

常時微動計測による博物館明治村の近代建築物の振動性状データベース構築

DEVELOPMENT OF DATABASE ON DYNAMIC PROPERTIES OF HISTORICAL MODERN ARCHITECTURES IN MEIJI-MURA BASED ON MICROTREMOR OBSERVATION

藤井智規 ——— *1 福和伸夫 ——— *2
千賀英樹 ——— *3 飛田 潤 ——— *4
吉田明義 ——— *1

Tomoki FUJII Nobuo FUKUWA
Hideki SENG A Jun TOBITA
Akiyoshi YOSHIDA

キーワード：
近代建築，常時微動計測，表層地盤，固有振動数，耐震補強，データベース

Keywords：
Modern architectures, Microtremor measurement, Surface layer, Natural frequency, Seismic retrofit, Database

1. 序論

文化財建築物は、わが国の長い歴史の中で生まれ、育まれ、今日の世代に守り伝えられてきた貴重な国民的財産である。その中でも江戸時代以前の建築物は歴史的価値が認識され、保護や研究が精力的に行われているが、明治期以降の近代建築物に対する関心は必ずしも高くなく、耐震性の不足を理由に取り壊されることも多い。

文化財保護法では、有形文化財のうち重要なものを重要文化財、さらに世界文化の見地から特に価値の高いものを国宝に指定し、保護している。これらに加えて文化財登録制度により、保存・活用の措置が必要な建築物の保護を行っている。また通達により、文化財としての価値を損なわない範囲で、耐震安全性を確保するために必要な補強を実施できることとなった。特に東海地域では、近い将来に予測される東海・東南海地震等に対する耐震性の確保が、文化財建築物の保全に当たって重要課題である。

本報では、近代建築物保存に向けた基礎的研究として、博物館明治村に移築保存されている近代文化財建築物の構造的なデータベースの構築を目的とし、建物資料調査と常時微動計測を行った。明治村には様々な構造・用途・規模の近代建築物が集積し、設計図や移築報告等の資料も詳細に纏められている。これらの資料を常時微動計測による振動特性と共にデータベース化することにより、明治村内の近代建築物の継続的な保存に寄与すると共に、他地域の同種の建築物保存への基礎資料を提供できる。また、多数の建物について振動特性を把握することにより、この時期の建物の用途・規模・構造などと振動特性の関係を概括的に把握できる。更に、耐震補強後の振動特性を現状と比較することによる補強効果の確認、強い地震動

Dynamic properties evaluation by microtremor observation was conducted for valuable modern historical buildings in the architectural museum “Meiji-mura”. The estimated natural frequency and damping ratio of all the buildings are accumulated into database together with the structural and historical features of the building. Surface layer characteristics are examined at many points in the museum, and the area of filled ground is clearly shown. The earthquake observation is also conducted at three important buildings. Such observation and database are important for planning seismic retrofit of these buildings.

を経験した後の振動特性の変化による損傷評価などが可能になる。

2. 博物館明治村の概要及び対象建築物

博物館明治村は、明治時代の建築物を移築し、保存展示する野外博物館であり、昭和 40 年、愛知県犬山市の入鹿池湖畔に開村した。この地は濃尾平野北東端に境する丘陵地であり、約 100 万 m² の村内は起伏に富み、高低差が 40m を超え、入江や谷を埋め立てた地盤や尾根と谷間を整地した切盛土が複雑に入り組んでいる。

明治村に移築・復原された建造物は 67 件あり、うち重要文化財 10 件、愛知県有形文化財 1 件、その他殆どの建造物が登録有形文化財である。調査対象とした建築物は、明治村内に移築保存されている全 67 建造物のうち、蒸気機関車や橋梁、燈台などを除く、1868 年から 1927 年に建てられた 51 件である。移築後の構造別に見ると、内訳は木造 38 件、S 造 2 件、RC 造・SRC 造各 1 件及び混構造 9 件である。混構造とは、建築ときに煉瓦造または石造の躯体に木造の小屋組を成したもので、移築時に躯体を RC 造に造り替えた建築物

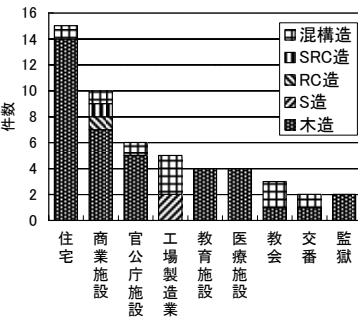


図 1 用途と構造

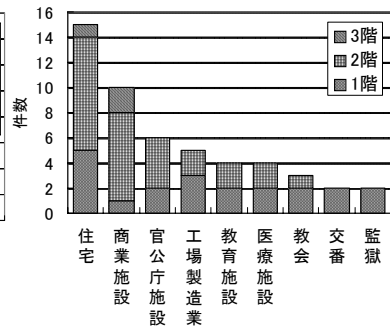


図 2 用途と建物階数

*1 魚津社寺工務店 修士(工学)
(〒454-0004 愛知県名古屋市中川区西日置 2-12-20)
*2 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 教授・博士(工学)
*3 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 大学院生
*4 名古屋大学大学院環境学研究科 助教授・博士(工学)

