

常時微動観測に基づく江戸中期三重塔の振動特性推定

Vibration Characteristics Estimation of Three-storied Pagoda of the Middle of Edo Period Based on Microtremor Measurements

三辻和弥¹・永井康雄²・佐々木達夫³・クアドラ カルロス⁴

Kazuya Mitsuji, Yasuo Nagai, Tatsuo Sasaki and Cuadra Carlos

¹東北大学助教 工学研究科都市・建築学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

Assistant Professor, Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dept. of Architecture and Building Science

²山形大学教授 地域教育学部生活総合学科 (〒603-8341 山形県山形市小白川町1-4-12)

Professor, Yamagata University, Faculty of Education, Art and Science, Dept. of Art and Culture

³東北大学技術職員 工学研究科都市・建築学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

Technical Officer, Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dept. of Architecture and Building Science

⁴秋田県立大学准教授システム科学技術学部建築環境システム学科 (〒980-8579 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口84-4)

Associate Professor, Akita Prefectural University, Fac. of Systems Sci. and Technology, Dept. of Architecture and Env. Sci.

The authors conducted microtremor measurements at the site of the three-storied pagoda constructed in the middle of Edo period (1700's) and investigated its vibration characteristics. The first natural frequency is estimated about 2Hz and the second one is about 4Hz considering soil-structure interaction. The second layer and the first layer of this pagoda seem to behave in phase about 4Hz based on the results of phase difference and coherency function. Orbits of displacement show the diagonal principal axis in 4Hz that is corresponding to the second natural frequency. The results in this paper are expected to help the future plan of the seismic retrofit of this pagoda.

Key Words : *three-storied pagoda, microtremor measurements, vibration characteristics*

1. はじめに

(1) 背景および目的

五重塔や三重塔など多層塔の文化財としての価値は高く、現在までに五重塔、三重塔それぞれ10基あまりが国宝に指定されており、重要文化財や県指定文化財などに指定されているものまで含めるとさらに多数に上る。こうした多層塔の多くは江戸時代以前に建立されており、その建築構造的な性質、とりわけ振動特性は十分に明らかにされているとは言い難い一方、近年多発する地震や強風などの災害にさらされる危険は増加していると言える。直近の事例では、2008年岩手・宮城内陸地震の際にも宮城・岩手・秋田の3県において、数多くの歴史的建築が被災している。こうした状況を背景に、近年、全国各地で文化財を始め歴史的建築の耐震診断や耐震補強が実施・計画されている。しかし地震や強風による動的な荷重を受ける際の挙動は地震観測や常時微動観測など観測記録からの推定や実験などで得られた復元力特性に基づく地震応答解析によって予測することが必要である。著者らはこれまで常時微動観測により歴史的建築の振動特性を推定する試みを行ってきた¹⁾。本論では福島県いわき市に現存する、江戸時代中期に建立された三重塔において実施した常時微動観測記録から、三重塔の振動特性を推定した結果について報告する。

(2) 既往の研究

多層塔は耐震性について優れた性能を持っていることが古くから知られており、建築構造学や地震工学の観点から多くの研究が行われてきた²⁾。例えば、五重塔については強風による倒壊の記録はあるが、地震による倒壊の記録はないとされている。大森は法隆寺など五重塔6基について常時微動および人力加振による振動計測を行い固有周期の推定、振動メカニズムの検討を行っている³⁾。山辺・金井は全国各地の五重塔についての常時微動観測や起振機による強制加振実験、地震観測を行い、五重塔上部の振動の軌跡が対角線方向に主軸を持つ傾向があることや第五層の観測記録の自己相関関数の包絡線が直線的であることを指摘し、大地震時には摩擦力による減衰効果が大きくなることを推定している⁴⁾。近年では模型による五重塔の風応答特性に関する実験⁵⁾や、実在する五重塔での微動観測や強震動観測⁶⁻⁹⁾、解析的検討⁹⁾、さらに2004年に防災科学技術研究所で行われた大型振動台による1/5スケールの模型実験などからその振動特性を明らかにしようとする研究が進められている¹¹⁾。

