

# 常時微動計測による宮島町家の振動特性の把握と耐震性能との関係性

黒河 真\*・光井 周平\*\*・岩井 哲\*\*\*

(令和4年10月28日受付)

## Relationship between seismic performance and Microtremor measurement of Traditional Wooden Houses in Miyajima

Makoto KUROKAWA, Shuhei MITSUI and Satoshi IWAI

(Received Oct. 28, 2022)

### Abstract

Miyajima, located in Hatsukaichi City, Hiroshima Prefecture, was designated as an Important Preservation District for Groups of Traditional Buildings last year. In this paper, it is shown that relationship between result of microtremor measurement and seismic diagnosis of buildings for clarifying the structural characteristics of Miyajima Machiya (Townhouse). As a result of seismic diagnosis, it is found that seismic performance in short direction of buildings has particularly weak. Furthermore, as a result of microtremor measurement, it is found that vibration characteristics of the ground differ depending on the location. For buildings, it is suggested that adjacent houses may have affected the natural frequency value.

**Key Words:** Wooden Structure, Wooden Houses, Seismic Performance, Vibration characteristics, Microtremor measurement

### 1. はじめに

広島県廿日市市宮島町の伝統的な町家建築が建ち並ぶ地区は、令和3年に国から「重要伝統的建造物群保存地区」(以下、重伝建)に指定された。古いものでは江戸時代から残る宮島の伝統的な町家の数々は、宮島の歴史や文化を語る上で重要な文化財であり、後世に残していく必要がある。しかし、現在までに街並みの景観や環境特性に関する研究は数多く行われている一方で、町家の構造特性に関する研究はほとんど行われていない。著者らはこれまでに宮島町家の構造特性を明らかにするために、5件の町家を対象に実測調査と耐震診断を行い、その内の3件を対象に常

時微動計測を行っている<sup>1)</sup>。本報では、常時微動計測を行った3件の町家を対象に、常時微動計測と耐震診断の結果を示すとともに、相互の結果の関係性を検討することで、常時微動計測により町家建築の耐震性能を簡易的に推定する手法の提案に向けた基礎資料とすることを目的とする。

### 2. 宮島町家の概要

宮島の重伝建エリアは厳島神社を中心に西町と東町に大別される<sup>2)</sup>。西町は厳島神社に関する祭祀等を取り仕切る人々が居住する社家町となっており、後述する東町より市街地形成の開始時期が300年近く早いとされている。

\* 広島工業大学大学院工学系研究科環境学専攻 大学院生

\*\* 広島工業大学環境学部建築デザイン学科

\*\*\* 広島工業大学 名誉教授

一方、東町は中世末に山手の寺社境内を核とする小規模な門前集落として形成された。江戸期に入ると港の建設と商工業の発展のため海を埋め立て居住域が拡大された。限られた土地を効率よく利用するため敷地は短冊状に区分され、敷地いっぱい建物に建てられたため、隣家との距離が極めて近いことが町家建築の特徴の一つである。そのため図1のように間口が狭く奥行きに長い形状をしており、研究を進める上で隣接する家屋の影響を評価・分析することが重要と考えられる。

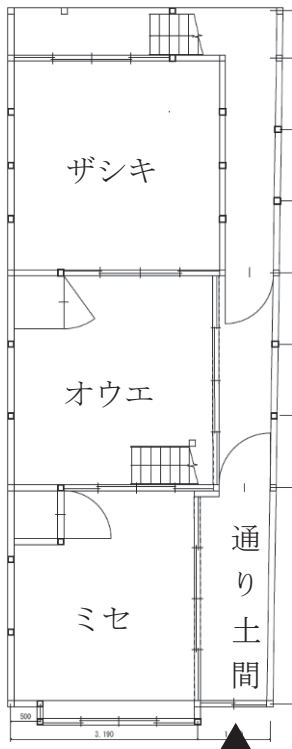


図1 宮島町家の標準的な平面形状

内部は玄関を入れて通り土間に沿って「ミセ」、「オウエ」、「ザシキ」と呼ばれる部屋が並んでおり、「オウエ」には神棚が設置されている。古い建物では「オウエ」の上部が吹き抜けになっているが時代が新しくなるにつれて上部が室化されていった。