Uotsu Shaji Corporation, M.Eng.
Professor, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.
Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Associate Professor, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

である。図1及び図2に構造、階数及び用途の分布を示す。これらの図より、村内には構造では木造、用途では住宅が最も多く、1階あるいは2階建てが主である。住宅とほぼ同等の構造・規模を有する店舗、食堂等の商業施設もある。

3. 計測とデータベースの概要

常時微動計測は2005年7月7日から同12月16日までの間の計12日間、日中や閉村後の時間に実施した。振動計研製の水平2成分及び上下成分の3成分を同時に計測できる動コイル型微動計を用いて速度成分を計測しており、サンプリングは100Hzもしくは200Hz、1回24分間の記録を、各建築物につき1〜3回収録した。

微動計の設置は、図3に示す西郷従道邸の例のように、対象建築物1件につき地盤、1階床上、小屋裏にそれぞれ1点の計3点を基本とした。平面形状が複雑な建築物も含め、建築物本来の動的特性を捉えられるよう、できるだけ建築物の中心部に近い位置を選んだ。また、構造形式の異なる和室と洋室が接続されている場合や、複数の建築物が渡り廊下で連結されている場合などは、小屋裏や1階に複数の微動計を設置し、場所による振動特性の差も検討した。

本論で構築するデータベースの収集項目を表1に示す。項目⑬の移築時の変更点は、移築の際の主構造及び平面形状の変更点を記述した。項目⑮の1次固有振動数及び項目⑯の1次減衰定数は、地盤-建物連成系の結果を基本とした。1次固有振動数は地盤-建物連成系あの伝達関数のピークより求め、減衰定数はRD法による自由振動波形の対数減衰率から求めた。

これらのデータベースを元に、図4のようなリーフレットを51棟全ての建築物で作成した。このリーフレットには平面図や建築物の構造的特徴とともに、微動計の設置状況、速度波形、フーリエスペクトル及び伝達関数等の計測結果がまとめて記載されている。リーフレットは誰でも閲覧可能であり、次のサイトにリンクが貼られている。<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/>

それぞれ異なる特徴を持つ聖ヨハネ教会堂、東松家住宅、帝国ホテル中央玄関の3棟では、常時微動計測終了後に地震計を設置し、2006年3月24日から継続的に強震観測を行っている。地震計は応

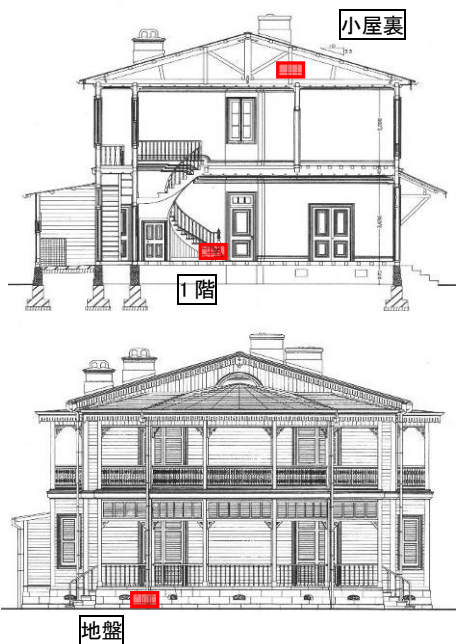


図3 センサー設置点

用地震計測製の加速度計 E-Catcher を用い、基本的に微動計と同じ位置で小屋裏と1階の2箇所に設置した。

4. 明治村の地形改変と地盤震動特性

明治村の地盤は、2節で述べたように複雑な地形の上に切盛土が行われているため、地盤震動特性は地点毎に大きく異なることが予想される。図5は敷地の地形と建物配置に加えて、埋め立てや盛土の分布を示している。地形改変は資料に乏しいため、明治村の建築担当者のヒアリングに基づいて作成した。図中の濃色部分は現在の入鹿池、薄い色は盛土を表す。入江や谷を埋め立てた地点は、南部の16 東山梨郡役所から23 京都七條巡査派出所までの通り及び北部の67 帝国ホテル中央玄関から60 東京駅警備巡査派出所一帯に相当する。特に前者の地点には18 東松家住宅、16 東山梨郡役所など重要文化財に指定されている建物が複数建ち並んでいる。

各建物付近で得られたH/V スペクトルを図6に示す。盛土部分に該当する地点のグラフの背景を灰色としている。全体的な傾向として、盛土部では5〜10Hz付近にピークが見られる地点が多く、一方、盛土以外では明確なピークが無い場合が多い。表層数m程度の軟弱地盤層の影響が明確に現れていると考えられる。

