常時微動・振動実験に基づく伝統的木造建築及び近代建築の振動特性に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻

吉原明里

1 はじめに

文化財保護法では，有形文化財の中でも重要なものが重要文化財，そのうち特に価値の高いものが国宝に指定されている．我が国は地震多発国であり，耐震規定が定められているが，文化財建築物の多くは近世以前に建設されたものであり，耐震性能は十分とは言えない．また，伝統的木造建築物の貫や土壁などは，材料特性にばらつきが大きいため建物の振動特性を予測することは困難である．

本研究では，1618 年に建てられた国宝茶室及び重要文化財の書院を対象として基本的な振動特性を分析し，改修工事の効果を検討した．その他，構造モデルによる解析を行った．また，21 棟の寺院建築について振動特性を把握・比較し，傾向を分析した．これらを明治村の建物と比較することで寺院建築と近代建築の特徴について把握した．

2 茶室・書院の振動特性

2.1 対象建物及び振動計測・実験の方法

対象建物は，伝統的構法による平屋建て建築で，茶室は柿葺きの片入母屋造，書院は銅板葺の入母屋造である．書院南東の柱と茶室北西の柱は共有されている．

振動計測には，白山工業株式会社製サーボ型加速度計 JU210 と JU410 を用い，サンプリング周波数は 100 Hz とした．図 1 に計測機器の配置を示す．補修前・後でそれぞれ，条件を変えた 2 パターンの常時微動計測を行った．表 1 に計測条件を示す．補修前は屋根材が下ろされていたため，屋根材と同等のおもりを載せて計測した記録とおもりを載せていない記録，補修後は共有の柱部分の加速度を計測するために設けたつなぎありの記録とつなぎを外した記録である．写真 1 に共有の柱部分の様子を示す．自由振動実験は，柱に手を添えた状態で準備し，3 人で一斉に柱に力を加え瞬間的に離すことでインパルス加振を行い，自由振動波形を得た．

2.2 補修内容

茶室及び書院は，屋根の破損や，柱等の虫害が進行していたため補修工事が行われた．木部及び壁部の部分修理が茶室・書院共に行われた．書院に関しては，図 2 に示すように，根がらみ・小屋筋交いによる補強も行われた．

2.3 常時微動計測の結果

図 3 に基礎に対する梁の伝達関数，表 2 に RD 法により作成した自由振動波形に基づいて推定した固有振動数・減衰定数を示す．茶室と書院を比較すると，茶室の固有振動数が高くなっている．これは，茶室の方が壁が多く剛性が高いためと考えられる．既往の研究の伝統的木造住宅 [1] と比較すると茶室と書院の固有振動数は高くなっているが，茶室は住宅と比べて壁が多く，書院は茶室の北側の壁によって拘束されているためであると考えられる．また，

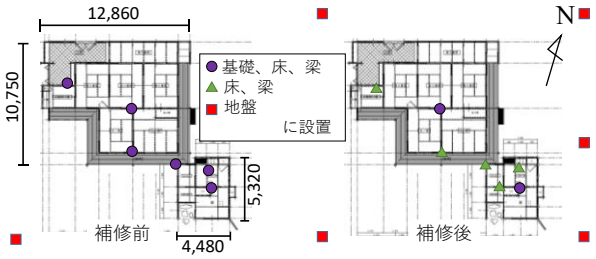


図 1 計測機器配置

表 1 常時微動計測の計測条件

	計測時期	屋根材	周辺の工事振動	共有部のつなぎ
①	補修前	なし（おもりなし）	なし	あり
②	補修前	なし（屋根材と同等のおもりあり）	なし	あり
③	補修後	あり（茶室：柿葺、書院：銅板葺）	あり	あり
④	補修後	あり（茶室：柿葺、書院：銅板葺）	なし	なし