2. 高蔵寺三重塔における常時微動観測

(1) 観測対象建物概要

観測対象建物は高蔵寺三重塔である。高蔵寺は福島県いわき市南部の海岸線から5kmほど内陸に入った小高い丘の上に位置している。三重塔は本堂のある敷地からさらに少し標高の高い敷地にあり、塔身のすぐ近くには斜面が存在している。福島県教育委員会によると、高蔵寺は大同二年（807年）に開かれ、江戸時代中期に現在地に移転したとされる。三重塔は安永二年（1774年）ごろの建立とされ、方三間、柱間は小さく、上層への低減や二、三層の軒高が等高になっているなど、塔建築の様式を踏襲しているが、二、三層には回廊や高欄を付さないなどの省略が見られる。斗拱は三手先、中備えを省き、軒は二重の繁極で平行とするなど、全般的に和様が目立ち、頂部の相輪は九輪が特に大きいのが特徴である。また高蔵寺によれば¹²⁾、塔は一辺の長さは初層3640mm、第2層3090mm、第3層2550mm、各層の高さは初層が3450mm、第2、第3層は2900mmの三間三重塔婆であり、相輪まで含め、15.8m（52尺）程の高さである。屋根については現在は銅板葺きであり、心柱は初重天井に立つ形式である。写真1、写真2に三重塔全景の写真および内部を第1層から見上げた様子の写真を示す。

(2) 常時微動観測

高蔵寺三重塔の基本的な振動特性を把握するために常時微動観測を行った。観測には東京測振社製のサーボ型速度計VSE-15Dを用いた。速度計は塔身の第2層の梁上と第1層または地盤に設置した。地盤の観測点は塔身から5mほど離れた石畳上に設置した。第2層の梁上と第1層の速度計設置位置はできるだけ同じ柱に近い位置としている。各箇所でも水平2方向、上下1方向の計3成分について観測を行っている。計測時間は1回あたり10分間で、目的に応じて速度計の設置位置を移動しながら複数回観測を実施した。観測の組み合わせは①地盤と第2層、②第1層と第2層、③地盤と第1層の3種類である。なお、サンプリング周波数は100Hzとした。



写真1 高蔵寺三重塔全景



写真2 塔内部の様子（第1層から見上げたところ）

3. 常時微動観測記録のフーリエ解析に関する考察

(1) フーリエスペクトル

図3には第2層、第1層、および地盤でのフーリエスペクトルをEW、NS方向について示す。ここで若干の方位の振れはあるが、塔身正面に向かう参道を軸とする方向をEW方向、それに直行する方向をNS方向とした。解析には計測時間10分間のうちから比較的安定した40.96秒間の区間を10区間取り出して用いている。図3にはすべての解析ケースの結果を重ねて示した。塔身第2層、第1層とも2Hz付近に最初の明瞭なピークがあり、1次固有周波数に対応すると考えられる。4Hz、5.3Hzにも明瞭なピークがあり、それぞれ高次の固有周波数にあたると思われる。ただし第1層のEW方向は5.3Hzのピークが見られない。地盤については0.5Hz付近に明瞭なピークが見られるが、敷地が海岸線から約5kmの距離に位置しているため、これが地盤の卓越周波数を表すものか、脈動などの影響なのかは議論の余地があるところである。地盤に見られる0.5Hz付近のピークは塔身のフーリエスペクトルにも現れている。

