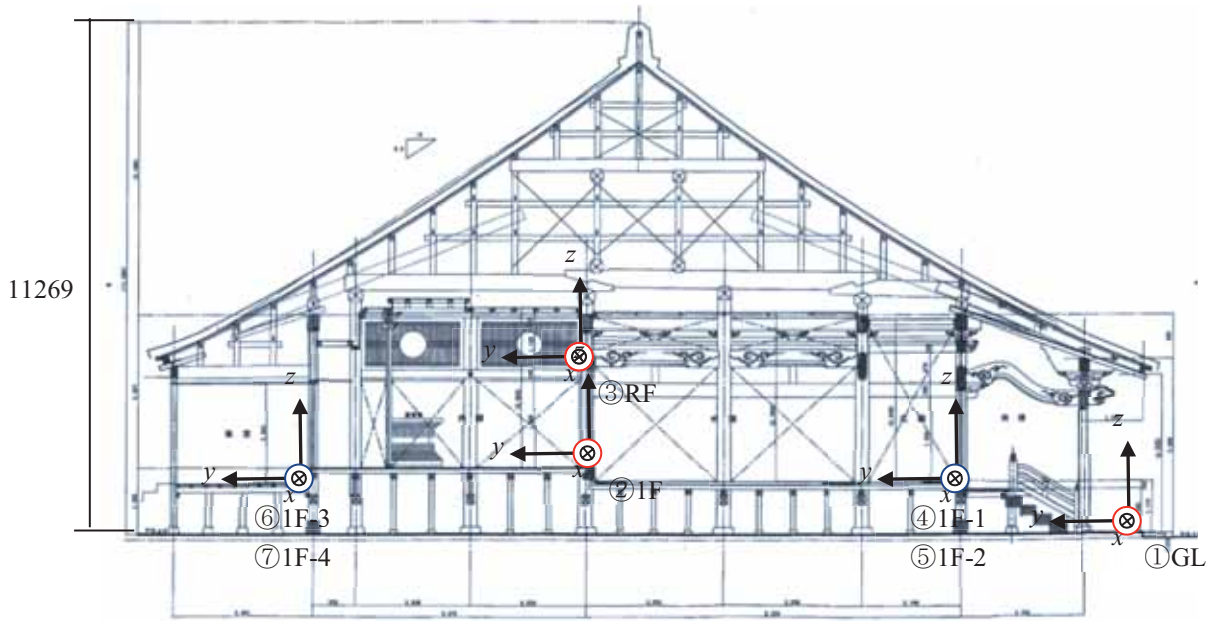


図3 計測パターン1 センサー位置 (断面図)