写真 1 茶室と書院の共有部分

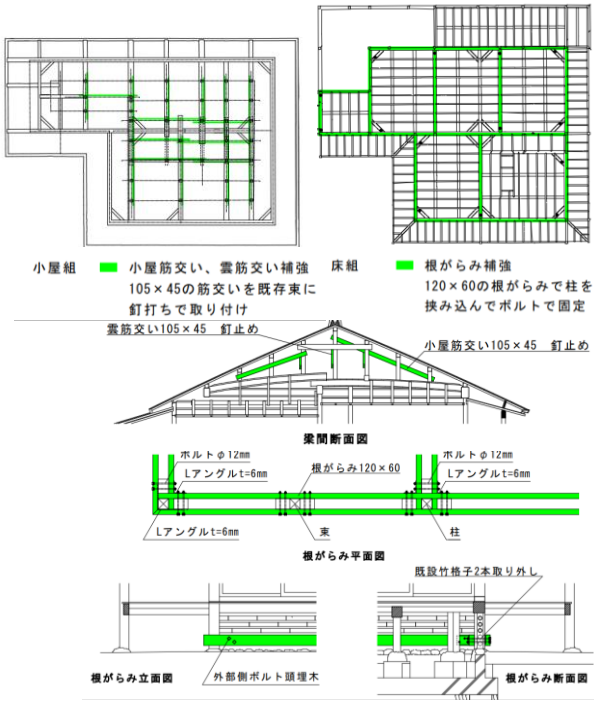


図 2 根がらみ・小屋筋交いによる補強 (書院)

壁が多い茶室が書院の南東側に連なっているため，南側に壁が少ない書院のバランスを改善している可能性もある．しかしながら，書院東西方向の固有振動数でねじれ振動が発生していた．微動レベルでは，おもりの有無やつなぎの有無によって，固有振動数の変化はなかった．補修前後の固有振動数を比較すると，書院東西方向での変化は見られなかったが，書院南北方向では 0.2 Hz，茶室南北方向で 2.0 Hz，茶室東西方向で 0.6 Hz 上昇した．補修により剛性が大きくなったと考えられる．減衰定数はばらつきがあるが，書院・茶室ともに南北方向では減衰定数が大きくなった．一方で，東西方向では減衰定数が小さくなった．

2.4　自由振動実験の結果

図 4 に自由振動実験の例として補修後に書院を東西・南北方向に加振した際の加速度波形と加速度フーリエスペクトルを示す．茶室に生じる振動の大きさに注目すると，東西方向が南北方向より茶室と書院が影響を及ぼし合いやすいことが分かる．これは書院東西方向の梁が茶室の壁に拘束されていることや，東西方向の梁のみが共有の柱に直接支えられていること，固有振動数が近い値であることが要因であると推測される．計測点ごとの卓越振動数に着目すると，書院を加振した際のフーリエスペクトルは全ての計測点で同じ振動数にピークが見られるのに対し，茶室と共有の柱を加振した場合では，計測位置により卓越振動が変化した．これは，書院が茶室の 3 倍以上の質量をもつため，書院の振動は茶室へ影響しやすいが，茶室の振動の書院への影響は小さいためであると考えられる．表 3 に補修前後での加振時の卓越振動数と減衰定数を示す．茶室は常時微動計測時と同様，卓越する振動数が補修により上昇した．書院でも卓越振動数は補修後にわずかに上昇したが，小屋筋交い・根がらみによる補強が行われた書院より茶室の方が補修による変化が大きく現れた結果となった．木部等の補修や屋根の葺き替えによる影響が茶室で顕著であった可能性がある．補修前後で振動の様子を比較したところ，補修後の方が書院の振動が茶室へ伝達されやすくなった．また，茶室を加振した際，補修前は茶室の固有振動数が卓越していたが，補修後は書院の固有振動数が卓越した．根がらみ・小屋筋交いにより接合部が固められたことが影響していると推測される．

