

木造3階建て建築物の耐震性評価について -京丹後市久美浜町旧浜茶屋旅館の微動計測・起振器実験-

高谷富也¹・西村良平²・高本優也²・横田 駿³

要旨：京丹後市久美浜町の木造3階建て建築物である旧浜茶屋旅館の耐震性を評価するために、微動計測および起振器を用いた振動実験を行った。本研究は旧浜茶屋旅館の図面が存在しないため、対象となる木造建築物の実計測を行うとともに耐震診断も行った。また、微動計測から得られる固有振動数と起振器による振動実験から得られる固有振動数・減衰定数の比較を行うとともに、耐震診断結果との関連性についても検討を行った。

キーワード：木造3階建て建築物、耐震診断、微動計測、起振器実験、共振振動数、上部構造評点、伝達関数

1. はじめに

著者らは、これまでに耐震安全性に問題があり、耐震改修の必要性があるとされている古民家建築物を対象として、起振器を用いて木造建築物の固有振動数や減衰定数を求めるとともに、常時微動計測による固有振動数の推定を行っている^{1), 2), 3)}。

本研究では、大正12年（1923年）に建てられた木造3階建て建築物である旧浜茶屋旅館を対象として、実計測に基づいた耐震診断を行った。また、起振器を用いて木造3階建て建築物の固有振動数や減衰定数を求めるとともに、微動計測による固有振動数の推定を行ったものである。

2. 対象とした旧浜茶屋旅館について

Photo.1は、今回対象とした京丹後市久美浜町新橋の旧浜茶屋旅館の北側道路に面した前景写真を示したものである。この木造建物は大正12年（1923年）に竣工されており、1階床面積が140.18m²、2階床面積が146.62m²、3階床面積が120.32m²の地上3階建て木造建築物である。旧浜茶屋旅館の所有者は京丹後市峰山町に住んでおり、現在は空き家となっている。この旧浜茶屋旅館が建っている久美浜町新橋地区を含めた地域は、「久美浜湾沿岸の商家群と街並み

景観」として、京都府景観資産に平成23年（2011年）に登録されている。現在の街並み景観を構成する家屋や商家群は、大正14年（1925年）の但馬地震、昭和2年（1927年）の北丹後地震で甚大な被害を受け、復興された後の様式が基本となっている。倒壊を免れた江戸時代から大正時代の商家建築も残されており⁴⁾、その代表的な木造建築物が豪商稻葉本家⁵⁾となっている。

所有者によれば、対象の旧浜茶屋旅館は上記の但馬地震や北丹後地震にも倒壊せずに残っている貴重な木造3階建て建築物であると言える。また、現在は旧浜茶屋旅館の維持管理が大変であり、撤去して土地を売り払うことにも念頭に入れているとのことである。