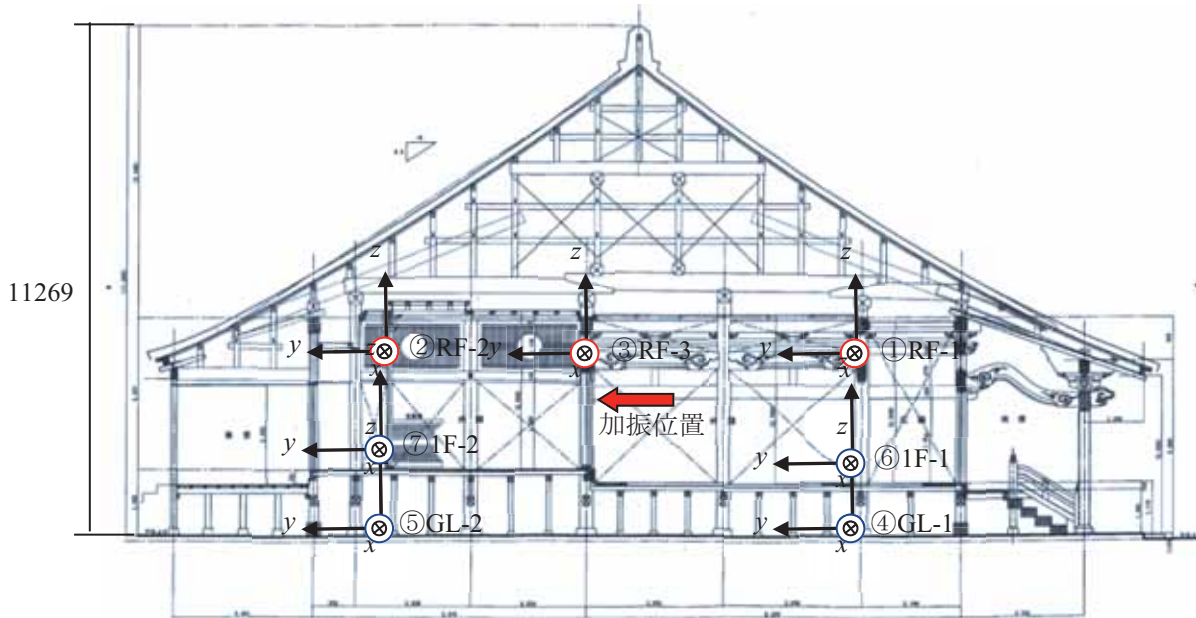


図4 計測パターン2 センサー位置 (断面図)

各センサーの設置状況を写真3～写真8に示す。



写真3 測定地点① GL



写真4 測定地点② 1F



写真5 測定地点③ RF



写真6 測定地点④ 1F-1

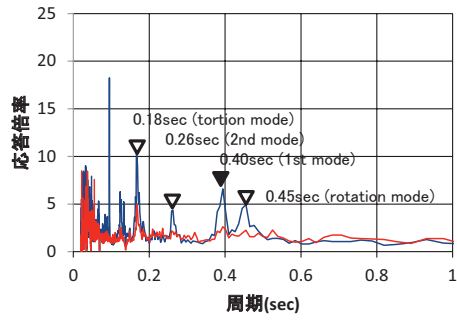


写真7 測定地点⑤ 1F-2

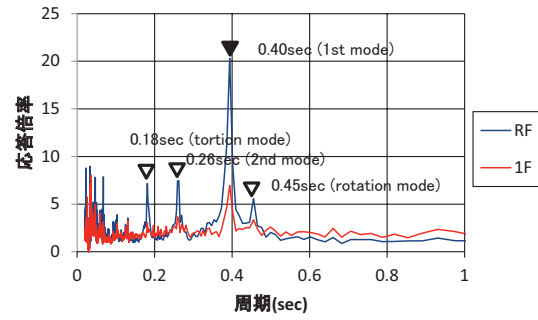


写真8 測定地点⑥ 1F-3

計測結果 (伝達関数)

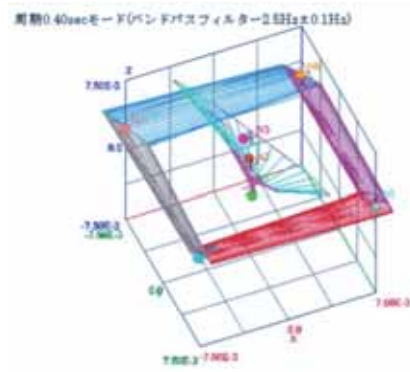


X方向

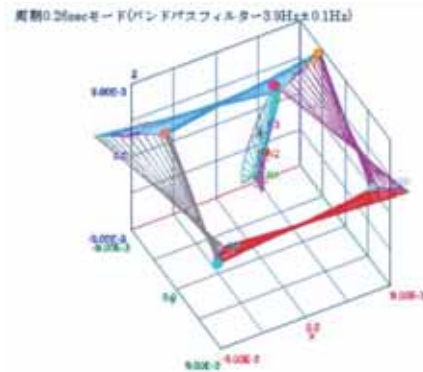


Y方向

図5 伝達関数 (建物-地盤連成系) (計測パターン1)

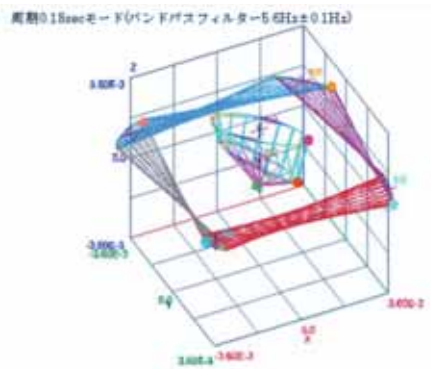


1次モード (周期 0.40sec)

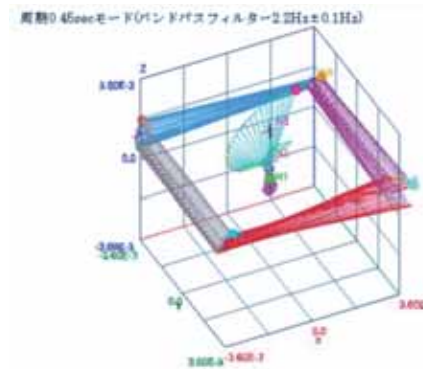


2次モード (周期 0.26sec)