### 3. 調査概要

#### 3.1 SSA家

東町に位置する伝統構法で建てられた2階建て木造住宅で、昭和初期に建設された近代宮島の典型的な町家である。建設時期が新しいこともあり「オウエ」の上部は室化されている。平行四辺形に近い敷地に合わせて建てられており、押入等でゆがみを吸収する高度な大工技術が用いられている。両隣に隣接する家屋は、過去に一度解体されているため現在は離れて建物が建っている。図2に外観写真、図3に平面図を示す。



図2 SSA家外観写真

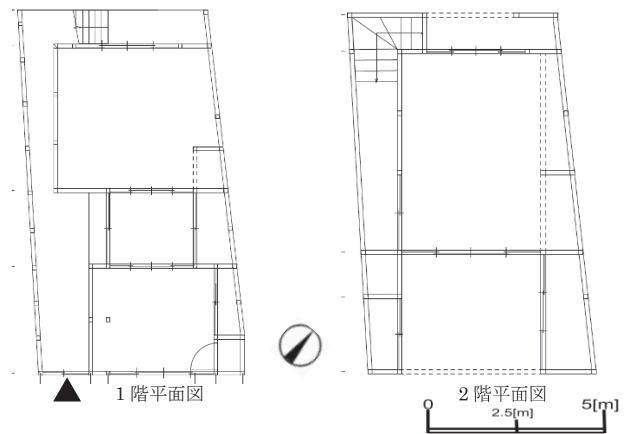


図3 SSA家平面図

#### 3.2 WKS家

東町の中央付近に位置する伝統構法で建てられた木造2階建て住宅で、18世紀前半に建てられたとされる現存する宮島町家の中では最も古い町家である。当初、2階部分はツシ2階で全面高は1300mmと非常に低い形状だったが、昭和後期に天井高を上げて室化した。「オウエ」の上部は現在でも吹き抜けとなっている。図4に外観写真、図5に平面図を示す。隣接する家屋との関係は、図4の左側が2階まで、右側が1階まで、外壁が極めて近い状態で建っている。



図4 WKS家外観写真

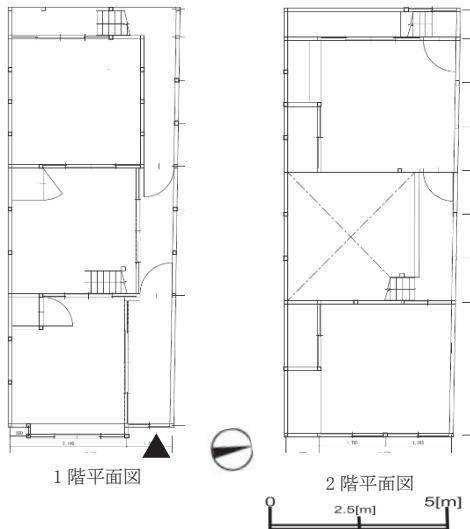


図5 WKS家平面図

### 3.3 SRM家

西町に位置する大正期に伝統構法で建てられた木造2階建て住宅である。建設当初はツシ2階として建てられていたが昭和初期ごろに天井を高くして本2階にして居住に使用されるようになった。WKS家と異なり「オウエ」の上部は室化している。図6に外観写真、図7に平面図を示す。隣接する家屋との関係性は、図7の左側が2階まで、右側が1階まで、隣接家屋の外壁が極めて近い状態で建っている。