5. 常時微動計測に基づく建物の振動特性

常時微動から求めた固有振動数及び減衰定数の一覧を表2及び図7に示す。建物用途に着目すると、木造住宅、商業施設、医療施設等の民間建築物は、長辺・短辺ともに概ね3〜6Hzの1次固有振動数である。一方、教育施設や官公庁施設等の公共建築物は約2〜5Hzであり、民間建築物に比べ周期が長い傾向がある。これは、公共建築物は建物規模や部屋が大きい場合が多く、床面積に対して壁量が少ないためと考えられる。減衰定数は概ね1〜3%と全体的に低減衰であるが、木造の用途による違いは明確には見られない。

表1 データベース項目

①名称	⑨移築前の用途
②建築年、解体年及び移築	⑩建築面積
③旧所在地	⑪延床面積
④立地点	⑫基礎種別
⑤移築後の主要構造	⑬移築時の変更点
⑥階数	⑭計測年月日
⑦最高高さ	⑮1次固有振動数
⑧標高	⑯1次減衰定数

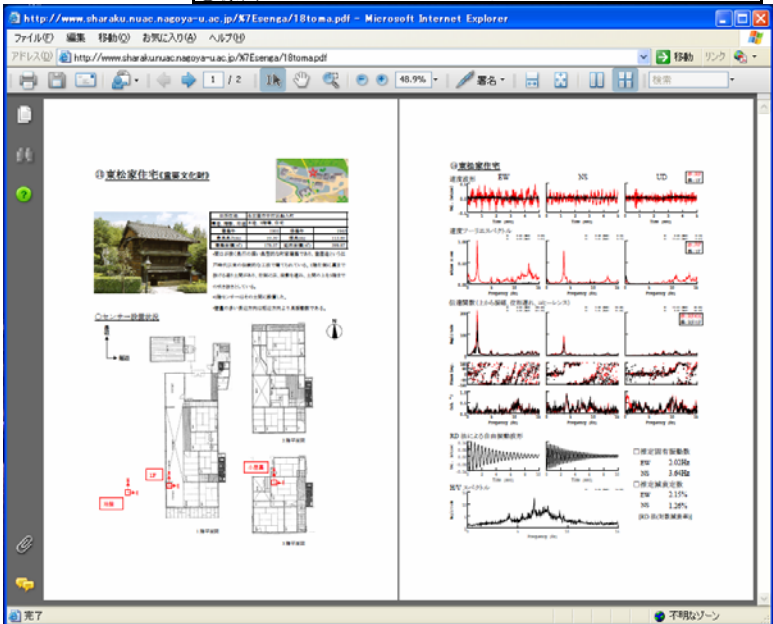
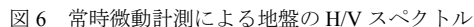
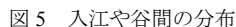


図4 リーフレット

全体的に最高高さと固有周期に正の相関があるが、木造建築物は固有周期にばらつきが大きく、混構造は主要構造が複雑で傾向が揃わず、その他の構造はサンプル数が少ないことなどから、