図6 振動モード



ねじりモード (周期 0.18sec)



回転モード (周期 0.45sec)

図7 振動モード

100Hz サンプリングで 5 分間（300 秒間）計測した微動波形から 2048 データを 1 セットとして抽出したフーリエスペクトルにおける地盤上（センサー①GL）と建物梁上（センサー③RF）とのスペクトル比によって算出した複数の伝達関数の平均値を図 5 に示す。図は X 方向（EW 方向）、Y 方向（NS 方向）に対する伝達関数を示す。また、各卓越周期に対するバンドパスフィルタ処理を実施し、各測定点の振動波形をつなぎ合わせた振動モード図を図 6～図 7 に示す。これらの図より、寺院 A の固有周期は 0.40sec であると推定され、南北方向（NS 方向）に主要な振幅をもつ振動モードであることがわかる。また、高次の振動モード（2 次モード：周期 0.26sec、ねじれ振動モード：周期 0.18sec）や建物の回転振動モード（周期：0.45sec）が確認された。

計測パターン 2 では、建物に対し人力加振実験を実施した。加振位置は、図 4 に示す矢印の位置の柱である。前述同様にフィルタ処理を実施し、各測定点の振動波形をつなぎ合わせた振動モード図（周期 0.40sec）を図 8 に示す。図より、1F 床レベルに配置したセンサー（⑥1F-1、⑦1F-2）の応答は上部の応答に比べ小さいながらも建物全体の 1 次モードに対する振動挙動を示していることが確認された。また人力加振による強制変位振動波形から抽出した自由振動波形を図 9 に示す。この振動波形から振幅比（片振幅）を抽出し、対数減衰定数を算出すると、減衰定数は $h=0.021$ であった（図 10 参照）。

周期 0.40sec モード(バンドパスフィルター-2.5Hz±0.1Hz)

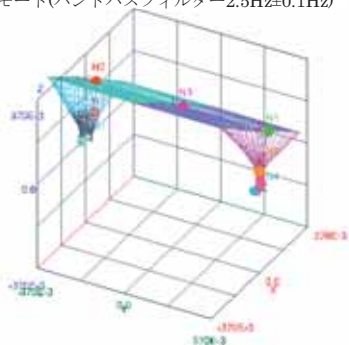


図 8 計測パターン 2・人力加振・自由振動モード（周期 0.40sec）

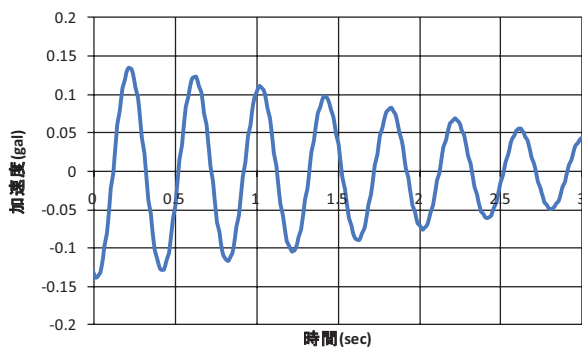


図 9 人力加振・自由振動波形（③RF-3 y 方向）

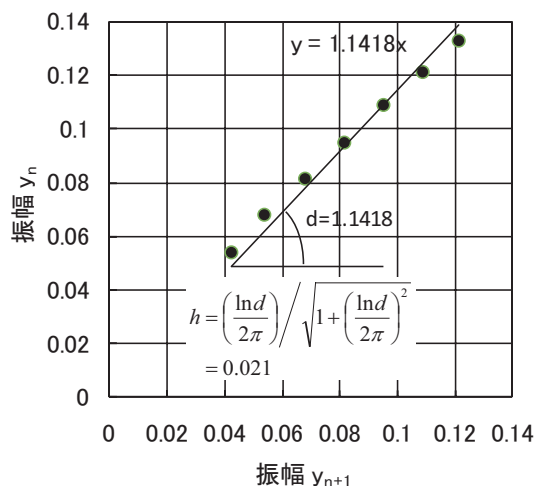


図 10 対数減衰率の算出

柱の傾斜角度計測

寺院 A については主要な柱の傾斜角度を測定した。測定した柱は図 11 に示す計 20 か所であり、図中に示す座標系に対し、x 方向、y 方向のそれぞれ 2 方向に対し計測を行った。計測には下げ振りをを用い、柱頭、柱脚の傾斜を計測した。図中に柱の傾斜方向を図示する。また、表 1 に計測結果を示す。これらの図表より、柱は最大で 1/75 程度傾斜していることがわかる。また、柱の多くは、北に向かって傾斜している傾向が確認された。この方向は常時微動における 1 次モードの振幅方向と一致しており、建物の常時微動によって得られた振動特性と柱の傾斜に関して、今後長期間にわたり経年変化に対するデータを蓄積するなどの追跡調査が望まれる結果であった。