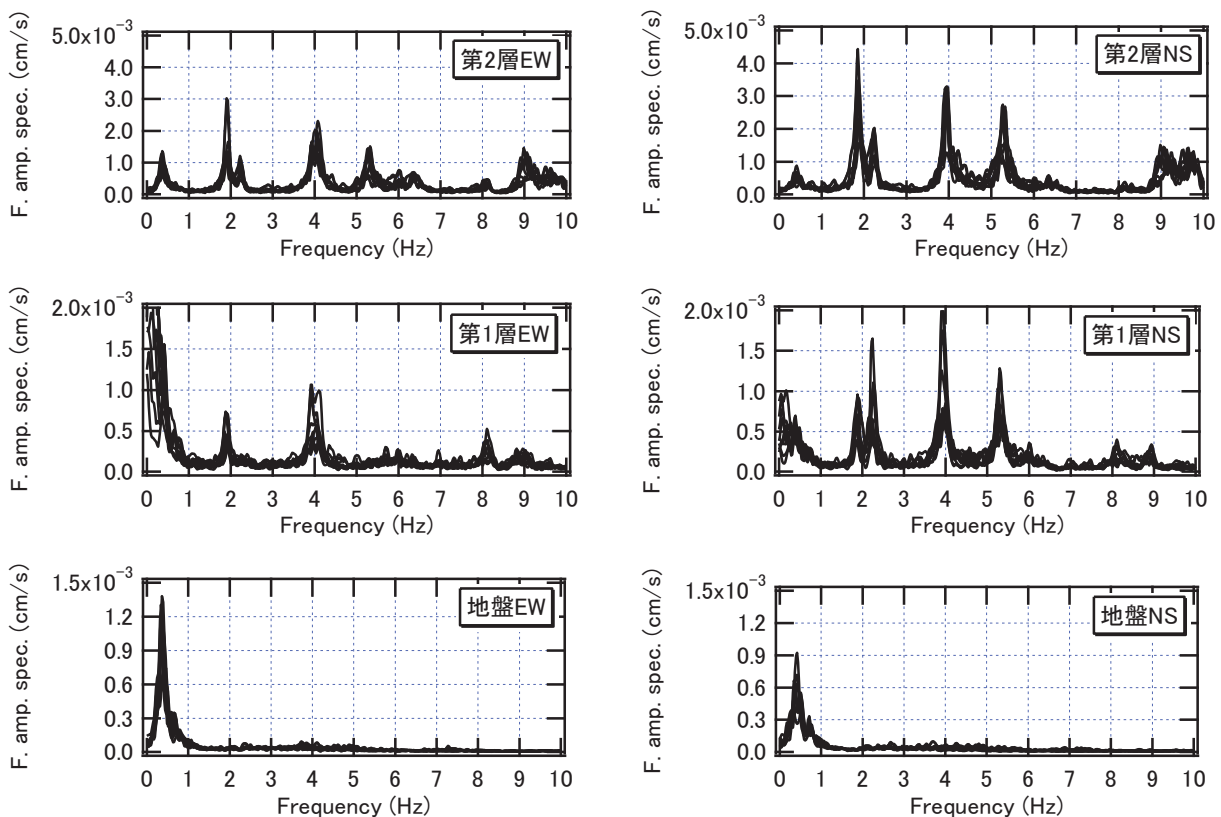


図3 第2層・第1層・地盤のフーリエスペクトル

(2) 伝達関数

図4～図6には第2層、第1層、および地盤それぞれの間での伝達関数から求めた振幅スペクトル比およびコヒーレンス関数を示す。振幅スペクトル比と位相差スペクトルの黒実線は解析した10区間すべての結果を重ね描きしたものであり、振幅スペクトル比の緑の太線はそれらの平均を示す。図4に示す第2層/地盤の振幅スペクトル比はEW、NS両方向とも2Hz、4Hz、5.3Hz付近に顕著に表れている。1次固有周波数と考えられる2Hz付近にはEW、NS両方向ともに近接してもう一つのピークが存在しており、ねじれ振動などの影響が示唆される。一方、位相差スペクトルは1Hzより低周波数までは位相差がほぼゼロであり、塔身と地盤とが一体的に運動していることがわか。コヒーレンス関数は位相差の挙動に対応して1Hzあたりで低下を始め、1次固有周波数が2Hz付近であることに対して、低下するのが低周波数側に寄っている。これは固有周波数付近での振幅スペクトル比での値が大きいため目立たないが、1Hz付近の周波数帯でも塔身の地盤に対する振幅スペクトル比は数倍程度の値を示しており、位相差を生じているためと考えられる。また、位相差スペクトル、コヒーレンス関数ともごく低周波数側ではノイズの影響もあり乱れている。