番号	建物名称	構造	階数	用途	振動数 (Hz)		減衰定数(%)		番号	建物名称	構造	階数	用途	振動数 (Hz)		減衰定数(%)	
					長辺	短辺	長辺	短辺						長辺	短辺	長辺	短辺
2	大井牛肉店	木造	2	商業施設	7.4	5.2	1.3	1.8	34	第四高校道場「無声堂」中央	木造	1	教育施設	3.0	2.1	1.3	2.0
3	三重県尋常師範・蔵持小学校	木造	2	教育施設	2.3	2.5	1.6	1.5	34	第四高校道場「無声堂」東側	木造	1	教育施設	3.0	2.1	1.3	1.9
4	近衛局本部付属倉	木造	1	官公庁施設	6.0	4.4	1.6	1.0	35	日本赤十字社中央病院病棟	木造	1	医療施設	4.4	4.6	1.1	1.5
6	聖ヨハネ教会堂 梁上	混構造	2	教会	7.2	7.2	1.1	2.1	36	歩兵第六聯隊兵舎	木造	2	官公庁施設	4.6	3.3	1.6	1.1
6	聖ヨハネ教会堂 塔	混構造	2	教会	4.4	4.1	4.1	3.2	37	名古屋衛戍病院 北棟	木造	1	医療施設	5.3	5.5	1.5	2.4
7	学習院長官舎 北側	木造	2	住宅	2.9	3.1	1.4	1.3	37	名古屋衛戍病院 南棟	木造	1	医療施設	5.1	4.6	2.5	2.4
7	学習院長官舎 南側	木造	2	住宅	2.9	3.1	1.4	1.4	38	シアトル日系福音教会	木造	2	住宅	6.5	5.0	1.9	3.2
8	西郷従道邸	木造	2	住宅	4.6	4.3	2.0	1.5	39	ブラジル移民住宅	木造	2	住宅	6.5	6.0	2.6	1.1
9	森鷗外・夏目漱石住宅	木造	1	住宅	4.1	3.8	1.5	1.2	40	ハワイ移民集会所	木造	1	住宅	6.3	4.6	2.1	2.1
12	鉄道局新橋工場	S造	1	工場・製造業	5.6	3.4	0.7	1.3	44	鉄道寮新橋工場・機械館	S造	1	工場・製造業	6.6	3.8	2.2	3.1
13	三重県庁舎 中央	木造	2	官公庁施設	2.8	3.2	3.1	2.2	45	工部省品川硝子製造所	混構造	2	工場・製造業	8.9	4.8	1.9	1.3
13	三重県庁舎 端部	木造	2	官公庁施設	2.9	3.3	2.1	2.4	46	宇治山田郵便局	木造	1	商業施設	4.5	4.9	1.4	2.3
14	千早赤阪小学校講堂	木造	2	教育施設	2.5	2.3	1.4	1.5	47	本郷喜之床	木造	2	商業施設	4.7	3.2	1.0	1.5
15	第四高校物理化学教室	木造	1	教育施設	4.0	4.0	2.2	4.2	48	小泉八雲避暑の家	木造	2	住宅	6.0	2.1	1.3	2.3
16	東山梨郡役所	木造	2	官公庁施設	3.6	3.7	1.7	1.6	49	呉服座	木造	2	商業施設	2.9	3.3	2.5	2.2
17	清水医院	木造	2	医療施設	6.7	6.7	1.0	1.2	50	半田東湯	木造	2	商業施設	4.6	3.2	2.0	2.3
18	東松家住宅	木造	3	住宅	3.6	2.0	1.3	2.2	51	聖パオロ天主堂	混構造	1	教会	6.0	4.6	1.2	0.8
19	京都中井酒造	木造	2	住宅	4.2	2.8	0.9	1.4	56	大明寺聖パウロ教会堂	木造	1	教会	3.7	3.0	1.4	1.0
20	安田銀行会津支店	木造	2	商業施設	4.1	4.0	2.4	1.5	57	川崎銀行本店	RC造	3	商業施設	7.7	6.6	1.4	1.2
21	札幌電話交換局	混構造	2	商業施設	7.0	6.0	1.5	1.3	59	内閣文庫	混構造	2	官公庁施設	7.2	7.2	9.9	4.4
23	京都七條巡查派出所	木造	1	交番	13.1	11.4	3.3	2.6	60	東京駅警備巡查派出所	混構造	1	交番	12.5	11.2	8.3	9.3
25	北里研究所本館・医学館	木造	2	医療施設	3.7	3.4	1.9	1.4	61	前橋監獄雑居房	木造	1	監獄	2.4	3.4	1.8	2.3
26	幸田露伴住宅「蝸牛庵」	木造	2	住宅	4.1	3.8	1.4	1.8	62	金沢監獄看守所・監房 北側	木造	1	監獄	3.1	3.0	1.4	1.2
27	西園寺公望別邸「坐漁荘」	木造	2	住宅	3.8	3.8	1.7	1.9	62	金沢監獄看守所・監房 南側	木造	1	監獄	6.1	9.6	1.8	1.0
28	茶室「亦楽庵」	木造	1	住宅	6.2	5.7	1.7	2.0	63	官庁裁判所法廷	木造	1	官公庁施設	3.6	4.2	1.2	1.1
30	菅島燈台附属官舎	混構造	1	住宅	—	10.4	—	0.8	64	菊の世酒蔵	混構造	2	工場・製造業	4.7	3.3	1.5	1.3
31	長崎居留地二十五番館 北側	木造	1</														

構造別の回帰式を得ることは困難である。全体的傾向としては、最高高さが等しいときには、木造建築物の固有周期が最も長く、RC・SRC・混構造は短めで、S造建築物はそれらの間にある。ここで、サンプル数が多い木造建築物に着目して振動特性の傾向を分析する。

木造住宅17件について建築年及び移築年と固有周期の関係を図9及び図10に示す。建築年と固有周期には明確な相関は見られないが、一部の建物を除き、移築年が新しいほど短周期となる傾向が現れている。これは、移築当時の建築基準法に従い、壁の中に筋交いを新設したり、土壁を塗り替えたりしたため、建物の剛性が大きくなったと考えられる。

木造住宅及び同様の規模・構造を有する商業施設の計20件について屋根重量の影響を検討するため、屋根種類別の固有周期と最高高さの関係を図11に示す。瓦葺きの重い屋根の建物は、板や金属板の軽い屋根の建物に比べ、固有周期が長い傾向がある。また、同じ瓦屋根でも小屋組の違いによって特性が異なり、洋小屋より和小屋の建物の方が固有周期が長い、その理由として洋小屋の斜材が屋根部を剛床化し、水平剛性の増大に寄与していることも考えられる。

図12に用途や平面形状毎の固有周期と最高高さの関係を示す。平面形状は片廊下型もしくは中廊下型の平面を持つ学校建築に近似できる建物、間口が狭く奥行きが長い町屋型の平面を持つ建物、及び町屋を除く住宅を小屋組別に分類し、比較を行った。町屋型建築は長辺方向に壁量が多いため、学校建築や他の住宅に比べて長辺と短