図6 SRM家外観写真

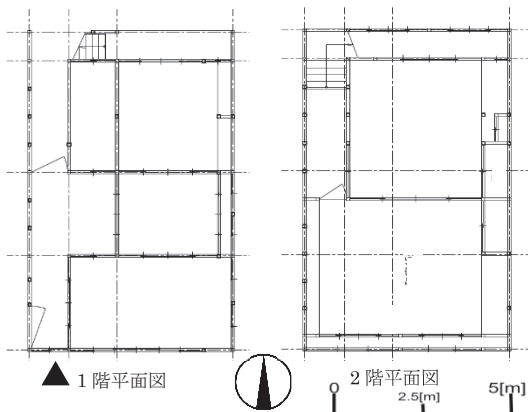


図7 SRM家平面図

### 3.4 評価・分析方法

本報では前述のように耐震診断と常時微動計測を用いて建物の構造特性の分析を行う。耐震診断では、文献<sup>3)</sup>に記載のある一般診断法、精密診断法1、精密診断法2（限界耐力計算）の3つの診断方法を用いる。なお、耐震診断には耐震診断ソフトウェアである「ホームズ耐震診断 Pro. Ver.4.3.0.1」<sup>4)</sup>を用いる。常時微動計測は、水平動用の2台と上下動用の1台の計3台の振動計を1か所1組とし、2か所同時に計測を行った。計測に用いた機器は、動コイル型電磁変換方式小型長周期振動計【水平動（東京測振社製、SM-121）、上下動（同SM-122）】で、固有周期2.0秒、測定周波数0.5Hz～50Hzである。それらを建物敷地内の地盤と、町家の2階床上あるいは1階床上の3箇所に主として設置した。

## 4. 耐震診断

本研究では、耐震診断法として前述の一般診断法、精密診断法1、精密診断法2（限界耐力計算）の3つの方法を用いて耐震診断を行う。なお、耐震診断では上部構造評点の値で建物の耐震性能が評価され、各階各方向の上部構造評点の最小値が0.7未満であれば「倒壊する可能性が高い」、0.7以上1.0未満であれば「倒壊する可能性がある」、1.0以上1.5未満であれば「一応倒壊しない」、1.5以上であれば「倒壊しない」と判定される。

### 4.1 一般診断法を用いた診断結果

一般診断法は最も簡易的な診断方法で、診断の主目的は、対象とする建物が耐震補強を必要とするのか判断することである。下記に研究対象となる3件の町家について、一般診断法で必要となる条件を表1に示し、一般診断法を用いた耐震診断結果を表2から表4に示す。

表1 一般診断法 計算条件

建物名称	階数	構法	階	床面積 [㎡]	建物重量	接合部仕様	基礎仕様	床倍率
SSA家	2階建て	伝統的構法	2	45.6	重い	Ⅲ・Ⅳ	Ⅲ	0.5未満
			1	53.1				
WKS家	2階建て	伝統的構法	2	50.8	重い	Ⅲ・Ⅳ	Ⅲ	0.5未満
			1	51.6				
SRM家	2階建て	伝統的構法	2	70.0	重い	Ⅲ・Ⅳ	Ⅲ	0.5未満
			1	70.0				

表 2 一般診断法による耐震診断結果 (SSA 家)

建物名称	階数	床面積 [m <sup>2</sup> ]	必要耐力 [kN]	方向	壁・柱の耐力 [kN]	配置による低減係数	劣化度による低減係数	保有耐力 [kN]	上部構造評点
SSA 家	2 階	45.58	21.57	短手	4.66	0.54	1.00	2.53	0.11
				長手	21.18	1.00	1.00	21.18	0.97
	1 階	53.09	50.65	短手	12.80	0.59	1.00	7.59	0.14
				長手	68.24	1.00	1.00	68.24	1.34

表 3 一般診断法による耐震診断結果 (WKS 家)

建物名称	階数	床面積 [m <sup>2</sup> ]	必要耐力 [kN]	方向	壁・柱の耐力 [kN]	配置による低減係数	劣化度による低減係数	保有耐力 [kN]	上部構造評点
WKS 家	2 階	50.81	24.24	短手	14.16	0.71	1.00	10.11	0.41
				長手	26.38	1.00	1.00	26.38	1.08
	1 階	51.56	49.19	短手	7.84	0.83	1.00	6.53	0.13
				長手	78.35	1.00	1.00	78.35	1.59

表 4 一般診断法による耐震診断結果 (SRM 家)