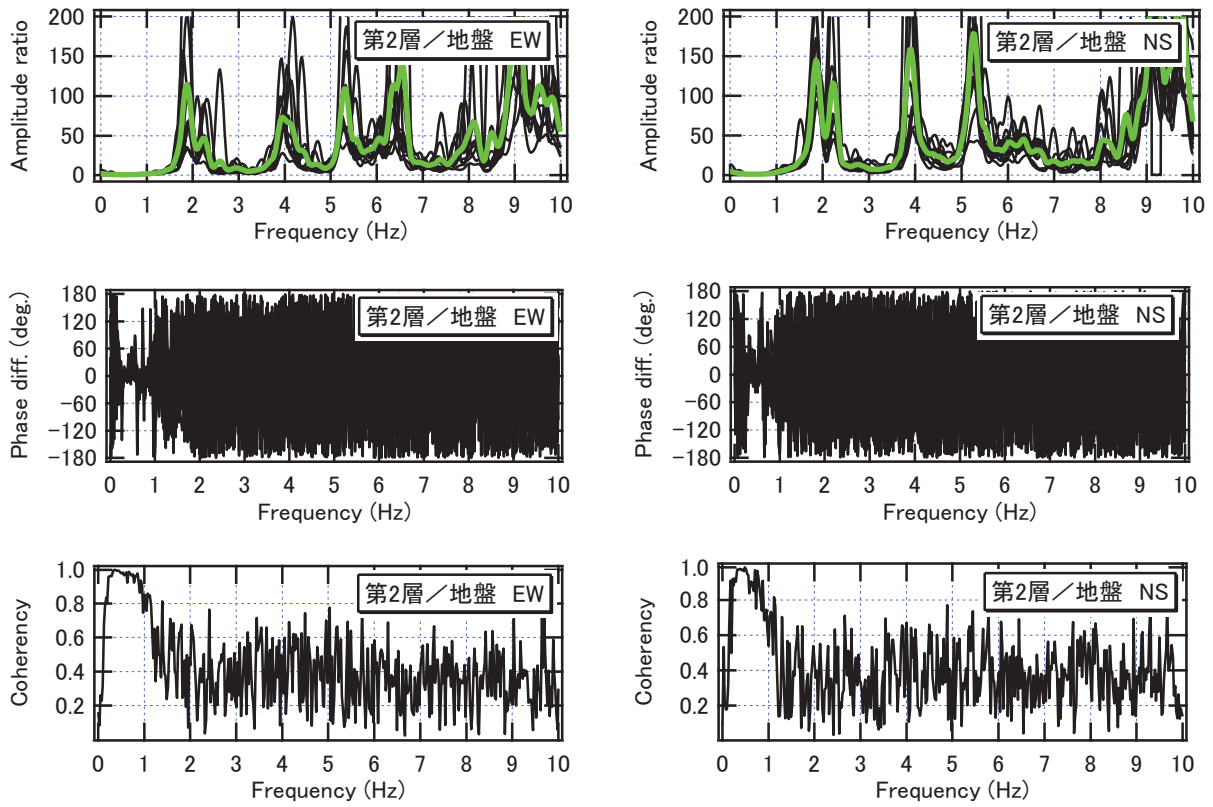


図4 第2層/地盤の振幅スペクトル比・位相差スペクトル・コヒーレンス関数

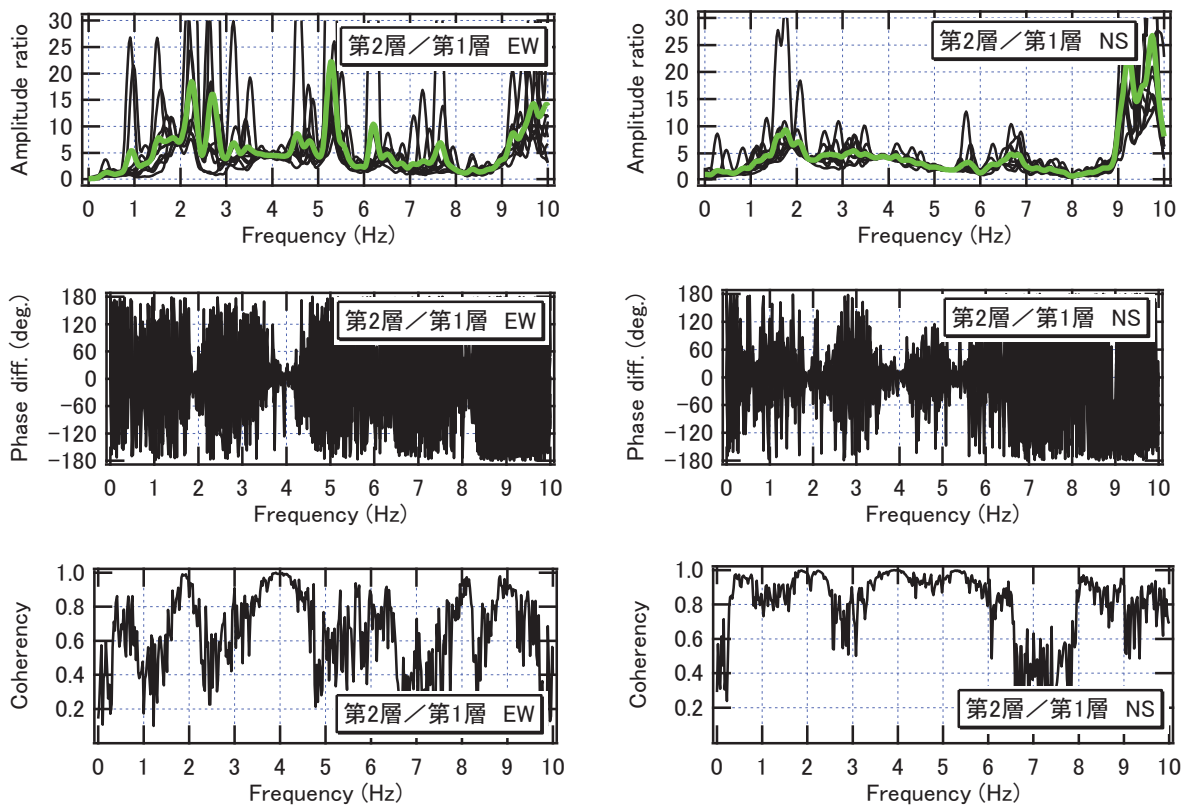


図5 第2層/第1層の振幅スペクトル比・位相差スペクトル・コヒーレンス関数

図5には第2層/第1層の振幅スペクトル比およびコヒーレンス関数を示す。図4の第2層/地盤の伝達関数が地盤との相互作用を含めた塔身の振動特性を表すのに対して、塔身について第1層床面から上の部分の振動特性を取り出そうとしたものである。EW方向では振幅スペクトル比から推定される1次固有周波数は2Hz付近に見られるが、塔身/地盤の結果と比較すると、やや高周波数側に寄っており、地盤と建物の相互作用の一般的な傾向と一致する。また、1Hz付近にも小さなピークが見られるほか、2Hzから3Hzの間にもう一つのピークが確認される。NS方向では1次固有周波数は図4の結果とほぼ同様の位置に見られる。EW、NS両方向とも、図4で見られた4Hzの明瞭なピークは見られず、5.3HzのピークはEW方向では依然確認できるが、NS方向では見られなくなる。図4の結果と比較すると、2Hzより低い周波数帯での増幅特性が顕著に見られるようになる。図3のフーリエスペクトルの結果にも示したように、塔身は第2層、第1層とも2Hz付近にピークが見られる。このため、塔身第2層/第1層の振幅スペクトル比は第2層/地盤のスペクトル比に比べてピークの値が小さくなるため、2Hz以下のピークが相対的に目立つようになる。

位相差スペクトルおよびコヒーレンス関数の挙動は複雑である。EW、NS両方向ともコヒーレンス関数の2Hz強に落ち込みが見られ、これは固有周波数付近のコヒーレンスの挙動として妥当なものと思われる。低周波数側の0.5Hz付近から1Hz前後にかけてもコヒーレンスの落ち込みが見られ、振幅スペクトル比の1Hz付近に小さなピークがあることと対応している。4Hz付近は位相差がほぼゼロで、コヒーレンス関数も高い値を示しており、この周波数帯では塔身は一体的に挙動しているものと思われる。