2.5　構造モデルによる解析

株式会社マイダスアイティジャパン製汎用構造解析ソフト midas iGen を用いて構造モデルを作成し，固有振動モードについて解析を行った．図 5 にモデルを示す．全面壁のみ考慮する場合と垂れ壁・腰壁も考慮する場合に分け，それぞれ，(い) 梁端部を固定，支持条件を固定支持，(ろ) 梁端固定，回転支持，(は) 梁端部を長ほぞ，回転支持とした場合で解析した．各部材の重量は建築基準法施行令 [2] 及び重要文化財基礎診断実施要領 [3] に掲載されている単位面積当たりの荷重を基に求め，柱の配置に基づいて設けた接点に，柱が負担する屋根や壁の面積に応じて分配した．図 6 に，垂れ壁・腰壁を考慮し，梁端を固定

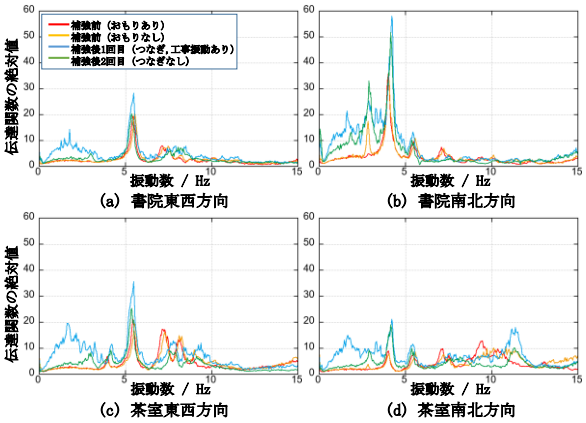
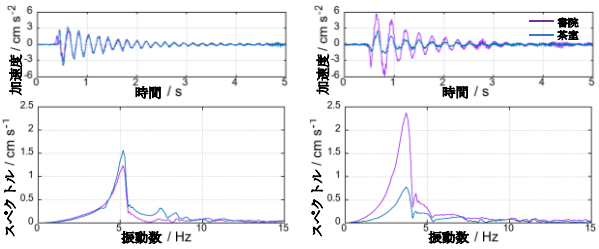


図 3　梁/基礎の伝達関数

表 2　微動時の固有振動数・減衰定数

		固有振動数 / Hz		減衰定数 / %	
		補修前	補修後	補修前	補修後
書院	東西	5.4	5.4	2.5	1.9
	南北	4.0	4.2	1.5	3.0
茶室	東西	7.1	7.7	3.3	3.1
	南北	9.4	11.4	2.8	3.4



(a) 書院東西方向加振　　(b) 書院南北方向加振

図 4　自由振動波形と加速度フーリエスペクトル

表 3　加振時の卓越振動数・減衰定数

		固有振動数 / Hz		減衰定数 / %	
		補修前	補修後	補修前	補修後
書院	東西	5.3	5.2	3.7	3.5
	南北	3.7	3.9	3.9	5.4
茶室	東西	6.9	7.7	2.5	4.5
	南北	9.6	10.8	3.9	3.3

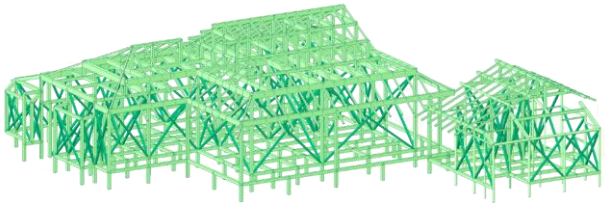


図 5　茶室と書院の構造モデル

端，支持条件を固定支持とした場合の結果を示す．計測結果とモード形状が現れる順序は一致したが，固有振動数は解析結果が低い値になった．要因としては，作成したモデルでは水平剛性を考慮していないことや材料特性を安全側に評価していることなどが考えられる．全面壁のみを考慮した場合と比較すると 10%程度垂れ壁・腰壁も考慮

した場合で固有振動数が高くなった．支持条件等を変更した場合は，条件 (い) (ろ) ではほとんど同じ結果になったが， (は) の梁端部を長ほぞとした場合は，固有振動数が大きく低下し，モード形状も変化した．このことから，梁端部が固定端とみなせないような大地震時では，振動特性が大きく変化すると予想される．茶室と書院を個別にモデル化して解析した場合と一体でモデル化した場合では，大きな違いはないが，僅かに一体モデルで固有振動数が上昇した．