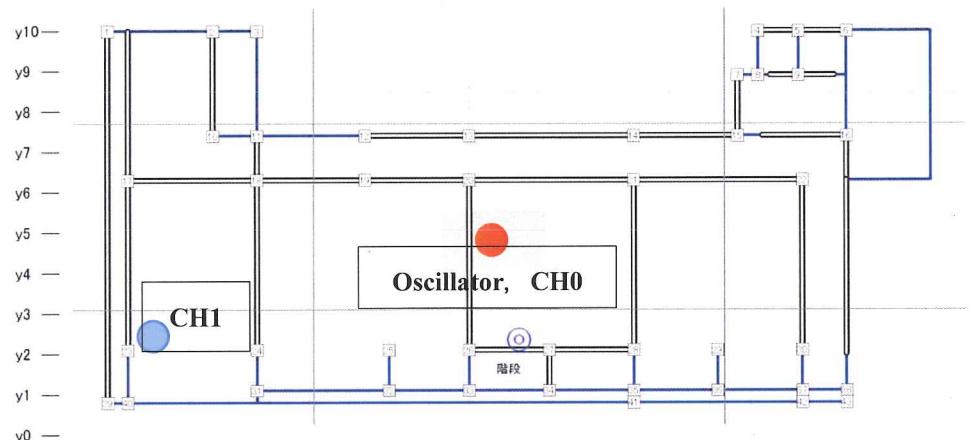


Photo.1 Full view of Old-Hamachaya house

1 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 教授

2 舞鶴工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術職員

3 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 5年



(a) Third floor



(b) Second floor

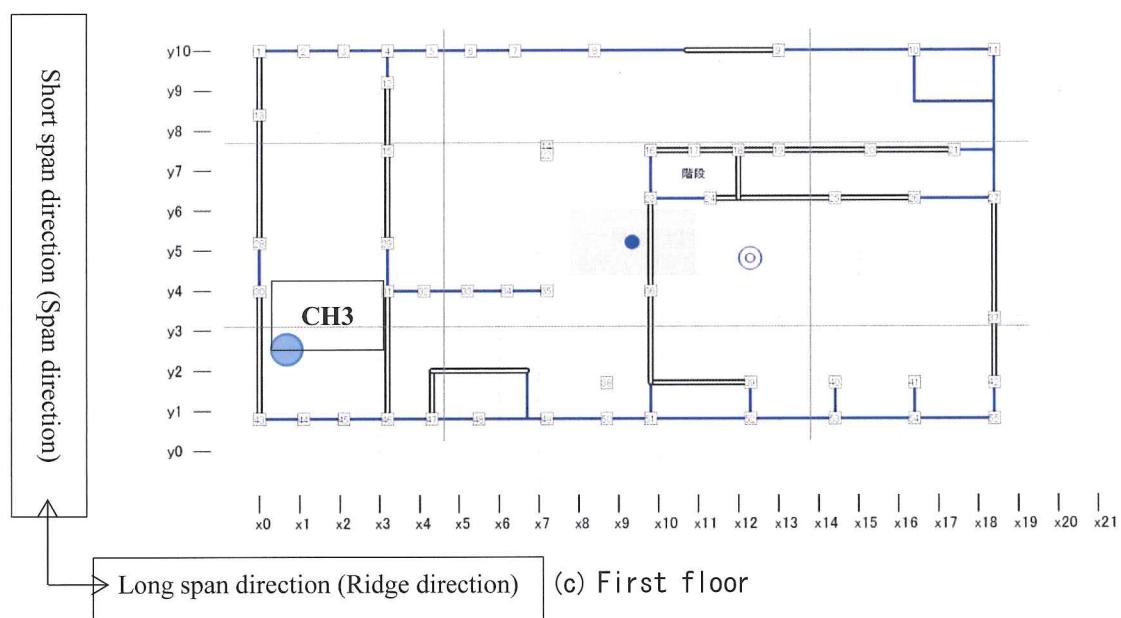


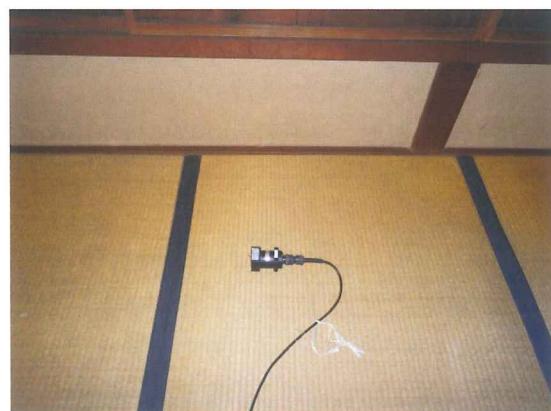
Fig. 1 Floor plan of Old-Hamachaya house



Photo. 2 Oscillation experimental full view (Oscillation direction : Short span direction)