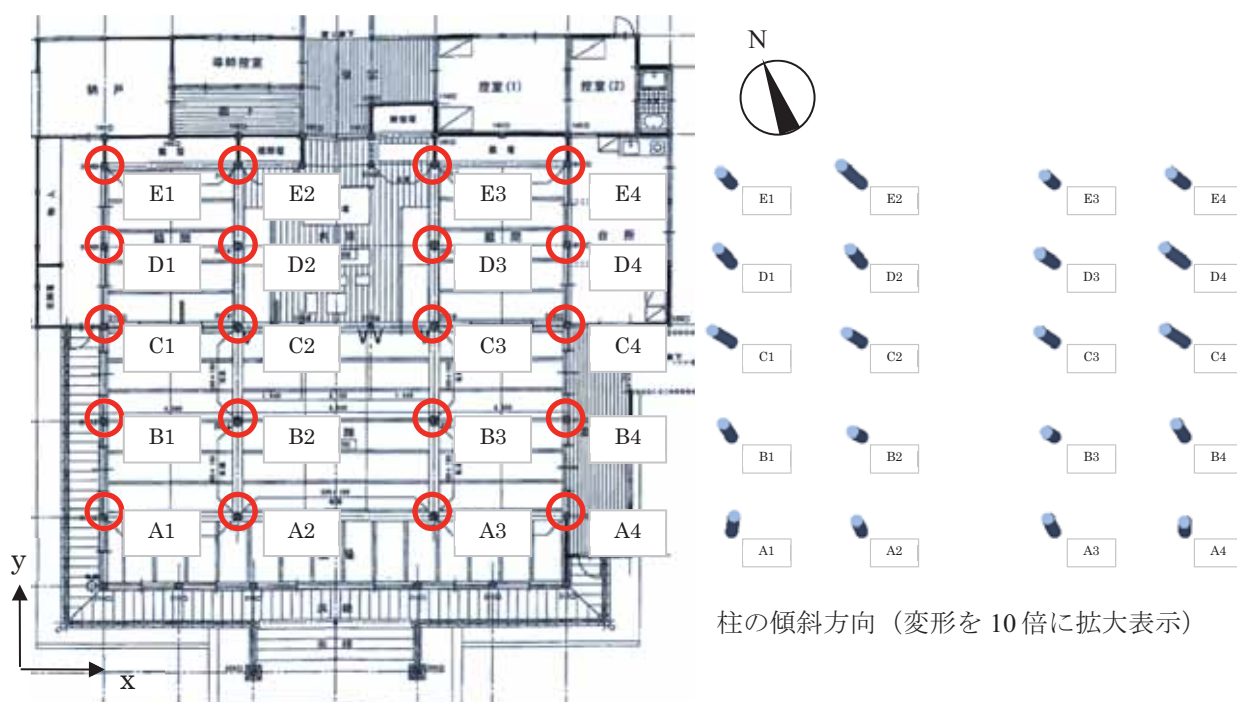


図 11 傾斜計測箇所 (計 20 か所)

表 1 柱の傾斜角度

X 方向 (EW 方向)

Y 方向 (NS 方向)

	1	2	3	4
E	-1/141	-1/74	-1/153	-1/110
D	-1/116	-1/132	-1/105	-1/75
C	-1/80	-1/101	-1/101	-1/77
B	-1/184	-1/160	-1/184	-1/175
A	1/620	-1/297	-1/220	-1/2199

	1	2	3	4
E	1/127	1/81	1/169	1/135
D	1/105	1/109	1/155	1/100
C	1/127	1/158	1/143	1/116
B	1/112	1/285	1/321	1/116
A	1/98	1/137	1/115	1/156

(2) 寺院B (山口県防府市西浦)

寺院 B (山口県防府市西浦) では寺院 A の計測パターン 1 と同様の計測点にセンサーを配置することで、建物の微動計測を実施した。写真 9 に寺院 B の全景写真を示す。



写真 9 寺院 B 全景(2011.6.18 撮影)