3　寺院建築の振動特性

3.1　対象建物

本論では，表 4 に示した 21 棟の寺院を対象とし，2002 年から 2021 年に行われた計測記録を用いて考察する．

表 4　対象の寺院建築一覧

寺院	建物	建築年	寺院	建物	建築年
海蔵寺	本堂	1769	興禅寺	庫裏	1830
仏照寺	本堂	1800	覚王寺	庫裏	1840
光西寺	本堂	1805	総持寺（祖院）	山門	1932
如意寺	本堂	1823		法堂	1910
円楽寺	本堂	1848	総持寺	待鳳館	1957
正起寺	本堂	1897		紫雲臺	1915
浄照寺	本堂	1898		祥雲閣	1915
興禅寺	本堂	1898		香積台	1920
浄蓮寺	本堂	1912		佛殿	1915
円勝寺	本堂	1916	永平寺別院	山門	2005
常念寺	本堂	1955			

3.2　固有周期の比較

本堂の軒高はいずれも 5 m 程度であり，小屋組の高さの違いが最高高さの違いの大部分を占める．屋根の傾きも寺院間で大きな差異はなく，梁間方向の長さが高さに影響している．図 7 に高さと固有周期の関係を示した．軒高は，寺院間での差が小さいので，はっきりとした傾向はない．最高高さと固有周期には明確な相関が見られた．最高高さと小屋組高さには強い相関があるが，最高高さに比べ，小屋組み高さと固有周期の相関は小さくなった．図 8 に固有周期と屋根材の瓦の種類・葺き方の関係を示す．図 8 以降では，梁間方向と桁行方向で傾向が同じであるため，梁間方向の結果を示す．葺き土がない場合の方が，ある場合に比べて，固有周期が短い．これは葺き土が屋根面積 1 m²あたり 35 kg 程度あり，質量が大きいためと考えられる．また，桟瓦より本瓦の建物の方が固有周期が長い傾向にあり，これも質量によるものと推測される．図 9 に建築された年と固有周期の関係を示す．経年変化や濃尾地震，昭和東南海地震，三河地震等の大きな地震の経験，建設された時代の技術等の差はあるが，固有周期との相関はない．

3.3　減衰定数の比較

図 10, 11 に減衰定数の高さ・屋根材による違いを示す．減衰定数は，常時微動記録から RD 法により自由振動波形を作成し，対数減衰率によって求めた．高さ，瓦の葺き方，屋根荷重，壁量，宗派，柱スパン・断面積について比較を行ったが，いずれの分類においても明瞭な傾向は見られなかった．

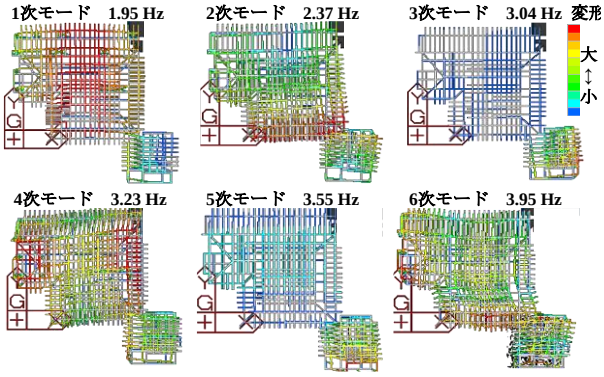
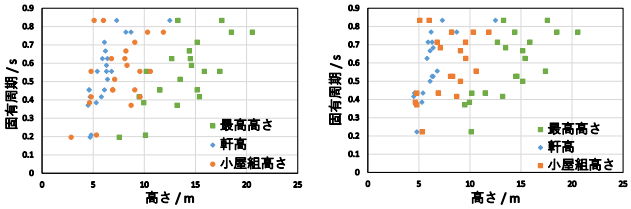