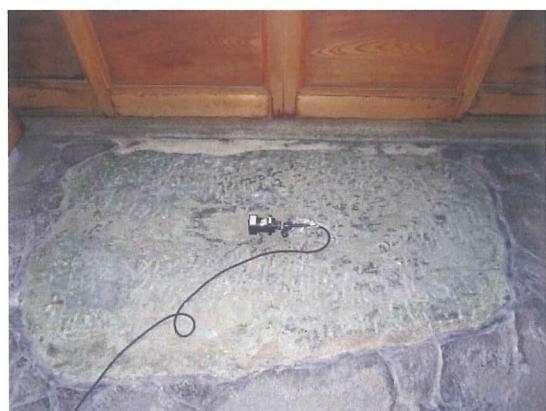


(a) CH1 on the third floor

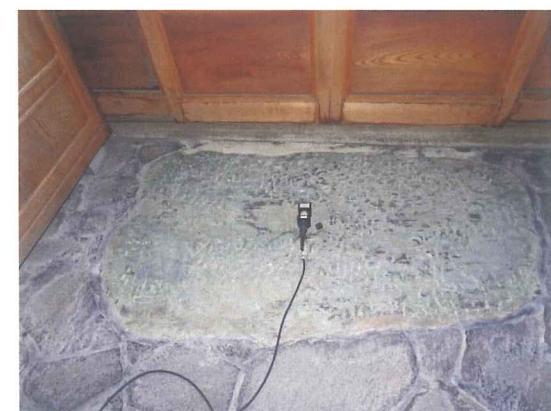


(b) CH2 on the second floor

Photo. 3 CH1 and CH2 installation (Short span direction)



(a) CH3: Short span direction



(b) CH3: Long span direction

Photo. 4 CH3 installation on the first floor

3. 起振器による旧浜茶屋の耐震性評価

3. 1 起振器実験について

振動実験の測定システムは計測部、起振部および解析部などから成っている。測定は、起振器(サンエス社製、永久磁石起振機 SSV-125、最大加振力:490N、振動数範囲 0.1~100Hz)によって固有振動数 1~10Hz のスイープ波加振を 360 秒間実施するとともに、サーボ型加速度計(ミツトヨ社製、V405-BR、測定範囲: $\pm 30\text{m/s}^2$ 、振動数範囲: DC~400Hz)によって振動波形を記録する。起振機と加速度計で得られた波形から求めたスペクトルの比(伝達関数)から木造建築物の共振振動数を求める。続いて、求めた共振振動数を固有振動数とする正弦波加振によって木造建築物を振動させ、定常時に起振機を急停止させて得られた減衰自由振動波形から木造住宅の減衰定数を評価する。また、常時微動を測定して得られた波形から伝達関数を求め、起振器による振動で得られたものと比較する。

3. 2 起振器および加速度計の設置について

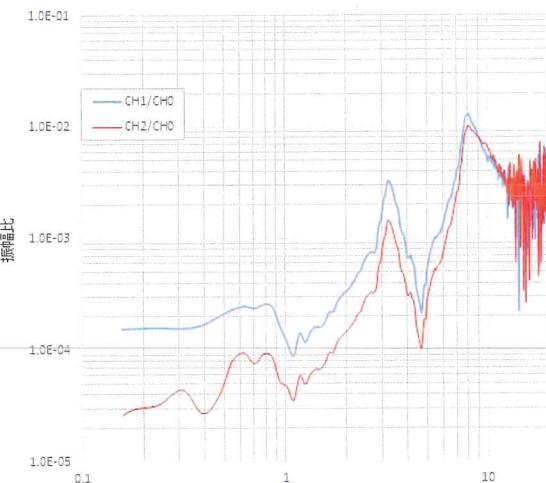
Fig. 1 は旧浜茶屋旅館の実測調査を踏まえて作成した平面図を基に、起振器や加速度計の設置位置を示したものである。3 階に起振器を設置し、加速度計 CH1 と CH2 をそれぞれ 3 階と 2 階の北西の位置に設置している。また、1 階の北西の玄関土間に CH3 を設置している。なお、微動計測の際には 1 階の北西の玄関土間に CH4 を設置し、起振器と一緒に計測を行う微動計測の際にスペクトル比として求める地盤の振動を計測した。また、CH0 は起振器に取り付けた加速度計を示しており、Fig. 1 中の小さい青色の ● はその階の重心位置を、◎は剛心位置を示している。Photo. 2 は 3 階における起振器と計測機器周辺の振動実験風景を示したものである。また、上述した 4 つの加速度計の設置風景として、CH1 と CH2 を Photo. 3 に、CH3 を Photo. 4 に示しておく。