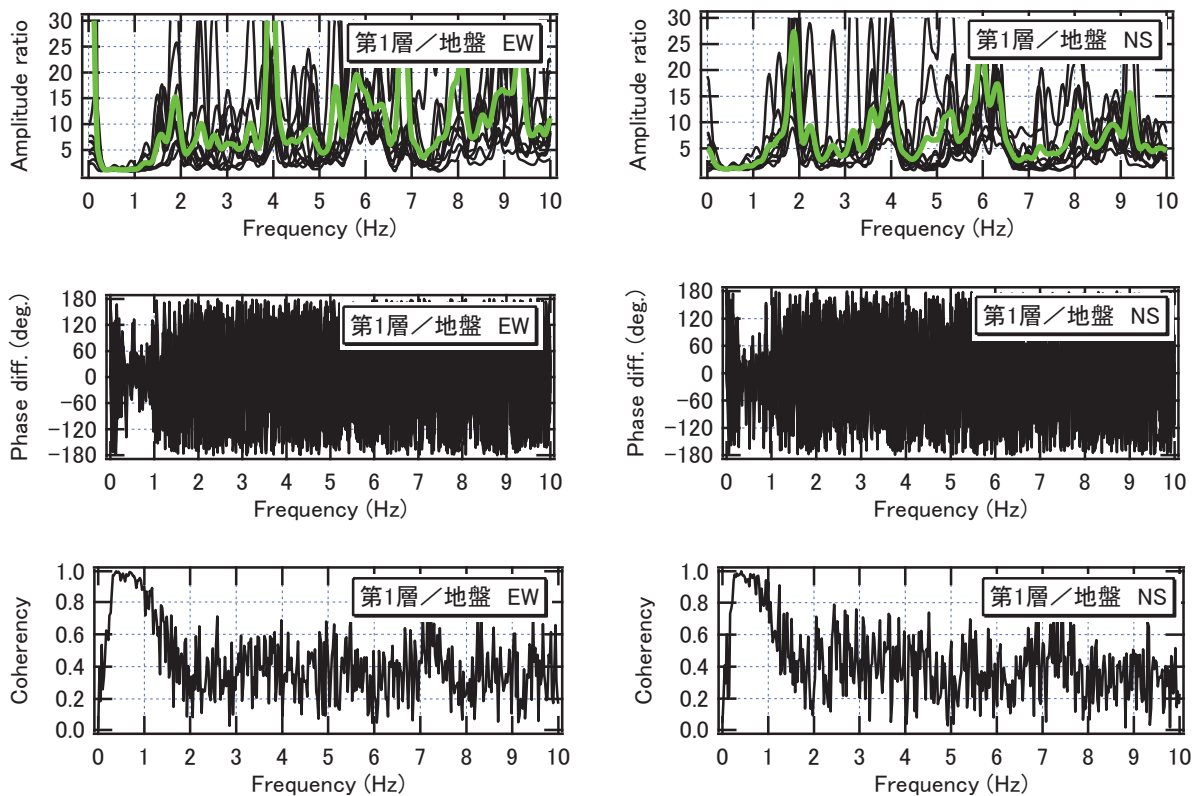


図6 第1層/地盤の振幅スペクトル比・位相差スペクトル・コヒーレンス関数

図4、図5の結果より、塔身第2層の挙動を論じるのに、地盤と塔身第1層とでどちらを基準にするかで傾向が違ふことが予想される。そこで、塔身第1層/地盤について同様の解析を行った結果を図6に示す。図4の第2層/地盤の結果と同様の傾向を示しており、2Hz付近に1次固有周波数と思われるピークがあるほか、4Hz、5Hz強、さらに高周波数帯にもピークが見られる。位相差スペクトル、コヒーレンス関数の結果からは1Hz付近までは位相差ゼロで、コヒーレンスも高く、ほぼ一体的な挙動を示しているが、それ以降の高周波数帯では乱れている。第2層/地盤に比べるとそれほど大きな値ではないが、1Hz付近でも振幅スペクトル比の値は数倍程度あることを確認しており、そのため位相差スペクトルとコヒーレンス関数の乱れが1Hz付近から生じていると思われる。

4. 変位軌跡に関する考察

フーリエスペクトルと伝達関数の結果に基づき、塔身の1次固有周波数に対応する1.5-2.5Hzと塔身第2層、第1層のフーリエスペクトルに見られる2番目のピークに対応する3.5-4.5Hzの2つの周波数帯に対して変位波形を求めた。変位を求めるにあたっては対象とする周波数帯に対して両端にcos型のテーパを持つバンドパスフィルタを速度波形のフーリエスペクトルに適用し、FFTを用いて数値積分を行った。図7、図8には地盤と第2層に速度計を設置して観測した際の変位軌跡を、図9、図10には第1層と第2層で観測した際の変位軌跡を、図11、図12には地盤と第1層で観測した際の変位軌跡をそれぞれ示す。図7に示すように1次固有周波数付近（1.5-2.5Hz）の変位軌跡は地盤、第2層とも円形に近い形状を示しているのに対し、図8に見られるように、地盤に対する塔身の2次固有周波数に対応する周波数帯（3.5-4.5Hz）では第2層の変位軌跡は斜めに主軸を持つような傾向が見て取れる。これは山辺・金井が五重塔の常時微動観測から指摘している傾向に近い⁴⁾。