図 6　固有振動モードの解析結果



(a) 梁間方向　　(b) 桁行方向

図 7　高さと固有周期の関係

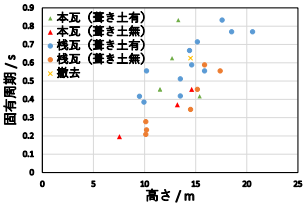


図 8　葺き方と固有周期

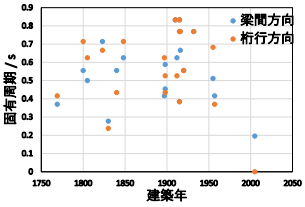


図 9　建築年と固有周期

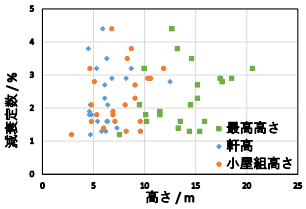


図 10　高さと減衰定数

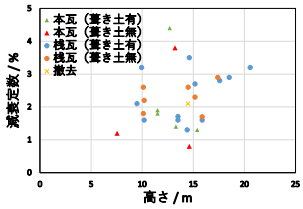


図 11　瓦と減衰定数の関係

表 5　工事内容

工事内容	浄照寺	仏照寺	浄蓮寺	如意寺	覚王寺庫裏
葺き土撤去	○	○	○	○	○
葺き替え	○	○	○	○	○
雲筋交い補強	○	×	×	○	×
格子壁補強	○	○	×	○	○
抱き柱	○	×	○	○	○
鉄骨撤去	×	○	×	○	×
筋交い補強	×	×	○	○	×
減震装置	×	×	×	○	×
基礎形式の変更	○	○	○	○	○

3.4　補修前後の比較

補修工事前後の計測記録がある浄照寺・仏照寺・浄蓮寺・如意寺・覚王寺庫裏の 5 棟について検討する．表 5 に工事内容を示す．全ての寺院において，葺き土の撤去，瓦の葺

き替え，独立基礎からべた基礎への基礎形式の変更が行われ，格子壁や抱き柱による補強もほとんどの建物で行われている．浄蓮寺は，補修前の計測時にすでに屋根材が下ろされている．また，補強だけでなく，土壁は全て格子壁に変更されている．伝統的木造建築は壁が少なく，大きな変形まで許容する設計が多く大変形時にも耐力を発揮しなければならないことが前提となるためである．格子壁は，木材のめり込みによって耐力を発揮するため，土壁に比べて変形によるせん断剛性の低下が小さく，伝統的木造建築にふさわしいといえる．ただし，初期剛性は土壁の方が大きく，本研究で使用している記録はこの範囲に相当している．

補修前後の振動特性の変化について，固有周期と減衰定数を図 12, 13 に示し比較する．荷重については，浄蓮寺の補修前計測時に屋根材が下ろされていたことを除き，補修後で小さくなり，固有周期が短くなる傾向にあるが，仏照寺の固有周期はあまり変化しなかった．減衰定数は，浄蓮寺・仏照寺・覚王寺庫裏では補修後の方が大きくなったが，如意寺と浄照寺では補修後に減衰定数が低下した．この 2 棟は共通して，小屋筋交いによる補強を行っている．既往の研究でも，接合部を固めることで減衰定数が低下した例もあることから，接合部で振動が吸収されにくくなったのではないかと考えられる．

4　近代建築と寺院建築の比較

4.1　対象建物

対象建物は，明治村に保存されている 1868 年から 1927 年に建てられた建築物 51 件である．常時微動記録は 2005 年に計測された結果を用いる．同年代に建てられた建物と比較することで，寺院建築の振動特性の傾向を考察する．