前節同様に 100Hz サンプリングで 5 分間 (300 秒間) 計測した微動波形から算出した平均伝達関数 (地動に対する建物の応答倍率) を図 12 に示す。また、各卓越周期に対するバンドパスフィルタ処理を実施し、各測定点の振動波形をつなぎ合わせた振動モード図を図 13 に示す。寺院 B の固有周期は 0.38sec であると推定された。また、高次の振動モード (2 次モード: 周期 0.24sec) が確認された。

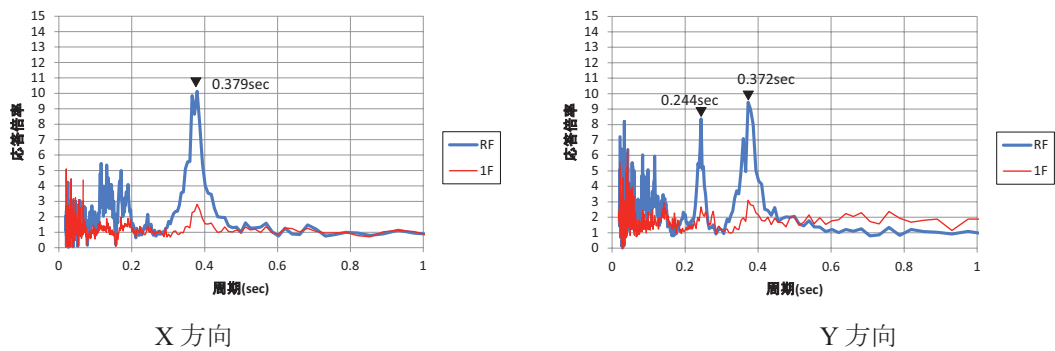


図 12 伝達関数 (建物-地盤連成系)

バンドパスフィルター-2.6Hz (0.38sec) ±0.1Hz

バンドパスフィルター-4.1Hz (0.24sec) ±0.1Hz

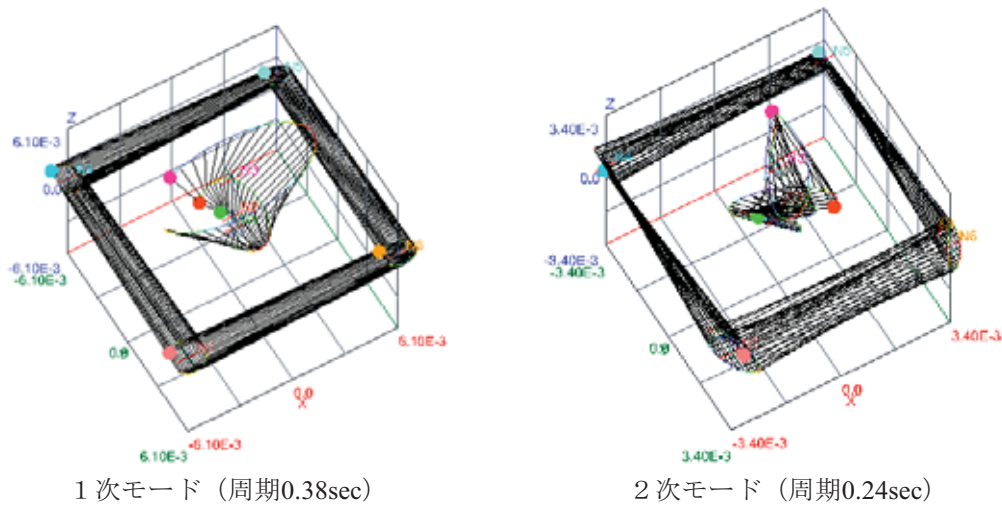


図 13 振動モード

(3) 寺院C (山口県防府市大道)

寺院 C (山口県防府市大道) でも寺院 A の計測パターン 1 と同様の計測点にセンサーを配置することで、建物の微動計測を実施した。写真 10 に寺院 C の全景写真を示す。同様の結果を図 14, 図 15 に示す。寺院 C の固有周期は 0.43sec であると推定された。



写真 10 寺院 C 全景(2011.6.18 撮影)

以上に示した寺院A、寺院B、寺院Cの3つの建物の固有周期の一覧を表 2にまとめて示す。今回計測した寺院の固有周期は0.38~0.42secの範囲であり、既往の研究で報告されている一般的な寺院建築の固有周期と同程度の値であった。また無線計測システムによる多点同時計測により複雑な寺院建築の振動特性を効果的に計測し把握することができた。