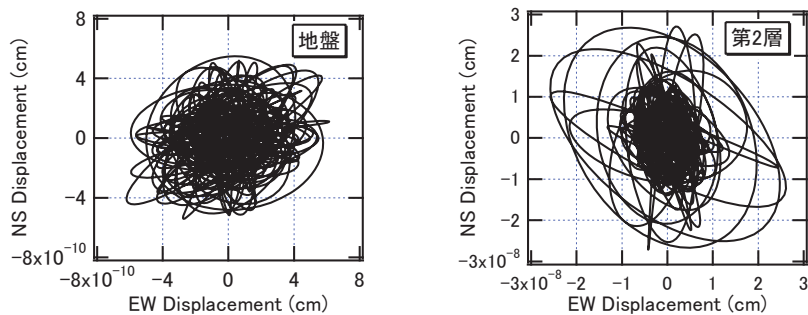


図7 地盤と第2層の変位軌跡（1.5-2.5Hz）

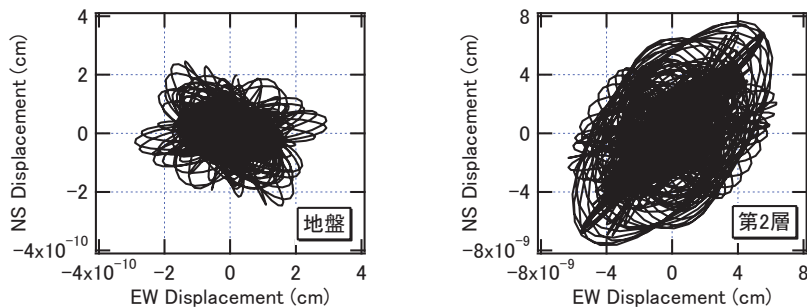


図8 地盤と第2層の変位軌跡（3.5-4.5Hz）

図9、図10の第1層と第2層で観測した際の変位軌跡からは、1.5-2.5HzではややNS方向に縦長の形状を示しているが、3.5-4.5Hzでは斜めに主軸を持つような形状を示している。特にこの観測で得られた結果では、3.5-4.5Hzの変位軌跡は斜めに主軸を持つ楕円状の形状を示しながら主軸が回転するような挙動を示している。この周波数帯（3.5-4.5Hz）で第1層と第2層の変位軌跡がほぼ同一であることは伝達関数の結果で、位相差がゼロであったことやコヒーレンスが高い値を示したことと対応している。

図11、図12の地盤と第1層の観測からも同様に、3.5-4.5Hzの第1層の変位軌跡が、特に振幅の大きいところで斜めに主軸を持つような挙動を示していることが特徴的である。

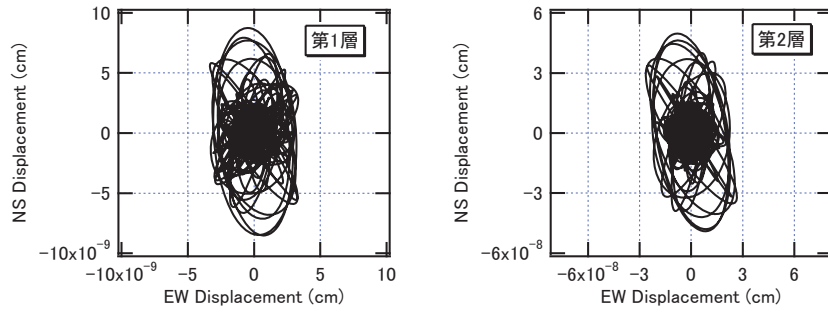


図9 第1層と第2層の変位軌跡 (1.5-2.5Hz)

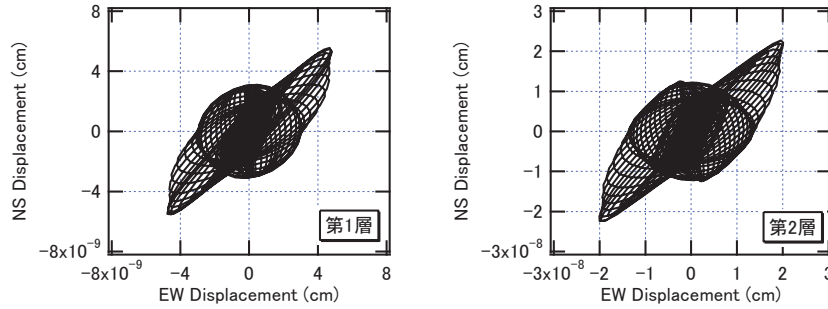


図10 第1層と第2層の変位軌跡 (3.5-4.5Hz)

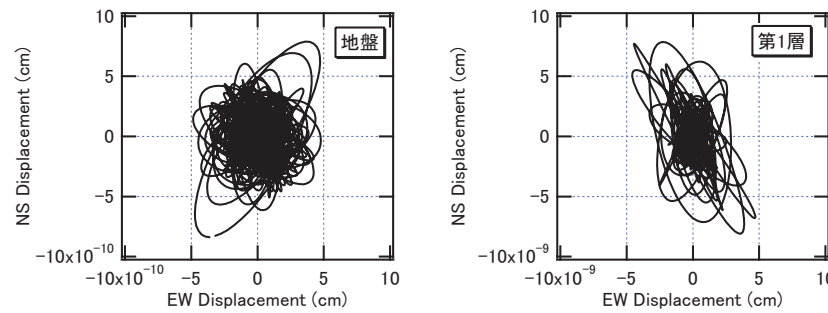


図11 地盤と第1層の変位軌跡 (1.5-2.5Hz)