辺の剛性の差が大きい。

図13に住宅及びそれに準じた規模や構造を有する商業施設の壁率と固有振動数の関係を示す。ここで壁率とは、耐震壁の長さを垂壁・腰壁を除く建物の壁の総延長とし、壁倍率を一律1.0として以下の式のように長辺・短辺方向についてそれぞれ算出した。

$$\text{壁率}(\text{cm/m}^2) = \{1 \text{ 階壁総延長}(\text{cm}) / \text{延床面積}(\text{m}^2)\} \times 1.0$$

壁率が高いほど、即ち1階の壁量が多い建物ほど固有振動数が高い。また、その傾向は小屋組によって明瞭な差があり。同じ壁率では、和小屋の建物がより固有振動数が低いことが分かる。

6. 強震観測記録に基づく建物の振動特性

3節で述べた強震観測を行っている3建物の構造を以下に示す。

聖ヨハネ教会堂は移築時に1階部分をレンガ造からRC造へと変更し、2階部分を木造とする混構造建築物である。東松家住宅は3階建ての間口が狭く奥行きが深い町屋風建築であり、内部に吹き抜けを持つ。帝国ホテル中央玄関はF.L.ライトが設計した意匠的に優れた建物である。建設当時はRC造であったが、移築・復原時に一部に鉄骨を埋め込み、SRC造へと補強している。これら3棟の外観写真、平面図及び地震計設置状況を図14に示す。

観測開始から2006年9月現在までに観測された主な地震記録は、2006年8月25日に起きた愛知県西部地震のみであり、この地震のマグニチュードは3.9、震源深さは43km、震央距離は約15kmである。3棟の1階及び小屋裏の加速度波形とフーリエスペクトルを図

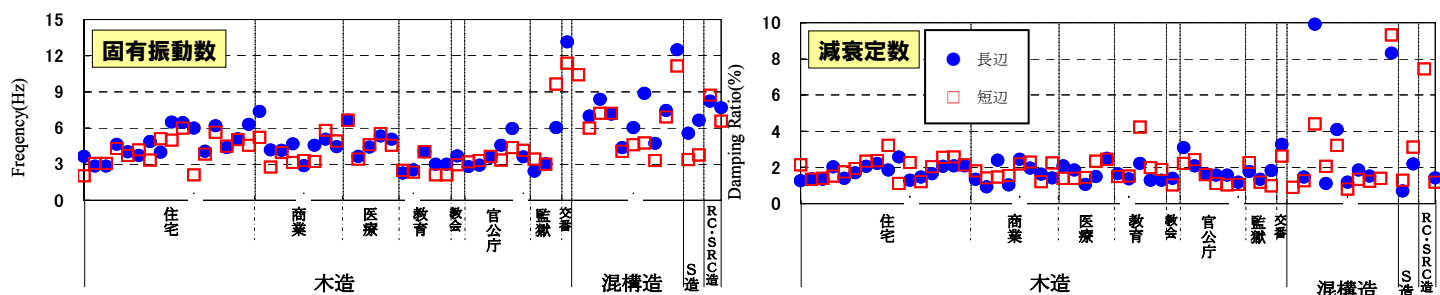


図7 主構造別の固有振動数と減衰定数

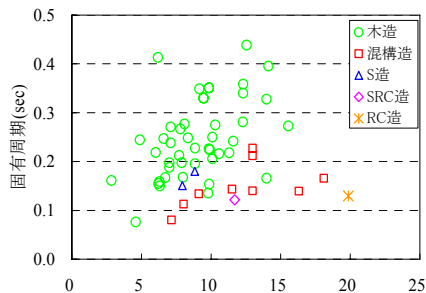


図8 最高高さと固有周期の関係

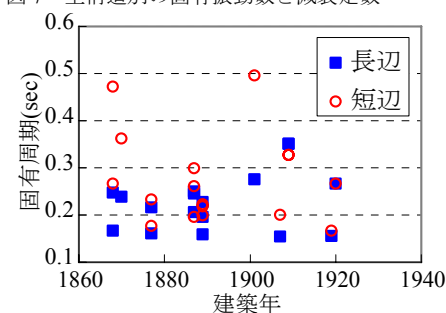


図9 建築年と固有周期の関係

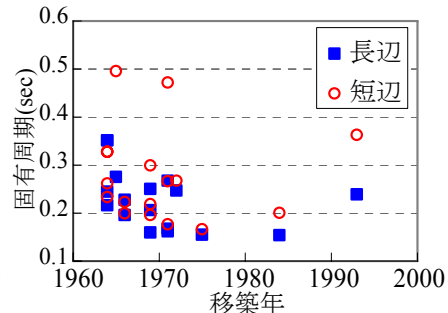


図10 移築年と固有周期の関係

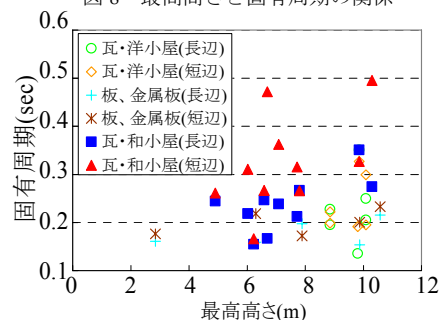


図11 最高高さと固有周期の関係(屋根種類別)