建物名称	階数	床面積 [m <sup>2</sup> ]	必要耐力 [kN]	方向	壁・柱の耐力 [kN]	配置による低減係数	劣化度による低減係数	保有耐力 [kN]	上部構造評点
SRM 家	2 階	63.66	30.37	短手	5.74	0.80	1.00	4.59	0.15
				長手	30.76	1.00	1.00	30.76	1.01
	1 階	63.66	60.74	短手	2.29	0.40	1.00	0.91	0.01
				長手	38.74	0.74	1.00	28.66	0.47

一般診断法を用いた診断の結果、上部構造評点の値は SSA 家では0.11、WKS 家では0.13、SRM 家では0.01となり、すべての建物で「倒壊する可能性が高い」と判定された。3 件に共通して、長手方向では上部構造評点が高い傾向にあるが、短手方向では著しく低い値となっている。このことから、図 1 に示すような宮島の標準的な平面形状を有する町家では、短手方向の耐震性能を向上させることが必要になると考えられる。

#### 4.2 精密診断法1を用いた診断結果

精密診断法 1 は一般診断法で補強が必要と判断された場合に行う、より詳細な耐震診断法である。そのため、一般診断法では評価できなかった部分を評価することができる。精密診断法 1 で必要となる条件は一般診断法と同様であるのでここでは割愛する。精密診断法を用いた診断の結果を表 5 から表 7 に示す。

表 5 精密診断法 1 による耐震診断結果 (SSA 家)

建物名称	階数	床面積 [m <sup>2</sup> ]	必要耐力 [kN]	方向	壁・柱の耐力 [kN]	剛性率による低減係数	偏心率・床倍率による低減係数	保有耐力 [kN]	上部構造評点
SSA 家	2 階	45.58	22.98	短手	4.66	1.00	0.71	3.32	0.14
				長手	21.18	1.00	1.00	21.18	0.92
	1 階	53.09	46.71	短手	12.80	1.00	1.00	12.80	0.27
				長手	68.24	1.00	0.70	47.63	1.01

表 6 精密診断法 1 による耐震診断結果 (WKS 家)

建物名称	階数	床面積 [m <sup>2</sup> ]	必要耐力 [kN]	方向	壁・柱の耐力 [kN]	剛性率による低減係数	偏心率・床倍率による低減係数	保有耐力 [kN]	上部構造評点
WKS 家	2 階	50.81	25.16	短手	14.16	1.00	0.71	10.11	0.40
				長手	26.38	1.00	1.00	26.38	1.04
	1 階	51.56	49.10	短手	7.84	0.77	0.83	5.02	0.10
				長手	78.35	1.00	1.00	78.35	1.59



表7 精密診断法1による耐震診断結果 (SRM家)

建物名称	階数	床面積 [m <sup>2</sup> ]	必要耐力 [kN]	方向	壁・柱の耐力 [kN]	剛性率による低減係数	偏心率・床倍率による低減係数	保有耐力 [kN]	上部構造評点
SRM家	2階	63.66	31.52	短手	5.74	1.00	1.00	5.74	0.18
				長手	30.88	1.00	1.00	30.88	0.97
	1階	63.66	52.72	短手	2.28	0.72	0.56	0.92	0.01
				長手	38.73	1.00	1.00	38.73	0.73

精密診断法1を用いた診断の結果、上部構造評点の値はSSA家では0.14、WKS家では0.10、SRM家では0.01となり、すべての建物で「倒壊する可能性が高い」という結果となった。一般診断法と比較して値に多少の変化はあるが、SRM家の1階長手方向を除いて耐震性能の判定結果が大きく変わることはなかった。値に変化が見られる主な要因は、各種低減係数の値の影響である。SRM家の1階長手方向はこの低減係数の値が上部構造評点に大きな影響を及ぼしている。

#### 4.3 精密診断法2 (限界耐力計算)

限界耐力計算とは、建物の各階の地震動の復元力特性を作成し、建物を一質点系に置き換えた上で、加速度応答スペクトルを用いて、地震時の建物応答を予測する方法である。前述の2つの耐震診断法では考慮されなかった地盤の特性などが考慮されるため、より詳細に診断を行うことが出来る。表8から表10に診断結果を示す。なお、本計算では地盤種別を第1種地盤と仮定し、地盤増幅率の値は略算法を用いて計算をするものとする。