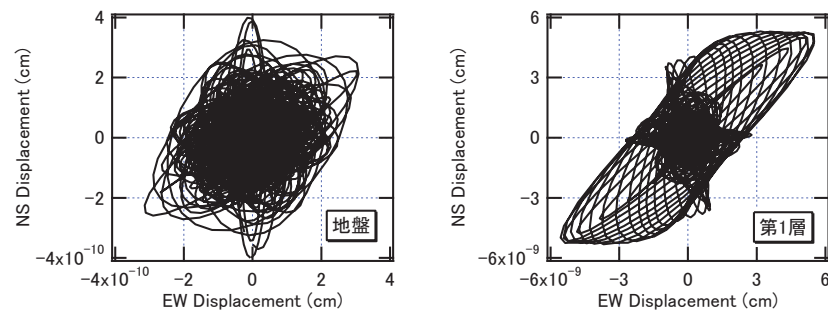


図12 地盤と第1層の変位軌跡 (3.5-4.5Hz)

5. 結論

江戸時代中期に建立された高蔵寺三重塔において実施した常時微動観測記録について分析した。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) フーリエスペクトルは第1層、第2層とも2Hz、4Hz、5.3Hzに明瞭なピークを持つ。2Hz付近のピークには近接してもう一つのピークが見られ、ねじれ振動などの影響が示唆される。地盤のピークは0.5Hz付

近に明瞭に現れるが、脈動の影響などの可能性も考えられる。

- 2) フーリエ振幅スペクトル比の結果から、2Hzのピークは塔身の1次固有周波数と考えられる。既往の研究で指摘されている五重塔の固有周波数に比べると、今回の観測で得られた三重塔の固有周波数はやや高めの値となった。4Hzのピークは地盤に対する塔身の2次固有周波数と考えることはできるが、第1層と第2層とでの観測結果からは4Hz付近では第2層と第1層はほぼ同一の挙動を示していることがわかる。この傾向は位相差スペクトルやコヒーレンス関数の結果からも明らかであった。
- 3) 変位軌跡の検討から、1次固有周波数付近（1.5-2.5Hz）では地盤、塔身とも円形に近い形状の挙動を示すが、地盤に対する塔身の2次固有周波数（3.5-4.5Hz）に対応するやや高い周波数帯では塔身は斜めに主軸を持つような形状を示していた。

本論で得られた結果が、基礎資料として将来的に改修計画などの一助になれば幸いである。

謝辞：本調査研究は科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号20360284 研究代表者：永井康雄)による成果の一部です。調査・観測を行うにあたり快くご協力いただいた、高蔵寺住職・木村照典氏、松本社寺建築研究所・松本庸器氏、いわき市教育委員会・宇佐美千恵氏に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 三辻和弥・永井康雄・佐々木達夫：「杵の内」を持つ古民家の常時微動観測，歴史都市防災論文集， Vol.3, pp.43-50, 2009.
- 2) 上田篤 編：五重塔はなぜ倒れないか，新潮選書，1996.
- 3) 大森房吉：五重塔の振動に就きて，建築雑誌414, pp.219-227, 1921.
- 4) 山辺克好・金井清：五重塔の耐震性に関する研究，日本大学生産工学部報告，第21巻2号，pp.91-110, 1988.
- 5) 大熊武司・片桐淳治・丸川比佐夫・安井八紀：強風時における五重塔の風応答性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集第582号，pp.109-116, 2004.
- 6) 志賀敏男・柴田明德ほか：在来工法による新築五重塔の振動実測，日本建築学会東北支部研究発表会梗概集，1986
- 7) 大場新太郎・木下顕宏：木造五重塔の振動特性，日本建築学会構造系論文集第 559 号，pp.47-54, 2002
- 8) 藤田香織・大山瑞穂・腰原幹雄・坂本功：伝統的・五重塔の振動特性に関する研究，第 11 回日本地震工学シンポジウム，Paper No. 283, 2002
- 9) 花里利一・藤田香織・市橋昌宏・稲山正弘・森田仁彦・柳澤孝次・坂本功：木造伝統構法五重塔の動的挙動の調査，第 11 回日本地震工学シンポジウム，Paper No. 284, 2002
- 10) 花里利一・荻原幸夫・稲山正弘・大倉靖彦・三井所清典・坂本功：木造伝統構法五重塔の設計における構造安全性の検討，日本建築学会技術報告集第 7 号，pp.33-38, 1999
- 11) 千葉一樹・藤田香織・腰原幹雄・河合直人・箕輪親宏・花里利一・坂本 功：振動台加振実験から得られた伝統的木造構法五重塔の基礎的な振動特性，日本建築学会構造系論文集第 614 号，pp.69-76 2007.
- 12) 海雲山高蔵寺ホームページ <http://www.kohzouji.com/sanjuu02.html>