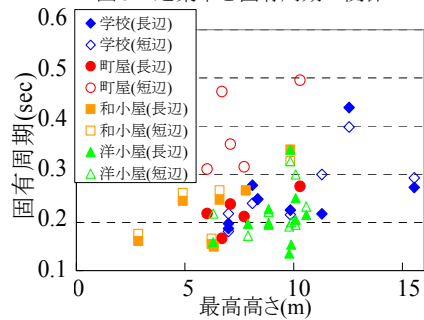


図12 最高高さと固有周期の関係(用途別)

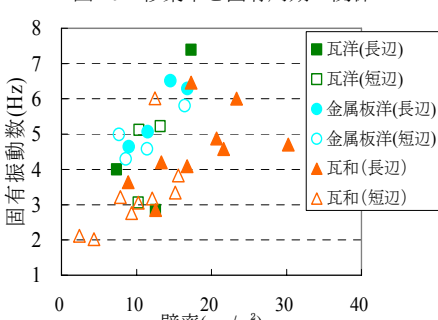


図13 壁率と固有振動数の関係

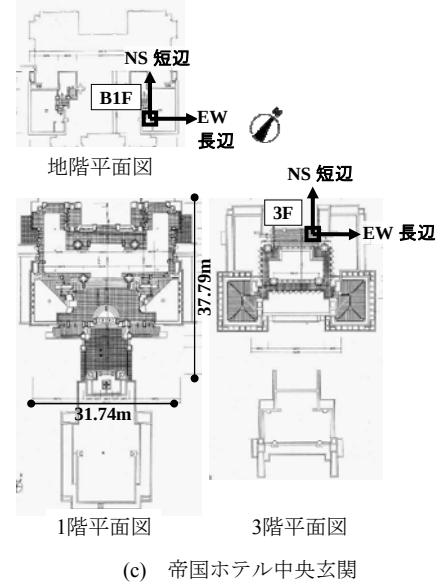
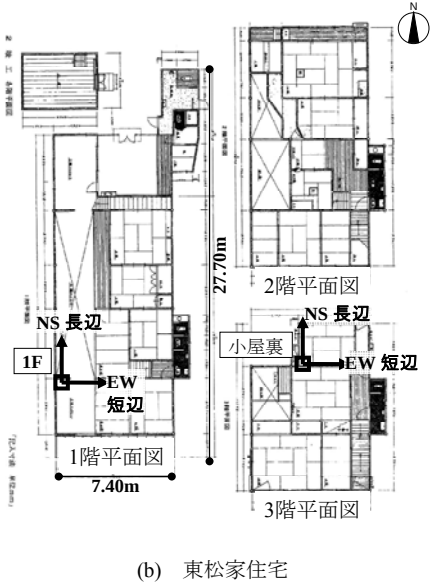
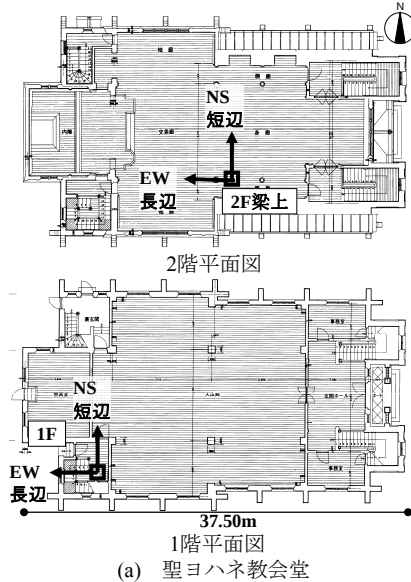


図 14 強震観測対象建物の外観写真および平面図

15 に、最大加速度を表 3 に示す。

これらの図表より、この地震は短周期で継続時間が短く、当該敷地で南北方向に卓越した揺れを持つ地震動であったことが分かる。地盤の加速度フーリエスペクトルに着目すると、6Hz～10Hz 近辺が卓越する揺れになっており、聖ヨハネ教会堂は尾根のため地盤がよく、東松家では盛土の影響が現れている。帝国ホテルは入江を埋め立てた地盤であるが、地盤改良も行っており、やや短周期になっていると考えられる。

建物の応答に注目すると、東松家住宅だけが 1 階と小屋裏の振幅がほぼ等しく、ほとんど増幅していない。これは後述する建物の固有振動数に比べ、地震動の卓越振動数がかなり高いことによる。