表8 精密診断法2 (限界耐力計算)による耐震診断結果 (SSA家)

建物名称	階数	方向	各階重量 [kN]	安全限界耐力 [kN]	ベースシア係数	作用する地震力 [kN]	表層地盤増幅率	安全限界固有周期 [s]	上部構造評点
SSA家	2階	短手	87.81	11.83	0.12	25.51	1.35	1.77	0.46
		長手		29.02	0.28	39.26	1.35	0.91	0.73
	1階	短手	122.37	17.08	0.09	47.57	1.35	1.77	0.35
		長手		59.99	0.32	73.07	1.35	0.91	0.82

表9 精密診断法2 (限界耐力計算)による耐震診断結果 (WKS家)

建物名称	階数	方向	各階重量 [kN]	安全限界耐力 [kN]	ベースシア係数	作用する地震力 [kN]	表層地盤増幅率	安全限界固有周期 [s]	上部構造評点
WKS家	2階	短手	106.97	12.99	0.11	15.2	1.35	2.80	0.85
		長手		34.99	0.28	63.28	1.35	0.66	0.55
	1階	短手	174.63	11.96	0.05	31.74	1.35	2.80	0.37
		長手		132.96	0.52	131.31	1.35	0.66	1.00

表10 精密診断法2 (限界耐力計算)による耐震診断結果 (SRM家)

建物名称	階数	方向	各階重量 [kN]	安全限界耐力 [kN]	ベースシア係数	作用する地震力 [kN]	表層地盤増幅率	安全限界固有周期 [s]	上部構造評点
SRM家	2階	短手	127.33	10.44	0.07	12.42	1.35	4.47	0.84
		長手		41.01	0.28	55.49	1.35	1.18	0.73
	1階	短手	165.54	3.29	0.01	22.5	1.35	4.47	0.14
		長手		51.75	0.20	100.91	1.35	1.18	0.51

精密診断法2 (限界耐力計算)を用いた診断の結果、上部構造評点の値はSSA家では0.35、WKS家では0.37、SRM家では0.14となり、すべての建物で「倒壊する可能性が高い」という結果となった。先に示した2つの耐震診断法の結果と比べて評価は変わらなかったが、上部構造評

点の値は大きく上昇した。限界耐力計算では地盤を考慮して計算していることから、上部構造評点の値が上昇した背景には地盤の評価が大きく影響していると考えられる。

## 5. 常時微動計測

SSA 家、WKS 家と SRM 家では常時微動計測の際に用いた機器、およびデータ収集ソフトウェアが異なるため、計測を行う上での設定について説明する。SSA 家と WKS 家は、計測時間を約 5 分 20 秒、サンプリング周波数を 100Hz とし、SRM 家は、計測時間を 5 分、サンプリング周波数を 1000Hz としている。いずれもフィルター処理は行っていない。得られたデータから FFT 解析を行い、地盤特性は鉛直 (V) に対する水平 (H) のスペクトル比 (H/V) から、建物特性は同一方向の地盤に対する 2 階床のスペクトル比から検討した。なお、FFT 解析に際してローパスフィルターを 10Hz、ハイパスフィルターを 1Hz に設定した。

### 5.1 地盤卓越振動数

地盤の計測では 3 台の計測機器を直接地盤に置いて計測を行うこととしたが、SSA 家のみ直接地盤に置くことが出来なかったため、土間コンクリートの上に振動計を置いて計測を行った。図 8 に SSA 家、図 9 に WKS 家の H/V スペクトル比のグラフを示す。図中の 1 ch が短手方向、2 ch が長手方向の水平動、3 ch が上下動を示しており、赤色が短手方向、青色が長手方向を示す。なお、SRM 家については現在計測データの分析中のため、本報では参考値として示す。

SSA 家では、短手方向で 4.80Hz、長手方向で 4.09Hz がピークとなったが、他 2 件に比べてはっきりとしたピークを示していない。これは上述した通り直接地盤の上に振動計を設置して計測できなかったことが原因であると考えている。