3. 3 起振器による実験結果

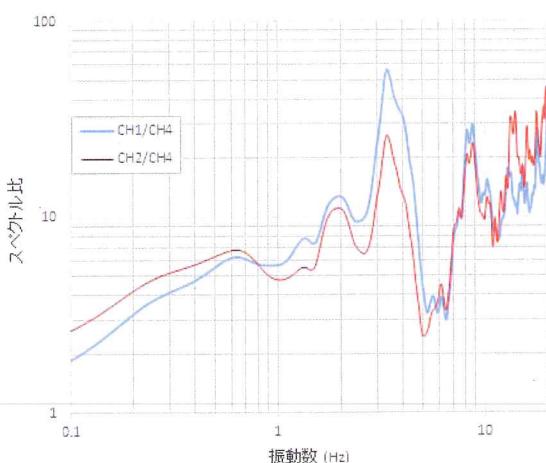
(1) 長辺方向（梁間方向）

Fig. 2(a) は、長辺方向（梁間方向）の起振器実験において用いた CH1 および CH2 の加速度計で計測された振動数と振幅比（起振器の加速度計 CH0 に対する CH1 または CH2 との比）の関係、すなわち伝達関数を示したものである。また、Fig. 2(b) は、長辺方向（梁間方向）の微動計測において用いた CH1 および CH2 の加速度計で計測された振動数と振幅比（玄関設置の加速度計 CH4 に対する CH1 または

CH2 との比）の関係、すなわちスペクトル比を示したものである。また、Table 1 および Table 2 は Fig. 3 に示す起振器および微動計測から求められた第 1 次～第 3 次固有振動数の結果をまとめたものである。これらの図より、起振器による振動実験にお



(a) Oscillation



(b) Microtremor

Fig. 2 Transfer function of long span direction

Table 1 Natural frequency of long span direction
(Oscillation case, unit: Hz)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次
CH1	3.20	8.05	—
CH2	3.20	8.05	—

Table 2 Natural frequency of long span direction
(Microtremor case, unit: Hz)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次
CH1	3.38	8.20	—
CH2	3.38	8.20	—

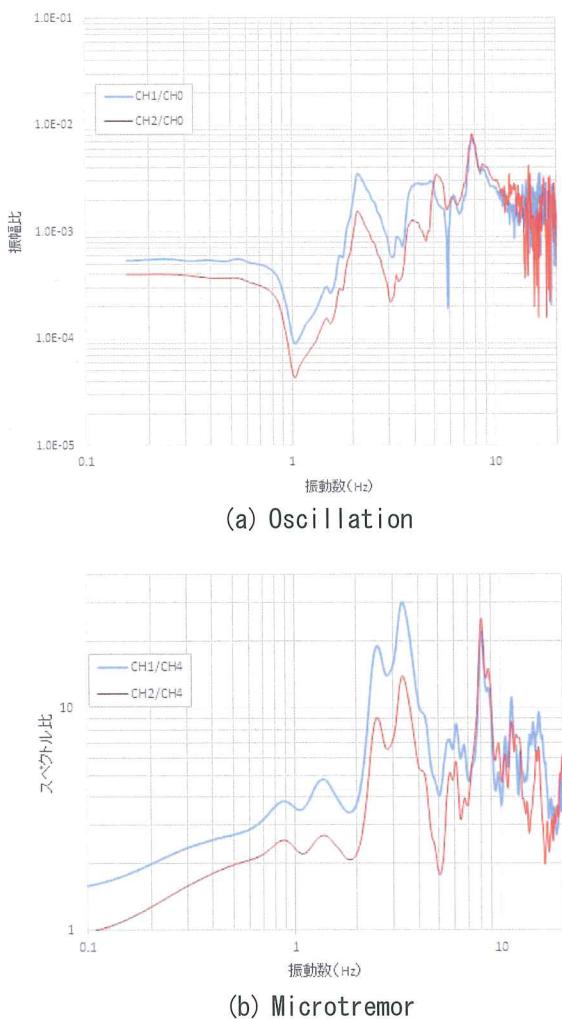


Fig.3 Transfer function of short span direction

Table 3 Natural frequency of short span direction
(Oscillation case, unit: Hz)

	第1次	第2次	第3次
CH1	2.11	7.73	—
CH2	2.11	3.91	5.23

Table 4 Natural frequency of short span direction
(Microtremor case, unit: Hz)