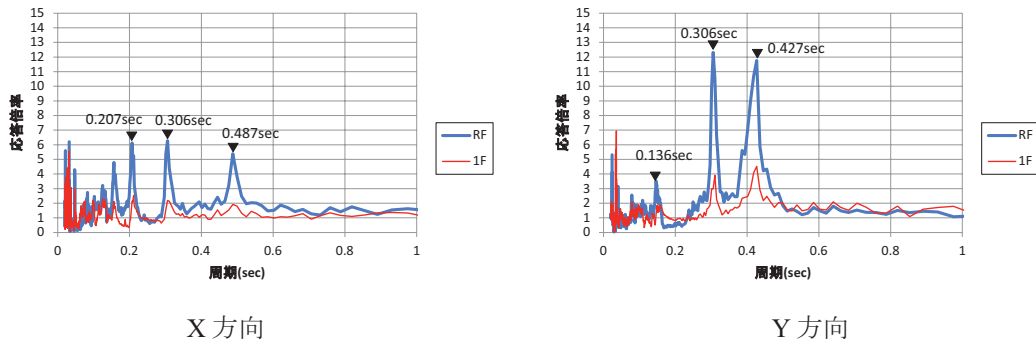
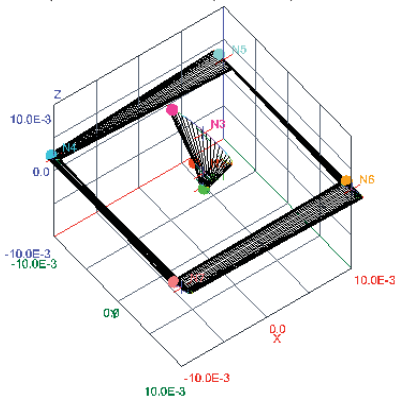


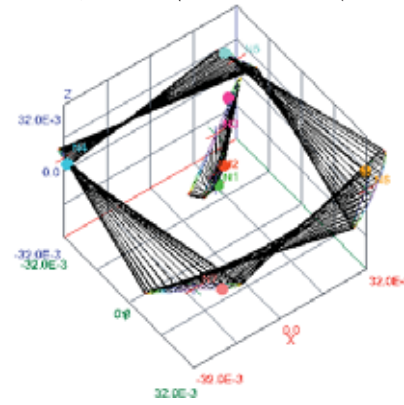
図 14 伝達関数 (建物-地盤連成系)

バンドパスフィルター2.3Hz (0.43sec) \pm 0.1Hz



1次モード (周期0.43sec)

バンドパスフィルター3.3Hz (0.30sec) \pm 0.1Hz



2次モード (周期0.30sec)

図 15 振動モード

表 2 固有周期の比較

	1次モード(sec)	2次モード(sec)
寺院A	0.40	0.26
寺院B	0.38	0.24
寺院C	0.43	0.30

4. まとめ

本研究では伝統的建築物の維持保全のために、より効果的な補修改修を計画するための技術を支援する目的で、MEMS技術を活用した無線モニタリングシステムによる常時微動計測を行い、その有効性について検討した。そして基礎資料を蓄積する目的で実施した山口県内の浄土真宗寺院の微動計測の結果について示し、これらのデータから寺院建築の振動特性とMEMS技術の有効性について考察を行った。その結果、寺院建築は非常に複雑な振動特性を有しており、微動計測をする際には、数多くの同時計測点を設けることが重要であることが示された。また、本計測システムは、無線通信方式による多地点同時計測が可能であり、寺院建築のような建築空間に対し、容易に多地点同時計測が可能であることが確認された。

今後の展望としては、伝統木造建築物の動的構造特性を補修改修の専門業者及び一般ユーザーに目に見える形で情報を提供することで、建築物の耐震安全性に関する診断技術の高度化に寄与する効果が期待される。また、通常行われている建物診断業務の標準的調査項目として低コストで広く普及させることができれば、診断技術の高精度化の確立に寄与し、これらの計測データを継続的に蓄積してゆけば建物の長期維持管理の支援技術となるなどの効果が期待される。

参考文献

- 1) 太田 外氣晴, 尾内 俊夫, 小川 浩: 寺院建築の耐震性向上に関する研究: その1:実在寺院の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.41-42, 2004.8.
- 2) 中村 香織, 齊藤 雅人, 宮本 俊輔, 入江 康隆, 宮澤 健二, 後藤 治: 寺院建築の耐震診断・耐震補強について: その5.常時微動測定について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.37-38, 2004.8.