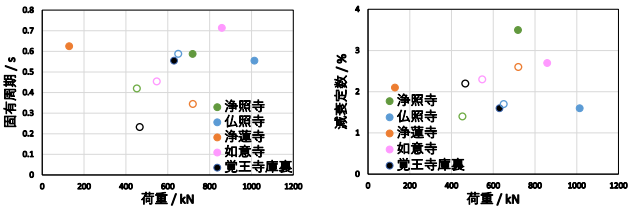
4.2　固有周期と減数定数

構造別に分類した高さと固有周期の関係を図 14 に示す．寺院建築は，高さが明治村の建物より高く，固有周期が長い．最高高さと固有周期の関係では，直線近似した場合の傾きが，明治村の木造建物と比較して大きい．図 15 の壁率と固有周期の関係から寺院建築は一般的な建物に比べて壁が少なく，居室部分の剛性が小さいためと考えられる．一方，小屋組み高さと固有周期の関係ではプロットの傾きが明治村の建物と同程度になることから，小屋組み部分の剛性は一般的な木造建物と同程度であると推測される．明治村の木造建物と鉄筋コンクリート・木造の混構造建物では固有周期の差が大きく，後者の固有周期が短い．図 16 に構造別の減衰定数を示す．減衰定数は，寺院建築が明治村の建物より大きい．寺院建築は小屋組み高さが高く，部材数も多いため，木材のめり込みにより振動が減衰しやすいと考えられる．

5　まとめ

本研究では，茶室・書院，寺院建築，近代建築について計測結果を基に振動特性を考察した．茶室と書院は，柱を共有して繋がっていることで，互いに振動特性に影響を及ぼしていた．また，補修によって固有振動数が上昇する等，振動特性に変化が見られた．根がらみ・小屋筋交いによる補強で接合部が固められ，書院の振動がより支配的になったことが分かった．寺院建築の固有周期には最高高さ・屋根材の葺き方・壁率が大きな影響を及ぼしていた．一方で減衰定数には明確な傾向は見られなかった．明治村の近代建築と比較すると，寺院建築は固有周期が長い傾向にあることが分かった．

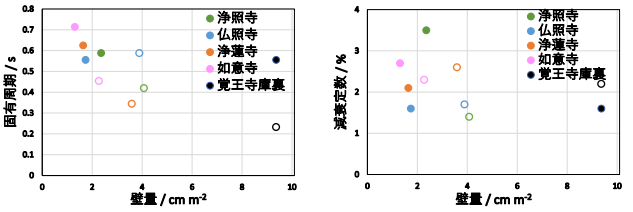
伝統的木造建築は，想定される振動特性とは異なる計測結果が現れることが多く，特に減衰については不明な部分が多い．更なるデータを蓄積し，特性を把握して維持保全につなげたい．



(a) 固有周期　　(b) 減衰定数

補修前
補修後

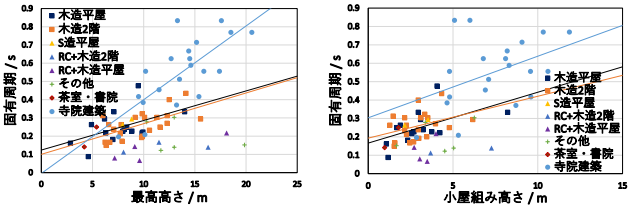
図 12　荷重の減少による変化



(a) 固有周期　　(b) 減衰定数

補修前
補修後

図 13　壁量の増加による変化



(a) 最高高さ　　(b) 小屋組み高さ

図 14　構造別の高さと固有周期

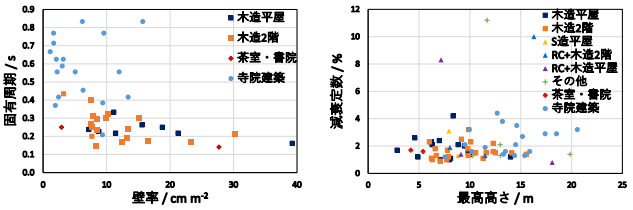


図 15　構造別の
壁率と固有周期の関係

図 16　構造別の
最高高さと減衰定数の関係

参考文献

1) 秀幸，河合直人，内田昭人：伝統的木造建築物の振動特性　その 9.民家の荷重変形関係と固有振動数の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.145-146, 2000 年
2) 建築基準法施行令第 84 条, 2020 年改正
3) 文化庁：重要文化財 (建造物) 基礎診断実施要領, 2012 年改正