	第1次	第2次	第3次
CH1	2.52	3.36	6.05
CH2	2.54	3.36	6.09

Table 5 Damping coefficients for long span and short span directions

	Long span	Short span
CH1	7.4%	6.8%
CH2	7.1%	6.8%

ける CH1 および CH2 ともに第 1 次固有振動数 3.20Hz および第 2 次固有振動数 8.05Hz にピークが見られるが、微動計測においては、CH1 および CH2 ともに第 1 次固有振動数 3.38Hz および第 2 次固有振動数 8.20Hz にピークが見られ、長辺方向(梁間方向)についてはねじれ振動がないことがわかる。また、起振器より得られた固有振動数が微動計測から得られた固有振動数より多少小さくなっていることがわかる。この傾向は、これまで行ってきた起振器と微動計測からの結果と同じ傾向を示している。この原因として、起振器による木造建築物の振動を計測した場合、柱、梁および壁などの構造部材等の仕口部分や接続箇所等の剛性の影響を総合的に評価することによるものと考えられる。一方、微動計測は起振器により発生する振動に比べて非常に小さな振動を計測しているため、構造部材等の仕口部分や接続箇所等の剛性の影響が出ないためと考えられる。

(2) 短辺方向(平行方向)

Fig.4 は、短辺方向(平行方向)の起振器実験および微動計測から得られた CH1 および CH2 の加速度計で計測された伝達関数を示したものである。また、Table 3 および Table 4 は Fig.3 に示す起振器および微動計測から求められた第 1 次～第 3 次固有振動数の結果をまとめたものである。

Fig.3 および Table 3 より、CH1 および CH2 における第 1 次固有振動数は 2.11Hz にピークが見られるものの、CH1 と CH2 の第 2 次および第 3 次固有振動数は一致していないことがわかる。これは、Fig.1 に示す 3 階の平面図から明らかなように、短辺方向(平行方向)の振動については木造建築物の北東側と南東側の平面形状の影響が表れたものと考えられる。

一方、Fig.3 および Table 4 より、微動による固有振動数の結果は、Table 3 に示す起振器による結果に比べてやや高い値を示していることがわかる。この現象は長辺方向(梁間方向)に見られたものと同じ現象となっている。

Fig.2 および Fig.3 に示す起振器および微動計測から算定された伝達関数より、いずれの場合においても、長辺方向の固有振動数が短辺方向のそれに比べて大きくなってしまい、短辺方向に比べて長辺方向の剛性が大きいことがわかる。これは、Fig.1 に示す各階に対する平面図からも明らかのように、短辺方向に比べて長辺方向における壁が多いことによる

壁量の違いや 1 階の調理場が木造 3 階建て建築物である旧浜茶屋旅館の剛性に表れているものと考えられる。

Table 5 は長辺方向および短辺方向にそれぞれの第 1 次固有振動数で共振振動させた場合に計測された減衰定数を示したものである。減衰定数が大きくなれば、地震による建築物の揺れが早期に弱まるこことを示している。Table 1 に示した長辺方向の CH1 の第 1 次固有振動数 3.20Hz で共振振動させた場合に計測された減衰定数として、CH1 と CH2 はそれぞれ 7.4% よび 7.1% の値となっている。また、Table 3 に示した短辺方向の CH1 の第 1 次固有振動数 2.11Hz で共振振動させた場合に計測された減衰定数として、CH1 と CH2 は両者ともに 6.8% の値となっている。これらの減衰定数の値は、これまでの木造建築物の

減衰定数に比べて非常に大きな値となっており、耐震性が高いことを示しており、強震動を受けた場合の揺れが早期に弱まることが考えられる。このため、上述した対象の旧浜茶屋旅館の所有者の話にあったように、但馬地震や北丹後地震にも倒壊せずに残っている貴重な木造 3 階建て建築物であると言えよう。

4. 旧浜茶屋の耐震診断について

4. 1 耐震診断法について

旧浜茶屋の実測調査に基づいて作成した平面図や立面図を基にして、一般診断法⁷⁾、精密診断法⁷⁾および限界耐力計算⁷⁾による旧浜茶屋旅館の耐震診断を行った。なお、一般診断法、精密診断法による上部構造評点は、次式により評価される⁷⁾。