WKS 家では、短手方向で 3.56Hz、長手方向で 3.55Hz にピークを示している。

SRM 家では、短手方向で 4.22Hz、長手方向で 4.99Hz にピークが確認された。

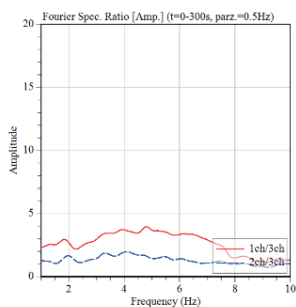


図 8 H/V スペクトル比 (SSA 家)

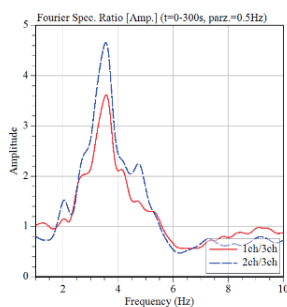


図 9 H/V スペクトル比 (WKS 家)

この 3 件の結果から、WKS 家に比べて SSA 家と SRM 家の方が相対的に地盤が硬いことが分かる。ただし、前述

した通り SSA 家のデータは不明瞭であるため、後日再計測を実施予定である。

### 5.2 建物の固有振動数

SSA 家、WKS 家では、水平動 2 方向と上下動の計 3 台の振動計を地盤と 2 階床面にそれぞれ設置して計測を行ったが、SRM 家では計測機器の不具合のため 2 階床面を 1 方向ずつ、計 2 回、別々に計測した。そのため、SRM 家では短手方向と長手方向の計測時間が異なることに注意されたい。図 10 に SSA 家、図 11 に WKS 家の伝達関数を示す。SRM 家については前節と同様の理由で参考値として示す。なおグラフの 1 ch が地盤短手方向、2 ch が地盤長手方向、4 ch が 2 階床短手方向、5 ch が 2 階床長手方向を示しており、赤色が短手方向、青色が長手方向を示す。

SSA 家では、短手方向で 2.32Hz、長手方向で 4.83Hz にピークが確認できる。

WKS 家では、短手方向で 3.01Hz、長手方向で 5.45Hz にピークが確認できる。

SRM 家では、短手方向で 4.46Hz、長手方向で 4.90Hz にピークが確認された。

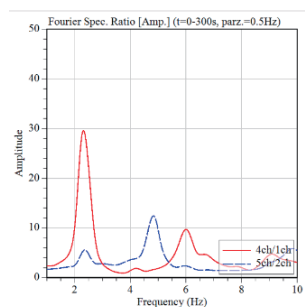


図 10 固有振動数 (SSA 家)

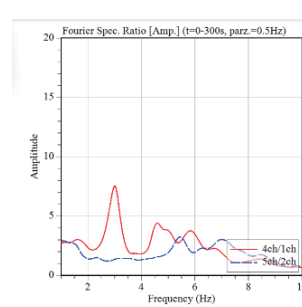


図 11 固有振動数 (WKS 家)

以上の結果から、3 件すべてで短手方向より長手方向の固有振動数の値が高くなっていることが分かる。これは、壁長さが短手方向に対して長くなることから、建物の剛性が高くなるものと考えられる。2 つ目に、短手方向の結果を比較すると、SSA 家に比べて WKS 家と SRM 家が高い値となっている。これは、隣接する家屋による影響で振動が抑制されていることが要因の一つと考えられる。3 つ目に、SSA 家と WKS 家のグラフでピークが複数出ていることが分かる。このことから、床構面の剛性の低さから各構面が複雑な挙動をしているものと推測される。

## 6. 耐震診断結果と常時微動計測結果の関係性

本研究では、耐震診断により得られる建物の耐震性能と常時微動計測結果との関係性を明らかにすることで、常時微動計測による町家の耐震性能の簡易推定法を提案することを目的としている。本報で対象とした 3 件の町家につい