地震時の各建築物の小屋裏/1 階の伝達関数振幅と位相角を図 16 に、またこれらを 1 自由度系でフィッティングした基礎固定系の固有振動数と減衰定数を表 4 に示す。比較のため、微動記録については地盤-建物連成系と基礎固定系の伝達関数振幅を図 16 に、表 2 と同じ連成系の値を表 4 に示す。これらより、帝国ホテル、聖ヨハネ教会堂、東松家の順で固有振動数が低下し、特に 2 方向の特性の異なる東松家では短辺の EW 方向の固有振動数が低く、剛性が低くて揺れやすいことがわかる。微動における地盤-建物連成系と基礎固定系の比較から、帝国ホテル(特に EW 成分)で動的相互作用の影響が読み取れる。聖ヨハネ教会堂や東松家住宅の基礎が土間であり、地盤との相互作用が殆ど無いのに対して、帝国ホテルは地下室を持つ根入れ基礎であるため、地盤との相互作用が大きいのと考えられる。

以上の伝達関数と図 6 の微動 H/V スペクトルや、図 15 の地盤の波形から、聖ヨハネ教会堂や帝国ホテル中央玄関では地盤卓越周期と建物の固有周期が接近しており、共振の可能性もある。東松家住

宅は建物周期が 2～3.6Hz に対して入力が短周期に偏っていたため、殆ど増幅していない。

地震動と常時微動を比較すると、木質構造の聖ヨハネ教会堂と東松家住宅は微動と地震動で応答が大きく異なっている。これは地震動では地盤の入力が支配的なのに対し、微動では風等の建物の頂部の入力が支配的なためと考えられる。1 階と小屋裏の相対変位は 1mm に満たないが、建物の固有振動数はいずれも地震時の方が低くなり、振幅依存性の影響も見られる。

7. まとめ

博物館明治村に移築・保存されている明治期の様々な構造の近代建築物 51 件を対象に常時微動計測を行い、得られた実測記録を建物の特徴と共にデータベースとして整理し、各建物の結果をリーフレットにまとめ、近代建築物の構造・建築年代・移築年代と振動特性の関係を分析した。明治村は全体的に良好な地盤上に立地しているが、一部に入江や谷間を埋め立てている部分では 5～10Hz で地盤の卓越振動数が確認できた。

さらに、構造の異なる 3 棟の建物について強震観測を行い、地震応答特性に関する考察を行った。

今後は、構造や平面形状が複雑な建築物を中心に、個々の建物に関するより詳細な計測と分析が必要である。移築時の構造的な変更点や、補強工事の履歴なども詳細に把握することにより、近代文化財建築の耐震性向上に関する検討を進める。