Table 6 General seismic diagnosis of Old-Hamachaya house

方向	階	必要耐力 Q_r (kN)	保有耐力 $edQu$ (kN)	充足率 $edQu/Q_r$	判定
X 方向 (長辺)	3 階	78.21	20.30	0.25	倒壊する可能性が高い
	2 階	148.09	102.15	0.68	倒壊する可能性が高い
	1 階	196.26	99.75	0.50	倒壊する可能性が高い
Y 方向 (短辺)	3 階	78.21	17.93	0.22	倒壊する可能性が高い
	2 階	148.09	33.14	0.22	倒壊する可能性が高い
	1 階	196.26	21.89	0.11	倒壊する可能性が高い

Table 7 Accurate seismic diagnosis of Old-Hamachaya house

方向	階	必要耐力 Q_r (kN)	保有耐力 $edQu$ (kN)	充足率 $edQu/Q_r$	判定
X 方向 (長辺)	3 階	78.21	19.59	0.25	倒壊する可能性が高い
	2 階	148.09	102.15	0.68	倒壊する可能性が高い
	1 階	196.26	99.04	0.50	倒壊する可能性が高い
Y 方向 (短辺)	3 階	78.21	15.11	0.19	倒壊する可能性が高い
	2 階	148.09	40.41	0.27	倒壊する可能性が高い
	1 階	196.26	26.44	0.13	倒壊する可能性が高い

Table 8 Limit strength calculation seismic diagnosis of Old-Hamachaya house

方向	階	安全限界耐力 Q_{si} (kN)	作用する地震力 Q_{sni} (kN)	評点 Q_{si}/Q_{sni}	判定
X 方向 (長辺)	3 階	26.77	113.90	0.23	倒壊する可能性が高い
	2 階	122.48	227.52	0.53	倒壊する可能性が高い
	1 階	117.00	311.27	0.37	倒壊する可能性が高い
Y 方向 (短辺)	3 階	21.90	64.76	0.33	倒壊する可能性が高い
	2 階	48.21	129.93	0.37	倒壊する可能性が高い
	1 階	32.07	177.53	0.18	倒壊する可能性が高い

$$\text{上部構造評点} = \frac{\text{保有耐力(kN)}_{ed} Q_u}{\text{必要耐力(kN)} Q_r} \quad (1)$$

(充足率)

一般診断法における必要耐力 Q_r の算定は、床面積、必要耐力係数、地震係数、軟弱地盤割増、形状係数、混構造割増などを考慮して算出される。また、保有耐力 $_{ed} Q_u$ は無開口壁耐力、壁基準耐力、耐力要素の配置等による低減係数、劣化度より算出される。

一方、精密診断法（保有耐力診断法）における必要耐力 Q_r の算定においては、建築基準法施行令第88条の2に準じて求めるもので、次式で算定される⁷⁾。

$$Q_r = R_t \times A_i \times Z \times C_0 \times w_i \times n \quad (2)$$

ここに、 Z は地震係数、 R_t は振動特性係数、 A_i は層せん断力分布係数、 C_0 は標準せん断力分布係数、 w_i は i 層より上にある層の全質量に形状割増を考慮した値、 n は軟弱地盤割増である。また、精密診断法（保有耐力診断法）における保有耐力 $_{ed} Q_u$ の算定においては、無開口壁耐力、有開口壁耐力、剛性率による低減係数、偏心率と床の仕様による低減、劣化度が考慮される。

限界耐力計算による耐震診断における作用する地震力 Q_{Sni} は、建築基準法施行令第82条の6の五ハに準じて求めるもので、次式で算定される⁷⁾。

$$Q_{Sni} = S_{a0} \times m_i \times B_{Si} \times F_h \times Z \times G_s \quad (3)$$

ここに、 S_{a0} は応答スペクトル、 m_i は各階の質量、 B_{Si} は加速度の分布係数、 F_h は減衰による加速度の低減率、 Z は地震係数、 G_s は表層地盤による加速度の増幅率を表す。また、安全限界耐力 Q_{Si} は荷重変形関係曲線（安全限界）の最大荷重点の値を意味する。なお、荷重変形関係曲線は壁荷重変形関係曲線と柱荷重変形関係曲線を総合的に加算して算出される。したがって、限界耐力計算による上部構造評点は、次式により評価される⁷⁾。

$$\text{上部構造評点} = \frac{\text{安全限界耐力 } Q_{Si}}{\text{作用する地震力 } Q_{Sni}} \quad (4)$$