て、耐震診断結果と常時微動計測結果の間にはどのような関係性があるのか検討する。

一般診断法で求めた壁・柱の耐力と、常時微動計測により得られた建物の固有振動数との関係性を図12に示す。図中の青色の点が長手方向、橙色の点が短手方向、グラフの赤色がSSA家、緑色がWKS家、青色がSRM家を示している。

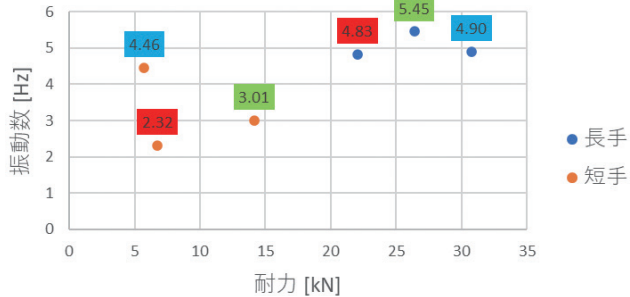


図12 壁・柱の耐力と固有振動数との関係性

ここで用いた壁・柱の耐力は、低減係数の値を掛ける前の値である。今回の結果からは長手方向、短手方向ともに明確な相関関係は見られなかった。今後、調査件数を増やして検証を進める予定である。

## 7. 結論

今回対象とした3件の町家では、耐震診断の結果、一般診断法では、SSA家が0.11、WKS家が0.13、SRM家が0.01となり、精密診断法1ではSSA家が0.14、WKS家が0.10、SRM家が0.01となり、精密診断法2（限界耐力計算）ではSSA家が0.35、WKS家が0.37、SRM家が0.14という上部構造評点の値が得られた。耐震診断法の違いにより値が変わっている部分もあるが、判定基準に基づき、すべての建物で倒壊する可能性が高いと判定された。特に短手方向の上部構造評点の値が著しく低いため、短手方向の耐力をいかにして上昇させるかが課題となる。また、限界耐力計算を用いる診断法を適用した場合では、上部構造評点の値が他の二つの診断法を適用した際と比較して向上したことから、敷地地盤の性能を適切に評価することが重要であることが分かった。

常時微動計測の結果では、地盤卓越振動数の値は、SSA家では約4.10Hz～4.90Hz、WKS家では約3.55Hz、SRM家

では約4.20Hz～5.00Hzとなった。SSA家については再検討の余地があるものの、WKS家に比べSSA家とSRM家の方が硬い地盤上に位置しているものと考えられる。このような結果から、同じ宮島でも場所によって地盤の特性が大きく異なる可能性があると考えられる。建物の固有振動数については、短手方向ではSSA家が2.32Hz、WKS家では3.01Hz、SRM家では4.46Hzとなり、長手方向ではSSA家が4.83Hz、WKS家が5.45Hz、SRM家が4.90Hzとなった。3件とも短手方向に比べて長手方向の方が硬いことが分かった。また短手方向については、両隣の建物との距離が極めて近いWKS家とSRM家の方がSSA家より高い値が計測されたことから、隣接する家屋が町家の固有振動数に影響を与えている可能性が示唆された。ただし、SRM家については現在データの分析中であることを念のため付記しておく。

最後に、耐震診断と常時微動計測の関係性については、今回調査を行った範囲では明確な関係性は見出せなかった。今後さらに調査件数を増やして検証を進める予定である。

## 謝辞

本報に示した実測調査ならびに振動計測は広島工業大学環境学部建築デザイン学科光井研究室の学生諸氏の協力の下に実施した。また、調査にご協力いただいた廿日市市役所関係者ならびに町家所有者の皆さまに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 岩井哲、光井周平：宮島町家の構造特性に関する研究（その2）家屋と地盤の常時微動調査結果、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.585-586、2021年9月
- 2) 廿日市市教育委員会：厳島寺社門前町廿日市市厳島伝統的建造物群保存対策調査報告書、pp.8-30、2007年
- 3) 日本建築防災協会、国土交通大臣指定耐震改修支援センター：2012 改訂版 木造住宅の耐震診断と耐震補強方法、pp.17-124、2012年
- 4) ホームズ君耐震診断 Pro ver.4.3.0.1：株式会社インテグラル