【謝辞】

明治村建築担当の西尾雅敏様、石川新太郎様には貴重な資料を提供いただいたため、ここに謝意を表します。

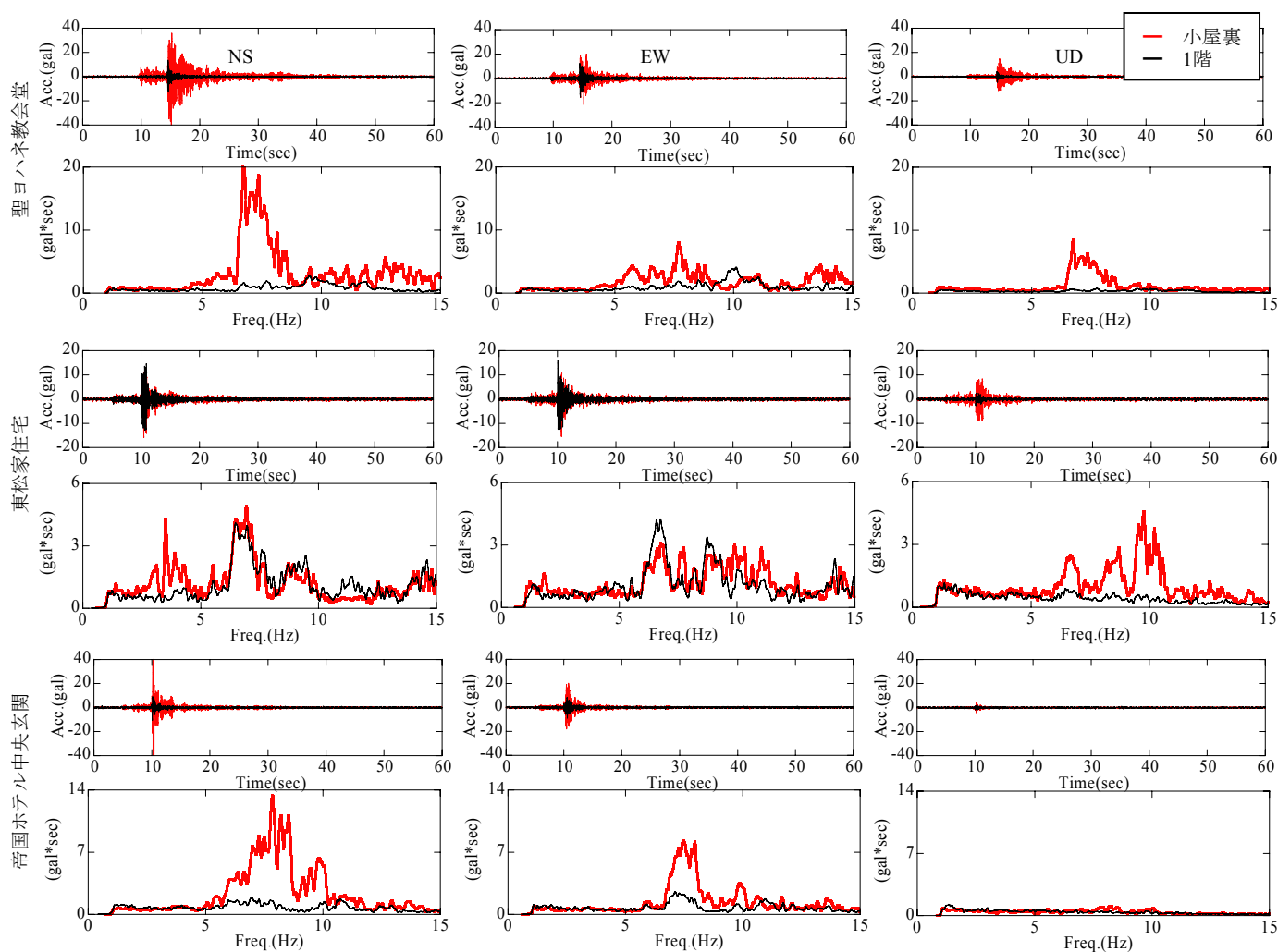


図 15 加速度波形と加速度フーリエスペクトル

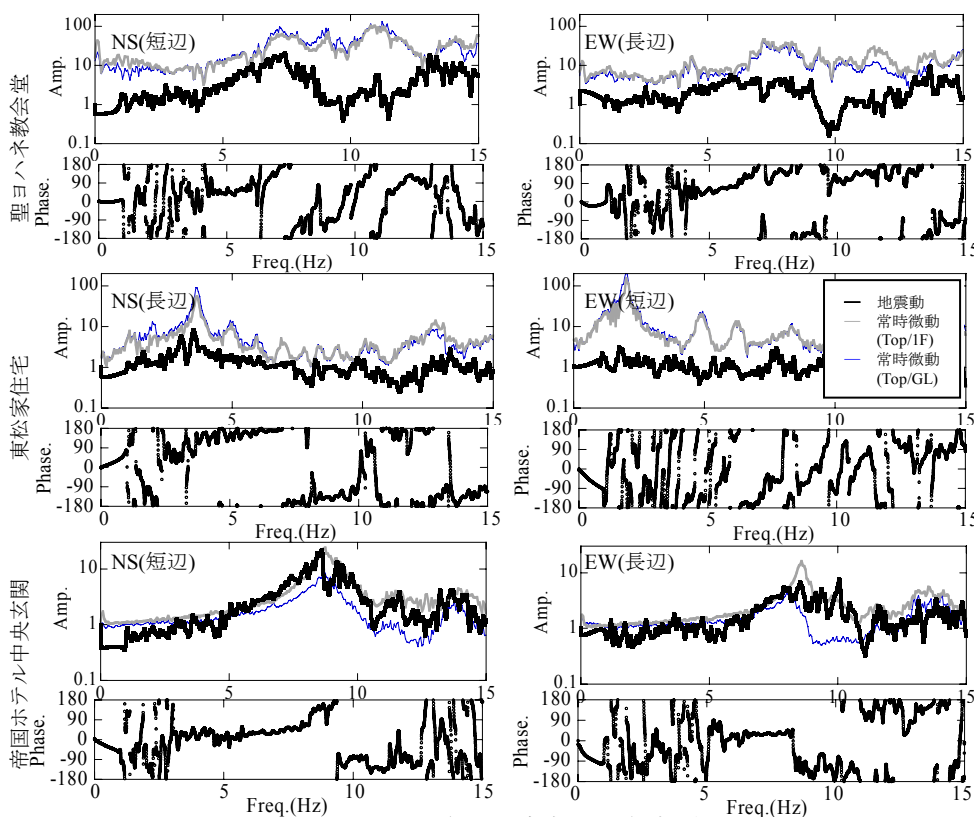


図 16 地震動及び常時微動の伝達関数

表 3 最大加速度

		最大加速度 (gal)		
		EW	NS	UD
聖ヨハネ教会堂	小屋裏	21.24	40.48	14.65
	1階	15.14	13.35	4.45
東松家住宅	小屋裏	15.32	15.69	8.74
	1階	16.05	14.56	2.84
帝国ホテル中央玄関	小屋裏	19.94	45.42	4.72
	1階	8.82	10.45	1.80

表 4 固有振動数と減衰定数

		振動数 (Hz)		減衰定数 (%)	
		長辺	短辺	長辺	短辺
聖ヨハネ教会堂	地震	6.54	7.24	12.70	2.65
	常時微動	7.26	7.33	0.99	0.66
東松家住宅	地震	3.58		11.40	
	常時微動	3.69	2.00	0.46	0.36
帝国ホテル中央玄関	地震	8.63	8.48	11.93	3.02
	常時微動	8.61	8.88	5.02	2.38