4. 2 各耐震診断法による診断結果について

上述した3つの耐震診断法によって算定された上部構造評点（充足率）をTable 6～Table 8に示す。

Table 6より、一般耐震診断法による上部構造評点0.11（1階Y方向）のため、対象の旧浜茶屋旅館は「震度6強」または「震度7」の地震動に対して、「倒壊する可能性が高い」ことがわかる。なお、Table 6に見られるX方向およびY方向は、それぞれFig.1に示す長辺方向および短辺方向を意味している。

また、Table 7より、精密耐震診断法による上部構造評点0.13（1階Y方向）のため、一般診断法と同様に、対象の旧浜茶屋旅館は「震度6強」または「震度7」の地震動に対して、「倒壊する可能性が高い」ことがわかる。なお、Table 7に見られるX方向の上部構造評点は、一般診断法による上部構造評点を示したTable 6のX方向の値と一致していることがわかる。このため、X方向の保有耐力については、一般診断法と精密診断法にはあまり差異がないことがわかる。

一方、Table 8より、限界耐力計算による上部構造評点0.18（1階Y方向）のため、一般診断法や精密診断法と同様に、対象の旧浜茶屋旅館は「震度6強」または「震度7」の地震動に対して、「倒壊する可能性が高い」ことがわかる。なお、Table 6～Table 8より、限界耐力計算によるX方向の上部構造評点は、一般診断法や精密診断法の値より小さくなる傾向を、また限界耐力計算によるY方向の上部構造評点は、一般診断法や精密診断法の値より大きくなる傾向を示していることがわかる。これは、限界耐力計算による診断において、伝統的な木造建築物が有している安全限界耐力に相当する保有耐力の算定には、伝統的な木造建築物の架構が有している壁や柱の荷重変形関係曲線が用いられていることによるものと考えられる。このため、既存の伝統的な木造建築物の耐震診断や耐震改修などには限界耐力計算が使用されている。

上述したように、起振器や微動計測結果から得られた第1次固有振動数や減衰定数の値および一般診断法、精密診断法および限界耐力計算による耐震診断結果からも、対象の旧浜茶屋旅館の木造3階建て建築物は「震度6強」または「震度7」の地震動に対して「倒壊する可能性が高い」ことを示しており、起振器および微動による耐震性評価結果を裏付けるものとなっていることがわかる。

5. まとめ

対象とした旧浜茶屋の木造3階建て建築物の強震

時における耐震性を評価するために、木造建築物を起振器で揺らし木造建築物が最も揺れやすい振動数、いわゆる固有振動数を測定した。同時に、微動計測を実施して、起振器を使用せず固有振動数を算出することが可能かどうかの検討も行った。また、木造建築物の揺れが弱まる程度を表す減衰定数を起振器による振動実験結果から算出した。さらに、旧浜茶屋の実測調査に基づいて作成した平面図や立面図を基にして、一般診断法、精密診断法および限界耐力計算による旧浜茶屋旅館の耐震診断を行った。以下に、本研究の遂行により明らかとなった結論を示す。

- 1) 起振器実験および微動計測から得られた伝達関数より、長辺方向（梁間方向）の固有振動数が短辺方向（桁行方向）の固有振動数に比べて大きくなっている。これは、短辺方向に比べて長辺方向の剛性が大きいことがわかった。これは、短辺方向に比べて長辺方向における壁が多いことによる壁量の違いや1階の調理場が木造3階建て建築物である旧浜茶屋旅館の剛性に表れているものと考えられる。
- 2) 起振器実験から得られた減衰定数より、長辺方向（梁間方向）の減衰定数に比べて短辺方向（桁行方向）の減衰定数が小さく、長辺方向における揺れが多少早期に弱まる。これは、長辺方向における壁量の多さと木造建築物の構法に起因しているものと考えられる。なお、短辺方向は長辺方向に比べて耐震性は高いと考えられるが、両方向ともに減衰定数が大きな値を示しているため、揺れが早期に弱まることを示している。
- 3) 一般診断法、精密診断法および限界耐力計算により上部構造評点（充足率）を踏まえた結果、長辺および短辺方向とともに「震度6強」または「震度7」の地震動に対して、1階の短辺方向（桁行方向）の上部構造評点がそれぞれ0.11, 0.13および0.18となっており、「震度6強」または「震度7」の地震動に対して「倒壊する可能性が高い」ことが判明しており、これは起振器および微動計測結果より得られた第1次固有振動数の値を裏付けるものとなっている。

今後、旧浜茶屋旅館周辺地盤の微動アレイ計測を行い、アレイ計測結果から得られた表層地盤情報に基づいた地震動を作成して、著者らが行ってきている柱、梁、壁から構成される木造架構モデルを用いた地震時倒壊解析⁸⁾を通じて、より詳細に旧浜茶屋旅館の木造3階建て建築物の耐震性の評価を明らかにするとともに、耐震改修についても地震時倒壊解析を通じて検証したいと考えている。これについては、稿を改めて報告したい。

謝辞：最後に、特定非営利活動法人「わくわくする久美浜をつくる会」理事長の友松祐也様には、お忙しい時期に対象とした旧浜茶屋旅館の所有者との連絡のご支援とご協力を頂き、紙面を借りて感謝の意を表します。また、旧浜茶屋旅館の所有者の小松裕幸様には、お忙しい時期に対象とした旧浜茶屋旅館における実計測、微動計測並びに起振器実験へのご協力を頂き、紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 高谷富也, 西川隼人, 西村良平:起振器を用いた木造古民家住宅の耐震性評価について, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第51号, pp.31-41, 2016.
- 2) 高谷富也, 西川隼人, 西村良平, 平野竜一朗:起振器を用いた木造古民家住宅の耐震性評価について -小浜西組における町並み資料保存館を対象として-, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第52号, pp.29-38, 2017.
- 3) 高谷富也, 西川隼人, 西村良平, 清水嵩史:木造2階建て建築物の耐震性評価について -綾部市志賀郷公民館の起振器実験-, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第53号, pp.33-40, 2018.
- 4) 京都府教育府指導部文化財保護課 HP : http://www.kyoto-be.ne.jp/bunkazai/cms/index.php?page_id=230.
- 5) 豪商稻葉本家 HP : <http://www.inabahonke.com/>.
- 6) 京丹後市:京丹後市史資料編 京丹後市のまちなみ・建築, 2017.3.
- 7) (財)日本建築防災協会:2012年改訂版「木造住宅の耐震診断と補強方法」, 2012.
- 8) Tomiya Takatani and Hayato Nishikawa : Seismic Collapsing Behaviour of Three-story Wooden House under Strong Earthquake Ground Motion, Journal of Civil Engineering and Construction (ISSN: 2051-7769, eISSN: 2051-7777), 2015.

(2018.12.7受付)

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF THREE-STORY WOODEN STRUCTURE - Old-Hamachaya Japanese-style Hotel, Kumihama-cho, Kyotango city -

Tomiya TAKATANI, Ryohei NISHIMURA, Yuya KOHMOTO and Shun YOKOTA

ABSTRACT : In order to evaluate seismic performance of an old Japanese-style three-story wooden structure, Old-Hamachaya Japanese-style hotel, Kumihama-cho in Kyotango city, against a strong earthquake motion with the Japan Meteorological Agency “6 upper” or “7” seismic level, a microtremor observation and an oscillation vibration for this structure were conducted. In this paper, three seismic diagnoses of this Japanese-style three-story wooden structure were carried out, and also the predominant frequencies and damping coefficients for both long span and short span directions were evaluated from an oscillation vibration experiment. In addition, the predominant frequencies for both long span and short span directions were done from the microtremor observation. A validity of microtremor observation to seismic performance evaluation of an old Japanese-style wooden structure was discussed based on the oscillation vibration experiment results.

Key Words : *Three-story wooden structure, Seismic diagnosis, Microtremor, Oscillation vibration, Predominant frequency, Upper structural index, Transfer function*

